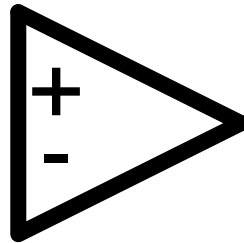


Cours 11

Amplificateurs de puissance

Le but du cours...

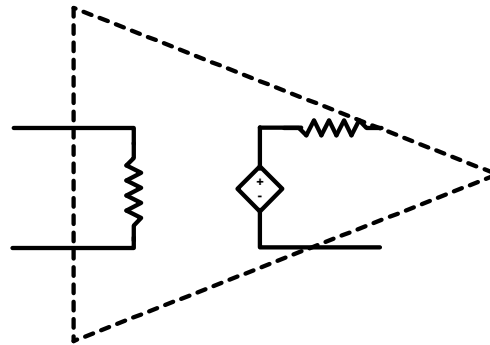
- On veut être en mesure de concevoir des amplificateurs.
- L'amplificateur opérationnel idéal:



- C'est un amplificateur tension-tension.
 - On amplifie une tension et on sort une tension
 - Revoyons ses caractéristiques

On part sur une tangente

- Pour un bon amplificateur tension-tension, il faut avoir les caractéristiques suivantes:
 - Résistance à l'entrée infinie
 - Résistance à la sortie de zéro

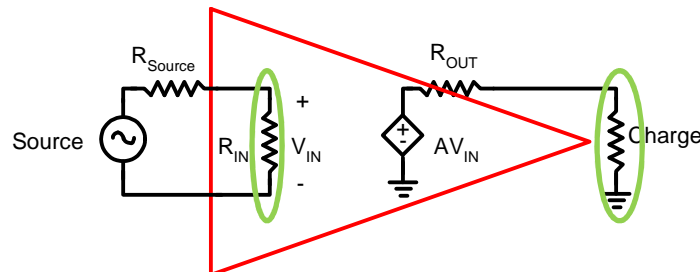


Pourquoi?

On part sur une tangente

- Les raisons deviennent claires quand on le connecte a un circuit externe
- L'amplificateur amplifie V_{IN} et non V_{SOURCE}
 - Pour V_{IN} eleve, il faut R_{IN} eleve
 - Sinon, il y aura une grosse chute de tension a R_{SOURCE}
- A la sortie, on a un diviseur de tension
 - On veut que R_{CHARGE} soit beaucoup plus que R_{OUT}
 - Pour s'assurer de ca, il faut $R_{OUT}=0$

On veut beaucoup de tension
aux places en vert



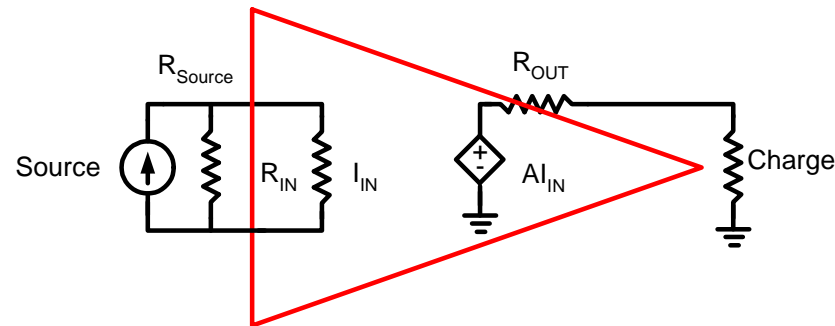
On part sur une tangente

- Il existe d'autres genres d'amplificateurs:
 - Amplificateurs tension-tension (on connait)
 - Amplificateurs tension-courant
 - Amplificateurs courant-tension
 - Amplificateurs courant-courant
- Ils ont tous des caracteristiques differents
 - Parfois R_{IN} faible, parfois R_{IN} eleve
 - Parfois R_{OUT} faible, parfois R_{OUT} eleve

Allons voir pourquoi

On part sur une tangente

- Avec ampli tension-tension, R_{IN} est eleve
- Si le signal a l'entrée etait un COURANT, on aurait ce circuit:

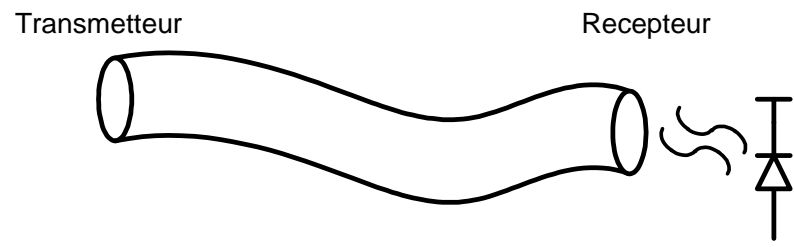


- I_{IN} est amplifie
- Pour maximiser I_{IN} , on veut $R_{IN}=0$

Connait-on des signaux qui viennent sous forme de courant?

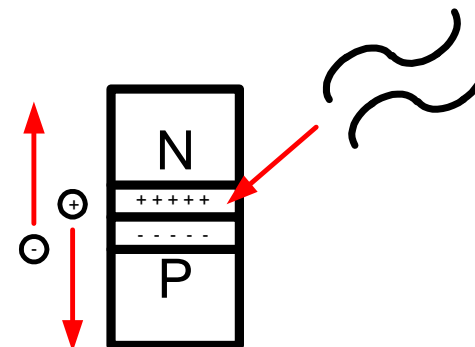
On part sur une tangente

- Les systemes a fibres optiques utilisent des photodiodes au recepneur



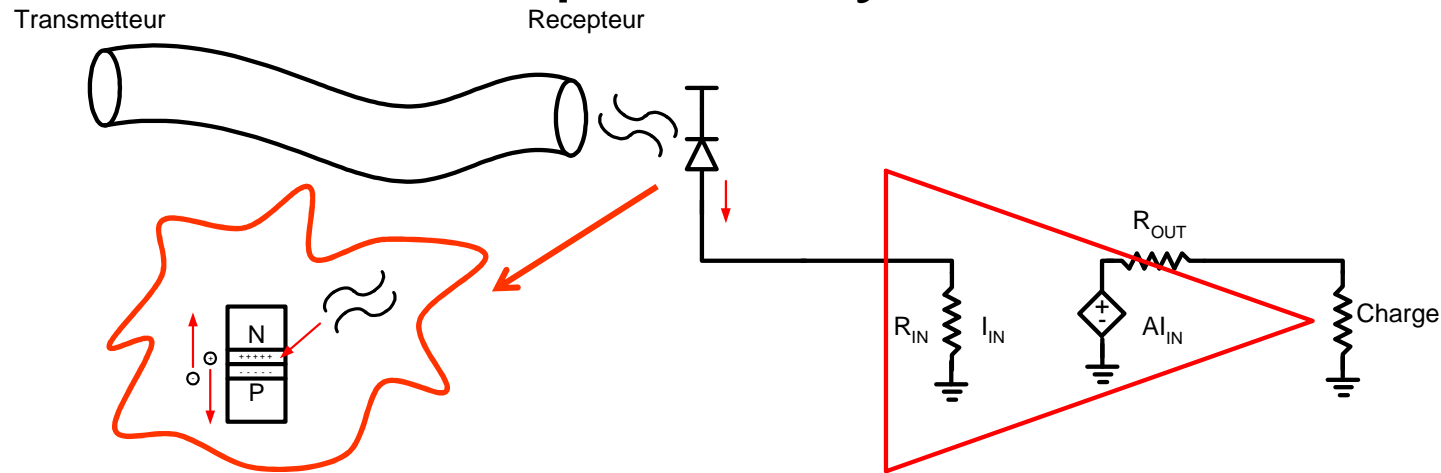
- Les photodiodes sont des diodes polarisees en inverse...

- 1) Photon frappe et donne de l'energie
- 2) Lien electron-trou se brise
- 3) Champ electrique pousse + et -
- 4) Ca donne un courant



On part sur une tangente

- Voici un exemple de systeme:



- Photodiode est modelisee comme une source de courant
- La resistance de source est implicite

On part sur une tangente

- Avec les amplificateurs tension-**tension**, on voulait R_{OUT} faible:
 - Il y aurait moins de perte de tension dans R_{OUT}
- Pour une **sortie en courant**, on voudrait avoir **R_{OUT} eleve**:
 - Tout le courant se retrouverait a la charge

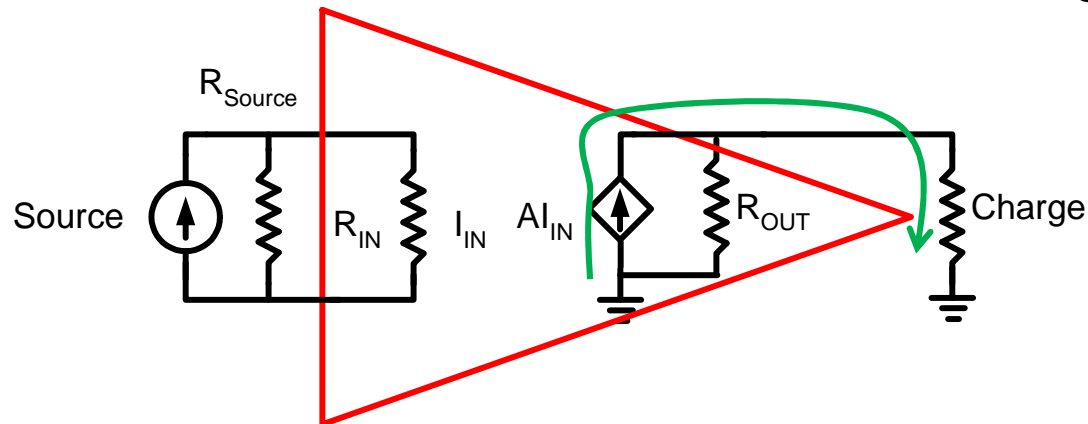


Tableau recapitulatif

- Voici un resume des caracteristiques:

Amplificateur	R_{IN}	R_{OUT}	Exemple
V-V	Eleve	Faible	D-C
V-I	Eleve	Eleve	S-C
I-V	Faible	Faible	GC-DC
I-I	Faible	Eleve	G-C

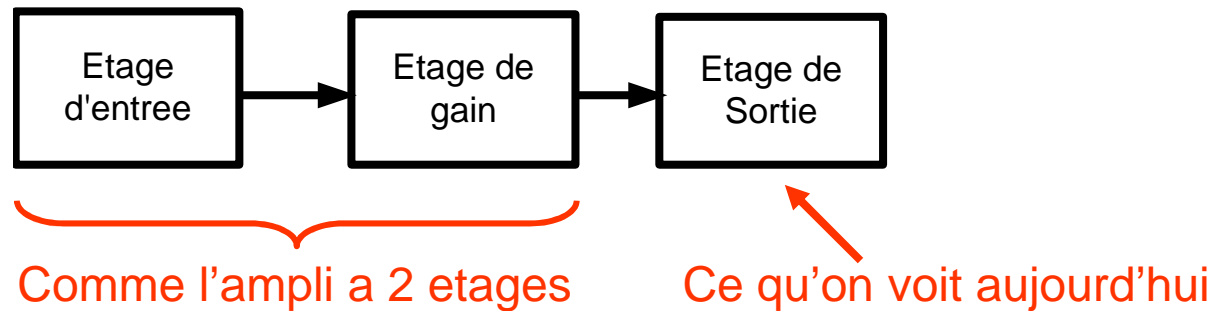
Retournons aux amplificateurs V-V

Amplificateurs de puissance

- On a parle des configurations qui fonctionnent bien pour des signaux faibles
- A l'interne, les courants seront faibles
 - Le signal de sortie a la fin doit avoir de la puissance et doit etre "efficace"
 - On utilise des amplificateurs de puissance
- Exemples d'application:
 - Commander des hauts-parleurs
 - Avoir assez de puissance pour transmission RF

Amplificateurs de puissance

- On se concentre sur l'étage de sortie:



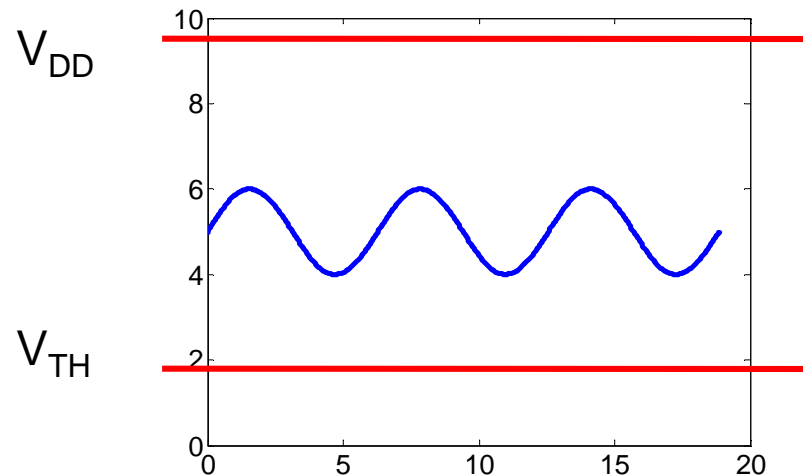
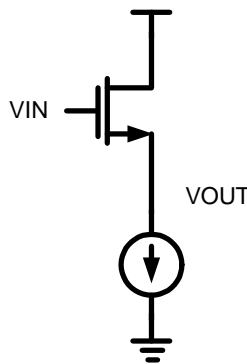
- On va explorer 4 types:
 - Classe A
 - Classe B
 - Classe AB
 - Classe C

Classe A

- Les amplis de classe A sont des amplis qui conduisent toujours
 - Note: Il y a donc des amplificateurs qui ne conduisent pas toujours
- Exemple de classe A:
 - “Drain commun”
- Allons voir ca en details...

Classe A

- Le drain commun conduit toujours (quel que soit le signal a l'entrée)
- L'entrée respecte les conditions suivantes:
 - On reste en bas du V_{DD} (sinon, il sature)
 - On reste en haut de V_{TH} (sinon, il ne conduirait pas)



Classe A

- Si ça respecte toutes ces conditions, c'est un amplificateur de classe A.
- **Avantage:**
 - Simple a concevoir
 - Represente fidelement l'entrée (lineaire)
- **Desavantage:**
 - Consommation de puissance excessive

Puissance excessive?

Classe A

- L'amplificateur conduit toujours. Il a donc, en tout temps:
 - Un courant I_D (DC) qui polarise le transistor
 - Un courant i_{SIG} qui provient du signal
- On dépense une certaine puissance pour transmettre un signal:
 - Pas toute cette puissance est due au signal
 - Une partie est due à la polarisation
 - La polarisation ne donne aucune "information"

Il y a donc un gaspillage de puissance... un manque "d'efficacité"

Classe A

- Nouveau mot: Efficacite de puissance

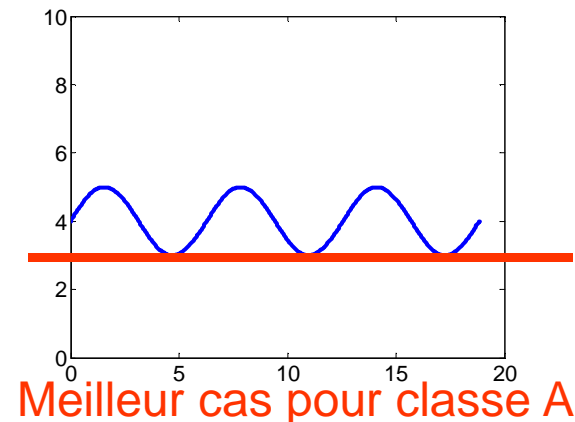
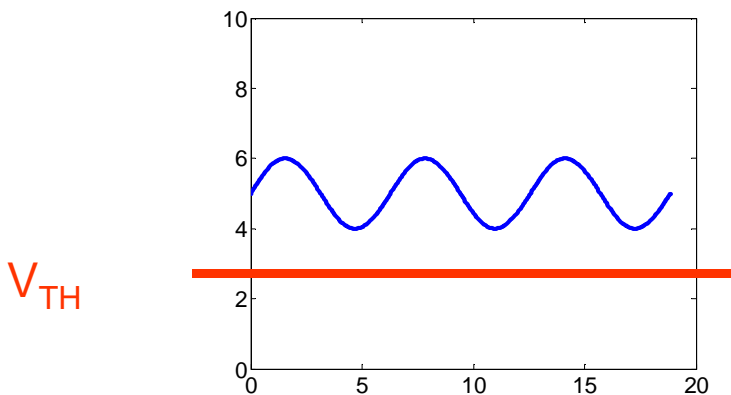
$$\eta = \frac{P_{SIG}}{P_{DC}}$$

- C'est le ratio entre la puissance du signal et la puissance du niveau DC
 - Dans le meilleur des cas, le DC sera SEULEMENT assez pour transmettre le message
 - Dans ce cas, l'efficacite sera de 100%

Allons calculer l'efficacite de notre classe A

Classe A

- Pour 100% efficacite, il faudrait que toute la puissance dissipee soit due au signal
 - Autre facon de le dire: il faudrait que $P_{DC}=P_{SIG}$
- On devrait comprendre que la tension DC a l'entrée devrait etre faible
 - Ca limite le courant de sortie

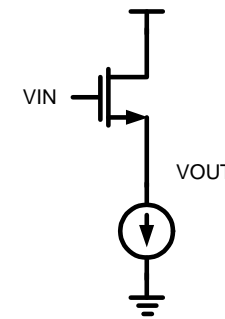


Classe A

- La tension DC ne contribue pas au signal
 - Quand le BAS de la courbe touche V_{TH} , on est le plus efficace (classe A)

- On sait que l'efficacite est:

$$\eta = \frac{P_{SIG}}{P_{DC}}$$



- On peut donc calculer l'efficacite...
 - On commence par la partie facile (le DC):

$$P_{DC} = I_{DC} \cdot V_{DD}$$

Passons maintenant au signal

Classe A

- Le cas general c'est quand le signal est une onde sinusoidale.
- On peut trouver la puissance avec une conversion en RMS...

$$P_{SIG} = \left(\frac{I_{SIG}}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{V_{SIG}}{\sqrt{2}} \right)$$

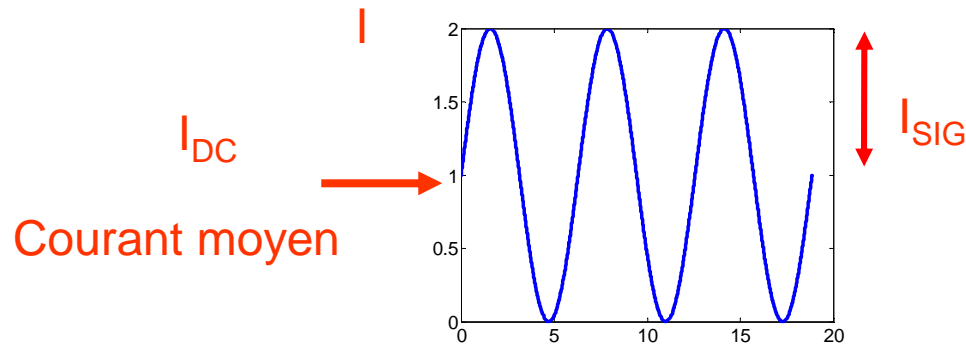
- L'efficacite devient:

$$\eta = \frac{P_{SIG}}{P_{DC}} = \frac{\left(\frac{I_{SIG}}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{V_{SIG}}{\sqrt{2}} \right)}{I_{DC} \cdot V_{DD}} = \frac{\left(\frac{I_{SIG} V_{SIG}}{2} \right)}{I_{DC} \cdot V_{DD}}$$

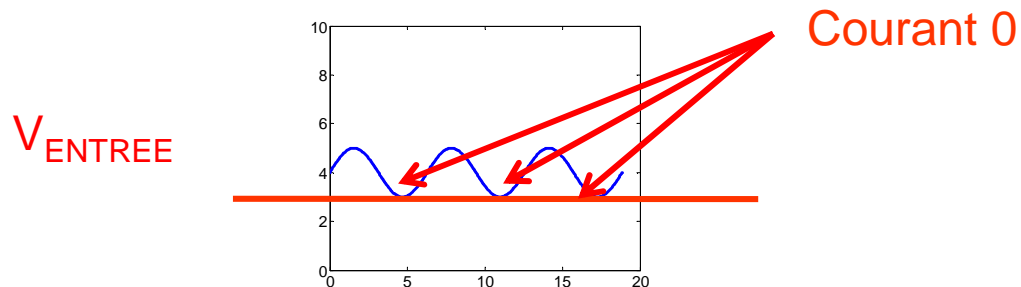
I_{DC} , V_{DD} , I_{SIG} , V_{SIG} ... trop de variables... faisons des liens...

Classe A

- Examinons le courant $I_{DC} + i_{sig}$:

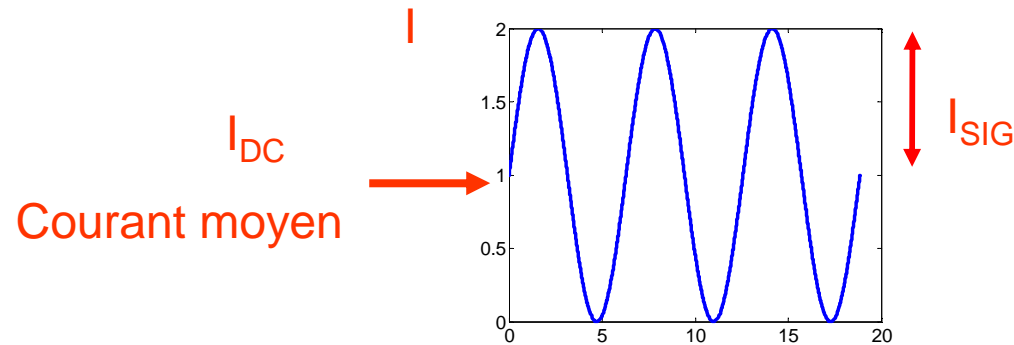


- Pour la meilleure efficacite, le courant tombe a 0 periodiquement



Classe A

- Si le courant tombe a 0, ca veut dire que $I_{DC} = I_{SIG}$.



- On peut donc simplifier l'equation:

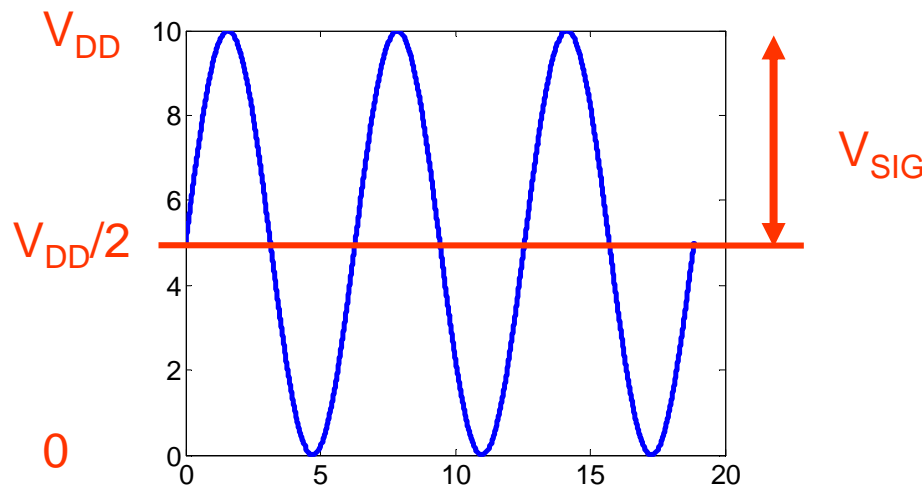
$$\eta = \frac{\left(\frac{I_{SIG} \cdot V_{SIG}}{2} \right)}{I_{DC} \cdot V_{DD}} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{\left(\frac{I_{DC} \cdot V_{SIG}}{2} \right)}{I_{DC} \cdot V_{DD}} = \frac{V_{SIG}}{2 \cdot V_{DD}}$$

Peut-on simplifier encore plus?

Classe A

- Pour une grande efficacite V_{SIG} devrait etre grand
 - C'est quoi le V_{SIG} maximal?
- Si les tensions disponibles sont de 0 a V_{DD} , V_{SIG} a une valeur max de $V_{DD}/2$

$$\eta = \frac{V_{SIG}}{2 \cdot V_{DD}}$$



Classe A

- En realite, V_{SIG} n'est pas $VDD/2$ puisque la plage n'est pas 0 a VDD
 - Ca va de V_{TH} a VDD a l'entrée (trop complique!)

- On va faire semblant que c'est $VDD/2$:

$$\eta = \frac{V_{SIG}}{2 \cdot VDD} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{VDD}{2 \cdot VDD} = \frac{1}{2} = 50\%$$

- En pratique, on s'attend a 10-15%
- Le $\frac{3}{4}$ de ma puissance est "inutile"!

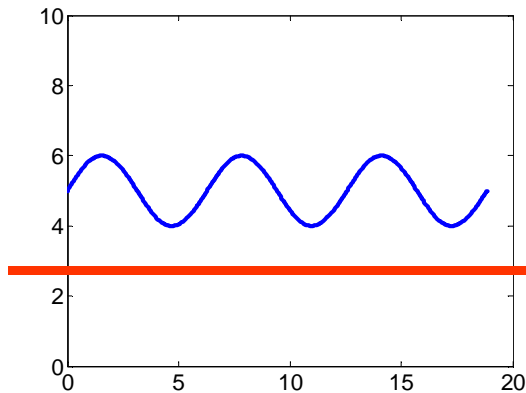
Ce n'est donc pas tres efficace...
Allons voir d'autres options

Classe A

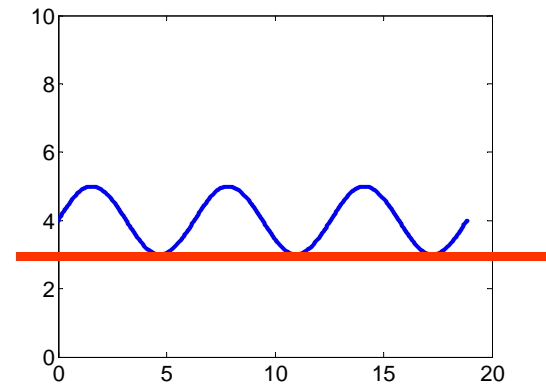
- Dans l'ampli de classe A, le signal pouvait être entre V_{TH} et V_{DD}
 - Raison, il fallait **toujours** que ça conduise

V_{DD}

V_{TH}



Typique

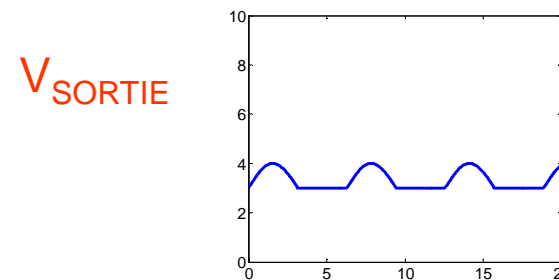
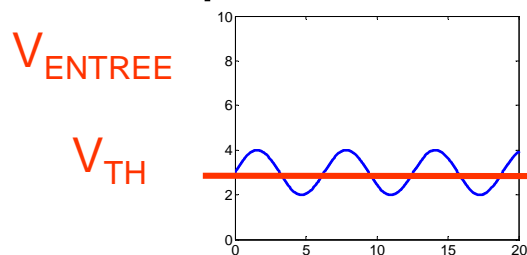


Limite

- Qu'arrive-t-il si V_{SIG} avait un DC plus bas?

Classe B

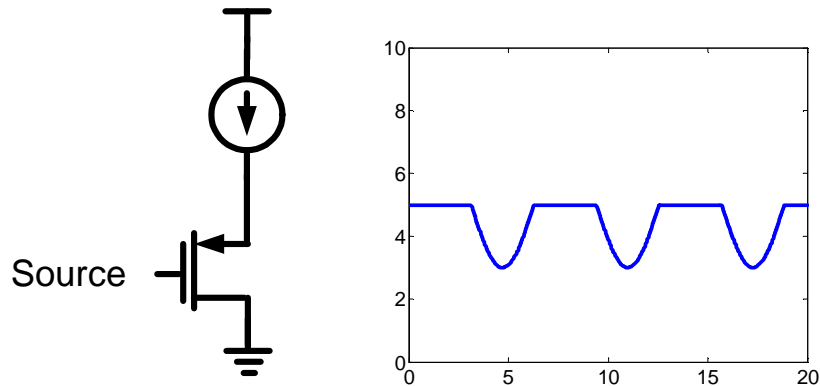
- En baissant V_{DC} , le transistor cesse de conduire durant une partie de la période
- Par exemple, mettons V_{DC} a V_{TH} :
 - En appliquant un sinus, on voit que:
 - 1) Durant la partie positive, le transistor conduit
 - 2) Durant la partie negative, le transistor ne conduit pas



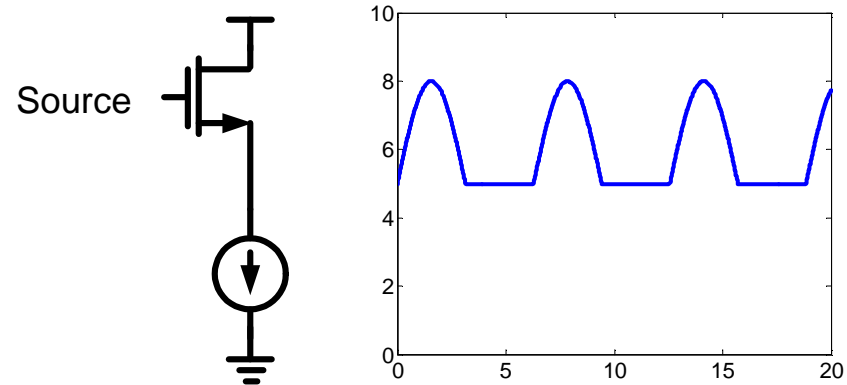
La sortie ne ressemble pas a l'entrée! Ca ne semble pas si bon...

Classe B

- On commence par se rappeler qu'il existe 2 genres de drain commun:
 - Avec NMOS: Conduit durant la phase positive
 - Avec PMOS: Conduit durant la phase negative



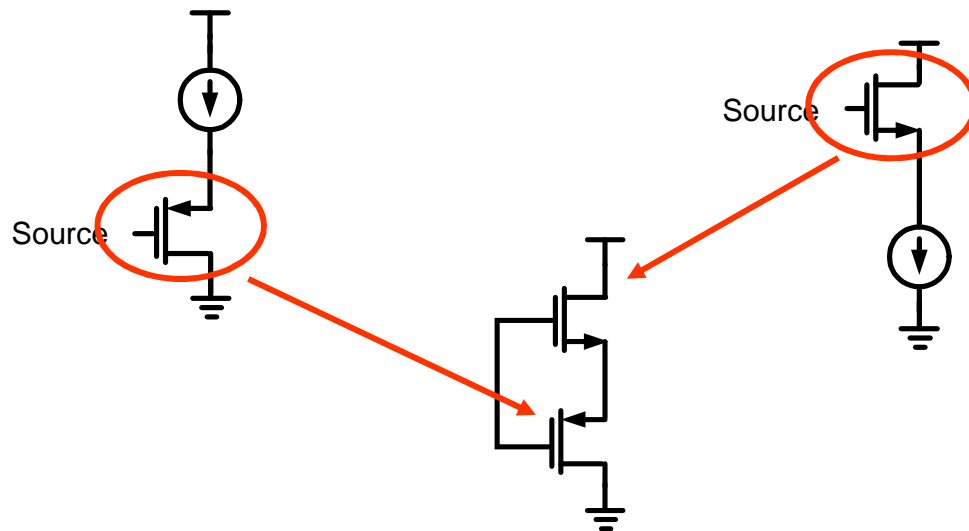
V_{SORTIE} avec PMOS



V_{SORTIE} avec NMOS

Classe B

- Ce serait possible de combiner les 2:

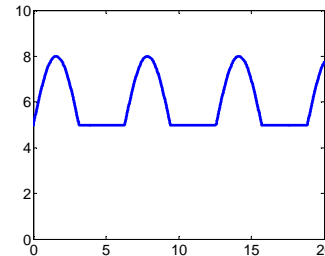
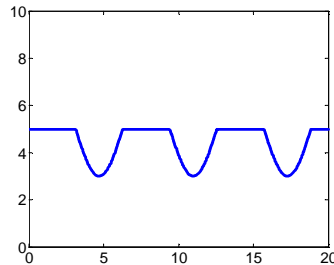


Note: ce n'est pas un "inverseur"

- Comme ça, le signal de sortie ressemblera au signal a l'entrée...

Classe B

- Seulement 1 transistor sera actif a la fois
 - Pour les signaux positifs, le NMOS conduit
 - Pour les signaux negatifs, le PMOS conduit



- On appelle ca un amplificateur de classe B
- Caractéristique principale:
 - Chaque transistor opere pendant ~50% du temps

Analysons son efficacite

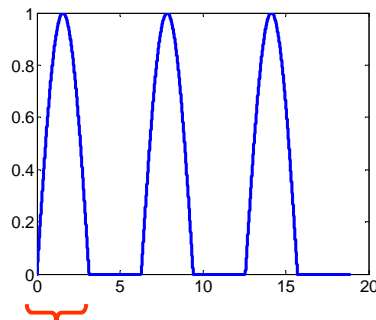
Classe B

- On sait que l'efficacite est donnee par:

$$\eta = \frac{P_{SIG}}{P_{DC}}$$

- On commence avec le signal P_{SIG} :
 - Le P_{SIG} est actif pendant $\frac{1}{2}$ periode
 - Durant l'autre moitie, ca ne conduit pas

Courant



Demie-periode

$$P_{SIG} = \left(\frac{I_{SIG}}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{V_{SIG}}{\sqrt{2}} \right) = \left(\frac{I_{SIG} V_{SIG}}{2} \right)$$

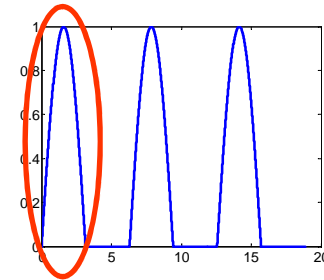
Meme equation que tantot sauf que ce n'est valide que pour T/2

Passons a la puissance DC

Classe B

- Pour P_{DC} on a besoin de I_{DC} et V
- Pour I_{DC} , on veut la valeur moyenne du courant **durant la conduction**

$$I_{DC} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_{SIG} \sin(\omega t) dt$$



- On sort le I_{SIG} (constant):

$$I_{DC} = \frac{I_{SIG}}{T/2} \int_0^{T/2} \sin(\omega t) dt$$

- On fait l'integrale (Resultat intermediaire)

$$I_{DC} = \left[\frac{I_{SIG}}{T/2} \right] \left(-\frac{1}{\omega} \right) \left[\cos\left(\omega \frac{T}{2} \right) - \cos(0) \right]$$

Classe B

- Sachant que:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

- On pourrait re-ecrire l'equation:

$$I_{DC} = \left[\frac{I_{SIG}}{T/2} \right] \left(-\frac{1}{\omega} \right) \left[\cos\left(\omega \frac{T}{2} \right) - \cos(0) \right] \Rightarrow I_{DC} = -\frac{I_{SIG}}{T/2} \frac{T}{2\pi} \left[\cos\left(\frac{2\pi T}{T 2} \right) - \cos(0) \right]$$

- Apres simplification, ca devient:

$$I_{DC} = \frac{2I_{SIG}}{\pi}$$

-1

Avec le courant, on peut trouver la puissance

Classe B

- La puissance DC est donnée par:

$$P_{DC} = I_{DC} V_{DD} = \frac{2I_{SIG}}{\pi} V_{DD}$$

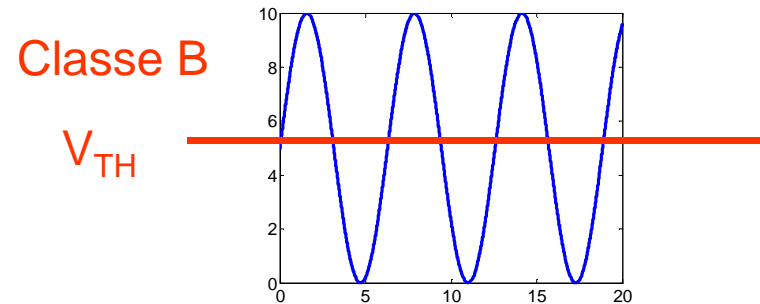
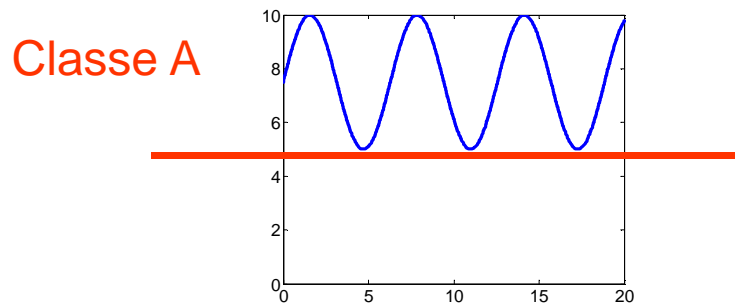
- L'efficacité devient:

$$\eta = \frac{\left(\frac{I_{SIG} V_{SIG}}{2} \right)}{\frac{2I_{SIG}}{\pi} V_{DD}} = \frac{\left(\frac{V_{SIG}}{2} \right)}{\frac{2}{\pi} V_{DD}}$$

L'efficacité dépend de V_{SIG} ... mais c'est quoi le meilleur cas?

Classe B

- Contrairement au classe A, V_{SIG} maximale de classe B est 2 fois plus gros:
- Imaginons un V_{TH} comme ceci:
 - L'entrée en classe A devrait être au dessus
 - L'entrée en classe B devrait être au milieu



- Avec classe B, on peut avoir 2 fois la taille

Classe B

- V_{SIG} maximale n'est pas $VDD/2$, mais VDD

$$\eta = \frac{\left(\frac{V_{SIG}}{2}\right)}{\frac{2}{\pi}VDD} = \frac{\left(\frac{VDD}{2}\right)}{\frac{2}{\pi}VDD}$$

- L'efficacite maximale serait donc:

$$\eta = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\%$$

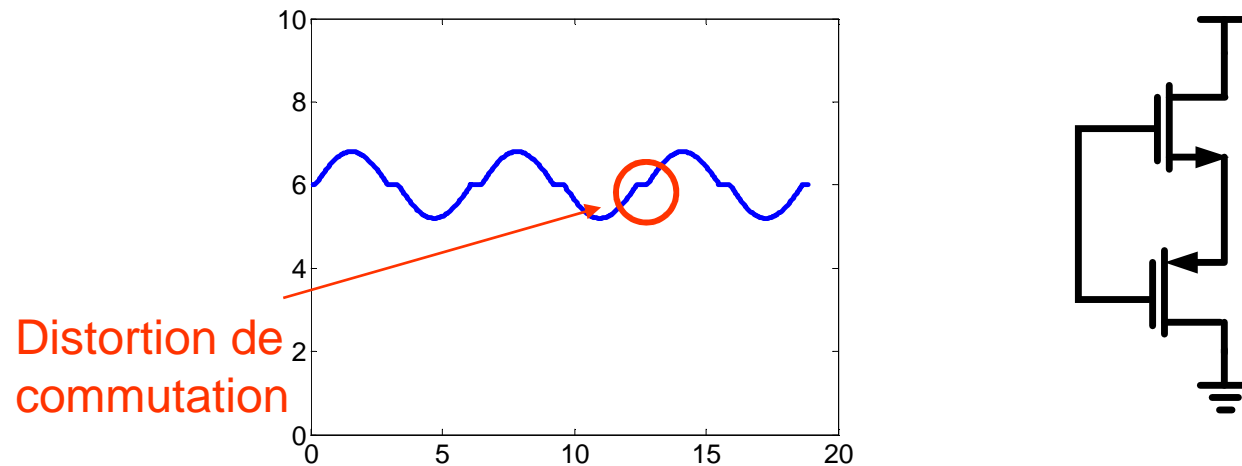
Comparez ca au 25% avec la classe A...

Classe B

- L'analyse precedente ne considere QU'UN SEUL transistor
- Avec les 2 transistors, les resultats sont semblables
 - L'autre demi periode aura la meme efficacite
- Son efficacite est 3x meilleur que classe A
 - Est-ce qu'il a des lacunes?
 - Allons voir une simulation de son comportement...

Classe B

- Voici une illustration MATLAB:



- Autour du milieu, aucun des transistors ne conduit

$$V_G = V_S \Rightarrow V_{GS} \approx 0$$

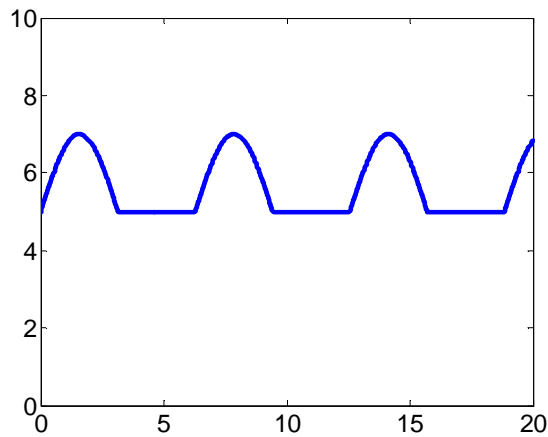
Le signal n'est pas aussi beau (lineaire) qu'avec classe A...

Classe AB

- Classe A:
 - Conduit durant 100% du cycle
 - Efficacite est de 25% (max)
 - Bonne linearite
- Classe B:
 - Conduit 50% du cycle
 - Efficacite est de 78% (max)
 - Distortion de commutation
- Y a-t-il un compromis entre 50% et 100%?

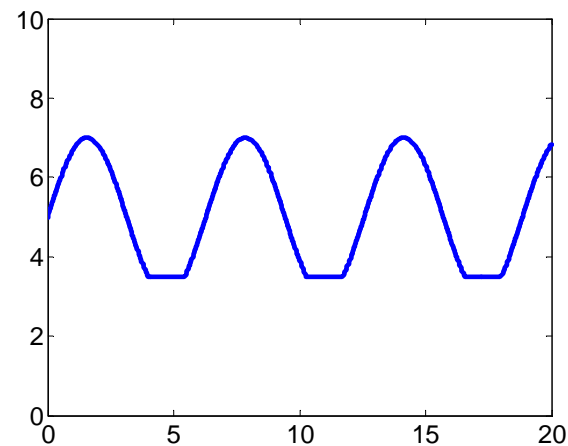
Classe AB

- Il y a ce qu'on appelle la classe AB
- Dans la classe AB, les amplificateurs conduisent entre 50% et 100% du temps



50%

vs



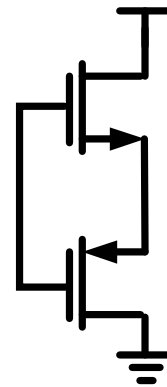
Plus que 50%

% de conduction est entre classe A et B

Classe AB

- L'efficacite se retrouvera donc entre 25% et 78% (entre classe A et B)
- La linearite se trouve aussi entre la classe A et la classe B.
- Retournons a notre classe B:

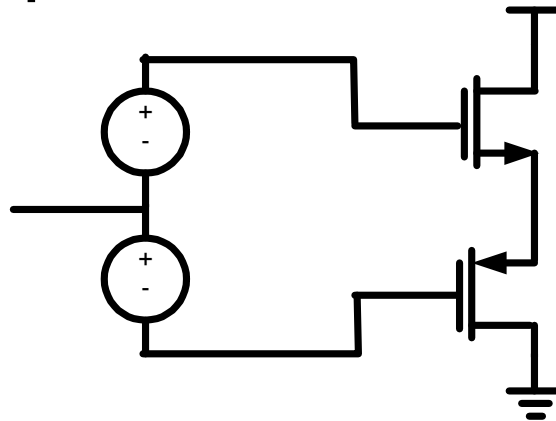
Le probleme etait que autour de $V_{DD}/2$, aucun des transistor ne conduit



Comment resoudre ca?

Classe AB

- Aucun transistor ne conduit parce que $|V_{GS}|$ n'est pas assez grand
- Solution: Quand la sortie $\sim V_{DD}/2$,
 - Donner au NMOS un V_G plus gros que $V_{DD}/2$
 - Donner au PMOS un V_G plus petit $V_{DD}/2$
- Conceptuellement, on pourrait avoir ceci:



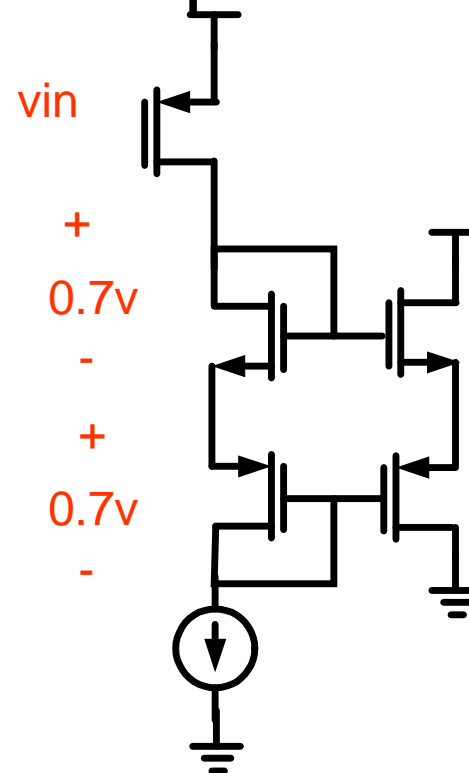
Les $|V_{GS}|$ sont plus élevés qu'avec classe B

Classe AB

- Créer des sources de tension “flottantes” n’est pas évident.
- En pratique, on pourrait penser a ceci:

Quand sortie $\sim V_{DD}/2$:

1. V_G du NMOS sera 0.7v plus
2. V_G du PMOS sera 0.7v moins

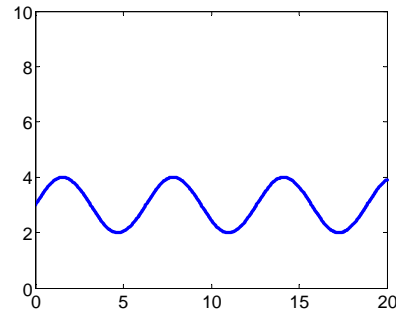


Classe AB

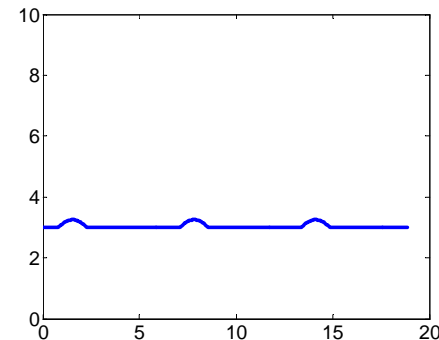
- Classons les amplificateurs par % du cycle durant lequel il conduit:
 - 100%: Classe A
 - 50%: Classe B
 - De 50% a 100%: Classe AB
- Est-il possible de conduire MOINS que 50%?
- On aurait le spectre complet...

Classe C

- Il est possible de conduire moins que 50%
 - Ca va nous donner une solution plus efficace
 - Ca va aussi causer plus de distortion.



Entrée



Sortie

Les signaux ne se ressemblent plus du tout!

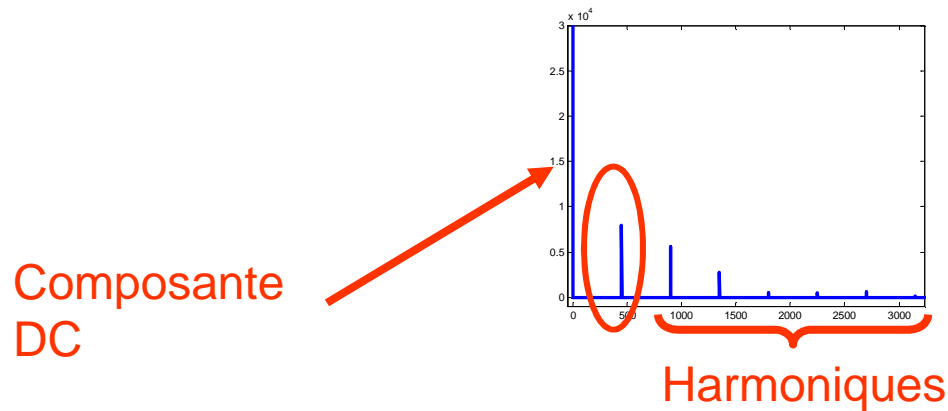
Classe C

- Il y a donc une grosse non-linearite
 - Meme en mettant 2 transistors, on n'aurait pas le signal initial
- Il faudrait “reconstruire” le signal
 - Pensons par exemple a un circuit resonant
- Ca s'appelle: amplificateur classe C.

Voyons comment reconstruire le signal...

Classe C

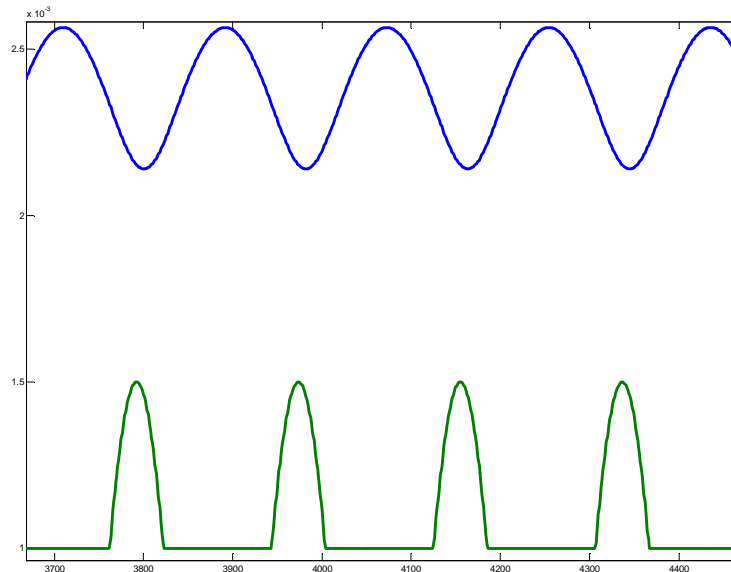
- Le spectre fréquentiel du signal de sortie:
 - La fondamentale est la même que l'entrée



- Pour retrouver le sinus en entrée, on n'aurait qu'à faire un filtre passe-bande

Classe C

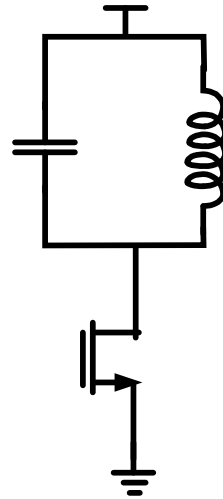
- Le signal en bas est celui de avant le filtrage
- Après filtrage, on retrouve le signal en bleu (en haut)



Ok, mais comment faire?

Classe C

- Conceptuellement, on pourrait penser a un systeme de ce genre:



A la place d'un R, on a un circuit resonant LC

Amplificateur source commune

- Bon pour petit signal... pour plus de puissance, il faut penser a une autre topologie...

Classe C

- L'équation de l'efficacité ne sera pas dérivée (trop compliquée – pas assez utile)

$$\eta = \frac{2\phi - \sin 2\phi}{4(\sin \phi - \phi \cos \phi)}$$

- Ici, ϕ c'est la portion de la période ou ça conduit.
- Quand ϕ tend vers 0 (théorème de l'Hôpital), l'efficacité tend vers 100%

Resume

- Voici un resume des caracteristiques

Classe	ϕ (%)	η (% max)	Linearite
A	100	25	++
B	50	78	-
AB	50-100	25-78	+
C	< 50	100	--