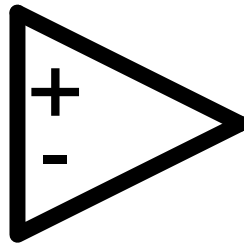


Méthode de conception en électronique

Cours 9

Le but du cours...

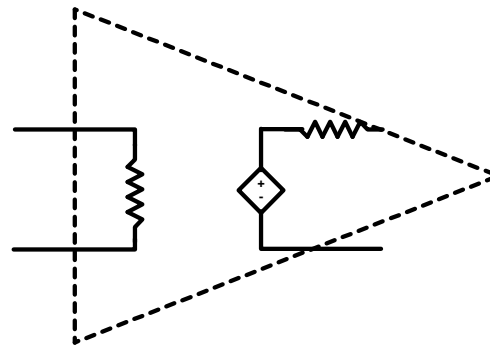
- On veut être en mesure de concevoir des amplificateurs.
- L'amplificateur opérationnel idéal:



- 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 amplificateur tension-tension, les caractéristiques idéales sont:
 - Résistance à l'entrée infinie
 - Résistance à la sortie de 0

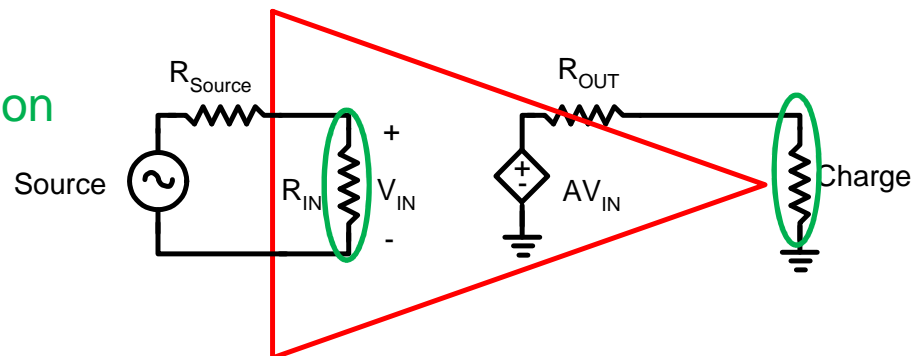


Pourquoi?

On part sur une tangente

- L'amplificateur amplifie V_{IN} et non V_{SOURCE}
 - Pour V_{IN} élevé, il faut R_{IN} élevé
 - Sinon, il y aura une grosse chute de tension à R_{SOURCE}
- À la sortie, on a un diviseur de tension
 - On veut que R_{CHARGE} soit beaucoup plus que R_{OUT}
 - Pour s'assurer de ça, il faut $R_{OUT}=0$

On veut beaucoup de tension
aux places en vert



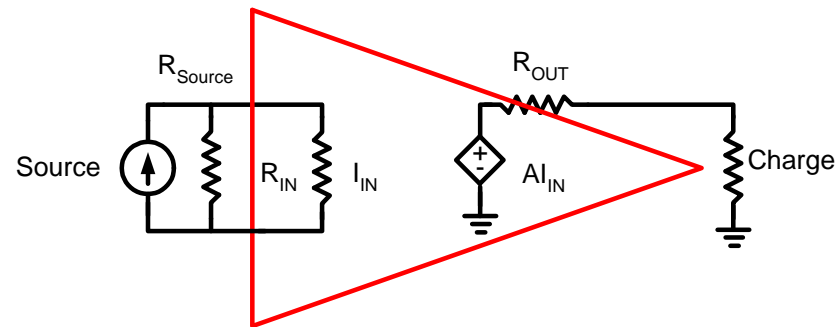
On part sur une tangente

- 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 caractéristiques différents
 - Parfois R_{IN} faible, parfois R_{IN} élevé
 - Parfois R_{OUT} faible, parfois R_{OUT} élevé

Allons voir pourquoi

On part sur une tangente

- Avec ampli tension-tension, R_{IN} est élevé
- Si le signal à amplifier était un COURANT, on aurait ce circuit:

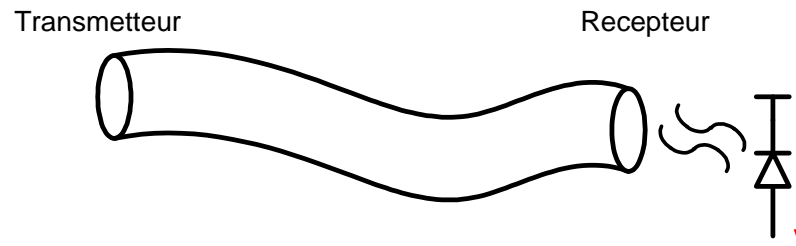


- On veut amplifier I_{IN}
- Pour maximiser I_{IN} , on veut $R_{IN}=0$

Donc, quand le signal en entrée est un courant, on veut R_{IN} faible

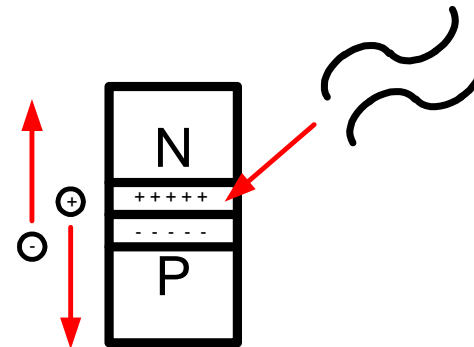
On part sur une tangente

- Les systèmes à fibres optiques utilisent des photodiodes au récepteur



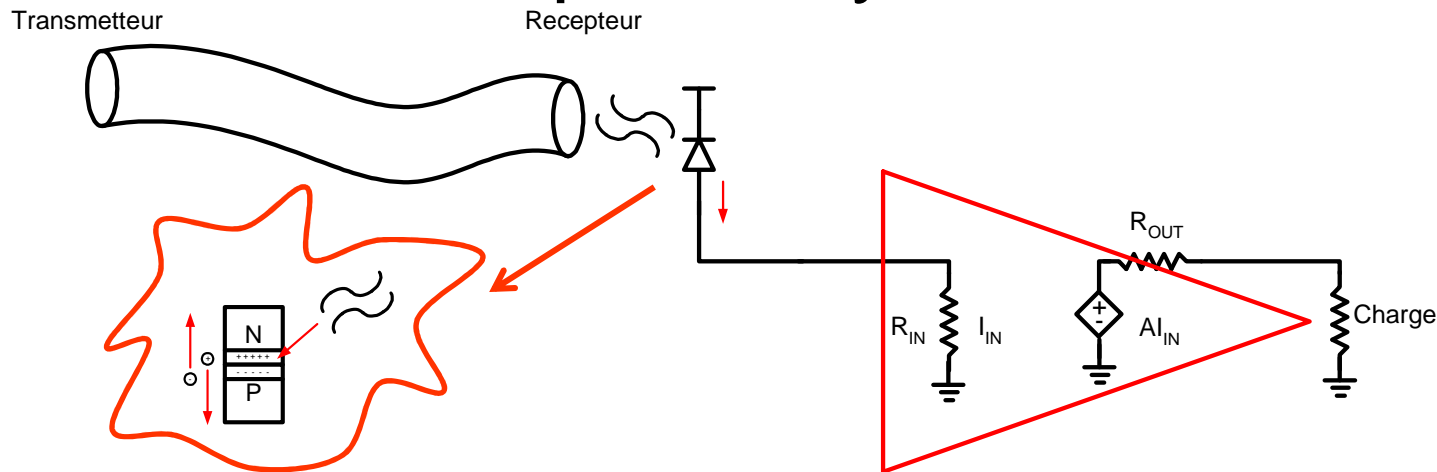
- Les photodiodes sont des diodes polarisées en inverse...

- 1) Photon frappe et donne de l'énergie
- 2) Lien électron-trou se brise
- 3) Champ électrique pousse + et -
- 4) Ça donne un courant



On part sur une tangente

- Voici un exemple de système:



- Photodiode est comme une source de courant parce que le signal est une quantité de charges
- La résistance de source est implicite

Dans ce cas-ci, on veut R_{IN} faible

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} élevé**:
 - Tout le courant se retrouverait à la charge

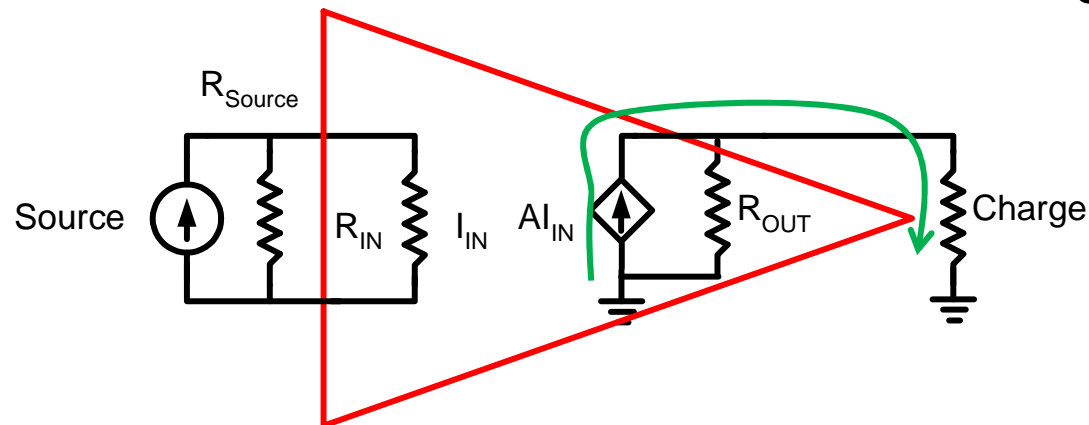


Tableau récapitulatif

- Voici un résumé des caractéristiques:

Amplificateur	R_{IN}	R_{OUT}	Exemple
V-V	Élevé	Faible	C-C
V-I	Élevé	Élevé	É-C
I-V	Faible	Faible	B-C + C-C
I-I	Faible	Élevé	B-C

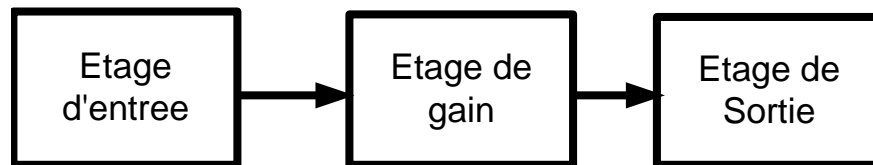
Retournons aux amplificateurs V-V

Amplificateurs de puissance

- On a parlé des configurations qui fonctionnent bien pour des signaux faibles
- À l'interne, les courants sont faibles
 - La sortie doit souvent avoir de la puissance
 - On parle donc d'étage de puissance
- Exemples d'application:
 - Commander des hauts-parleurs
 - Avoir assez de puissance pour transmission RF

Amplificateurs de puissance

- On se concentre donc sur l'étage de sortie:



Comme l'ampli à 2 étages

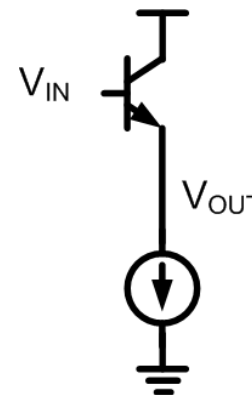
Ce qu'on voit aujourd'hui

- On va explorer 5 types:
 - Classe A
 - Classe B
 - Classe AB
 - Classe C
 - Classe D

Classe A

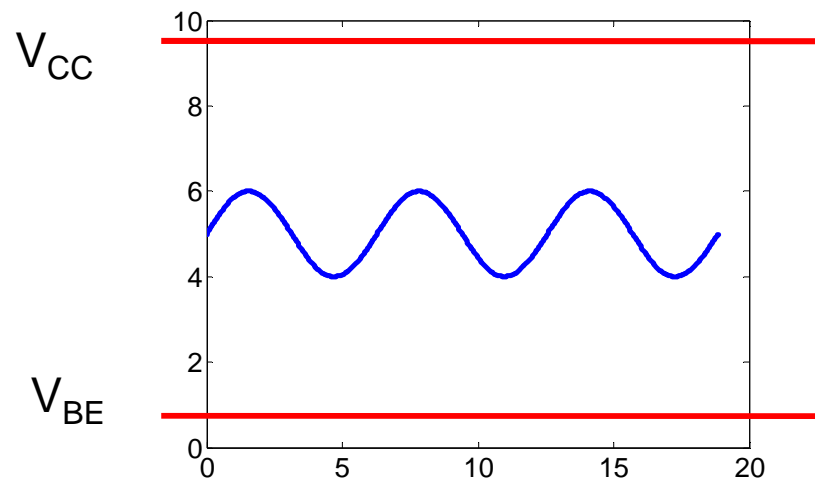
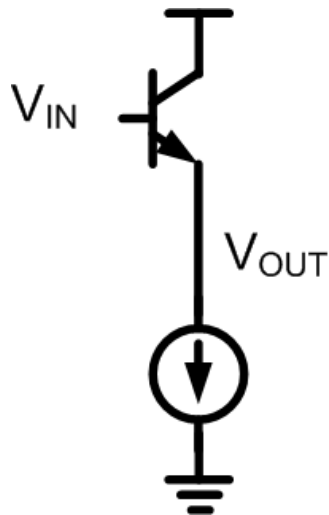
- Les amplificateurs de classe A sont des amplificateurs qui sont très linéaires
- Ils ont la particularité qu'il y aura toujours un courant dans le transistor
 - On comprend donc qu'il y a des amplificateurs qui ne conduisent pas toujours
- Exemple de classe A:

Collecteur-commun



Classe A

- Le collecteur commun conduit toujours
- L'entrée doit respecter ces conditions:
 - On reste en bas du V_{CC} (sinon, ça coupe)
 - On reste en haut de V_{BE} (sinon, il ne conduirait pas)



Classe A

- **Avantage:**
 - Simple à concevoir
 - Représente fidèlement l'entrée (linéaire)
- **Désavantage:**
 - Consommation de puissance excessive
 - Mauvaise efficacité

Classe A

- L'amplificateur conduit toujours. Il a donc, en tout temps:
 - Un courant I_C (DC) qui polarise le transistor
 - Un courant i_{SIG} provenant du signal
- Lorsqu'on transmet un signal, on consomme une puissance:
 - Une partie de cette puissance est due au signal
 - Une partie est due à la polarisation
 - La polarisation ne donne aucune "information"

Quelle proportion de la puissance est donc UTILE?

Classe A

- Nouveau mot: Efficacité de puissance

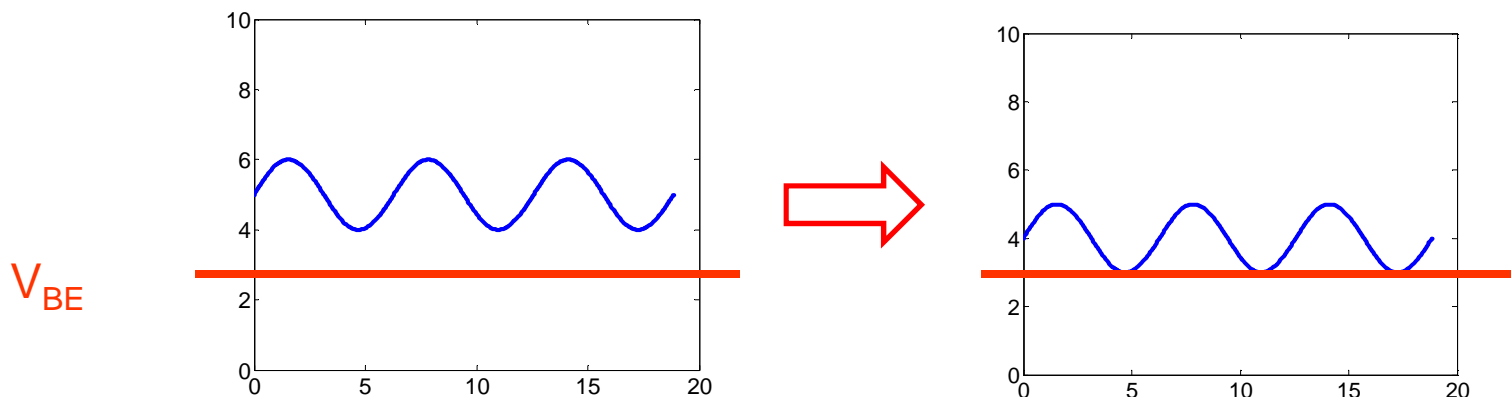
$$\eta = \frac{P_{SIG}}{P_{DC}}$$

- 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'efficacité sera de 100%

Allons calculer l'efficacité de notre classe A

Classe A

- Pour 100% efficacité, il faudrait que toute la puissance dissipée soit due au signal
 - Il faudrait donc que $P_{DC} = P_{SIG}$
- La tension DC à l'entrée devrait être faible
 - Ça limite le courant de sortie



Meilleur cas pour classe A

Classe A

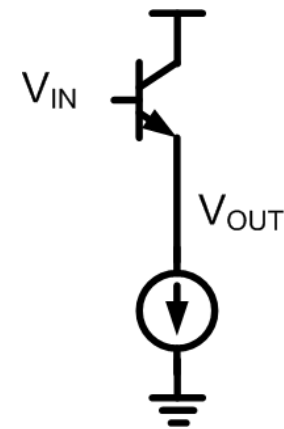
- La tension DC ne contribue pas au signal
 - Quand le BAS de la courbe touche V_{BE} , on est le plus efficace (classe A)

- On sait que l'efficacité est:

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

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

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



Passons maintenant au signal

Classe A

- Dans le cas général, on a un signal sinusoïdal.
- On peut trouver la puissance avec une conversion en RMS...

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

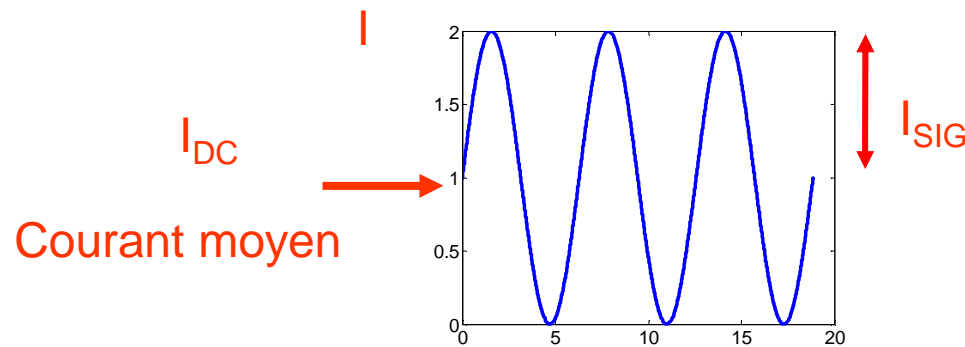
- L'efficacité devient:

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

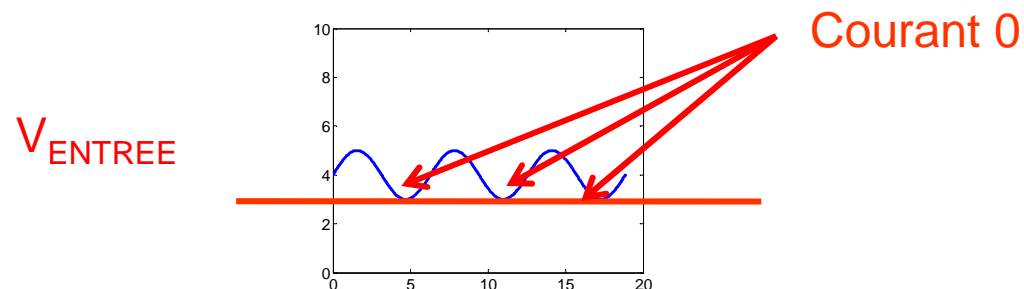
Équation générale... essayons de simplifier

Classe A

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

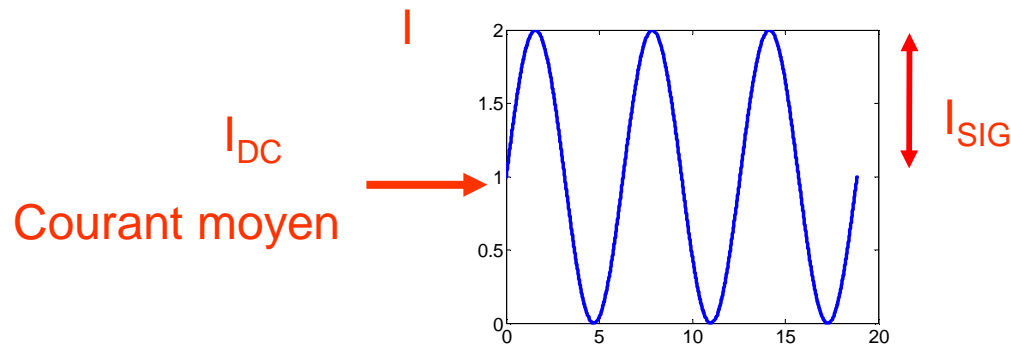


- Pour la meilleure efficacité, le courant tombe à 0 périodiquement



Classe A

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



- On peut donc simplifier l'équation:

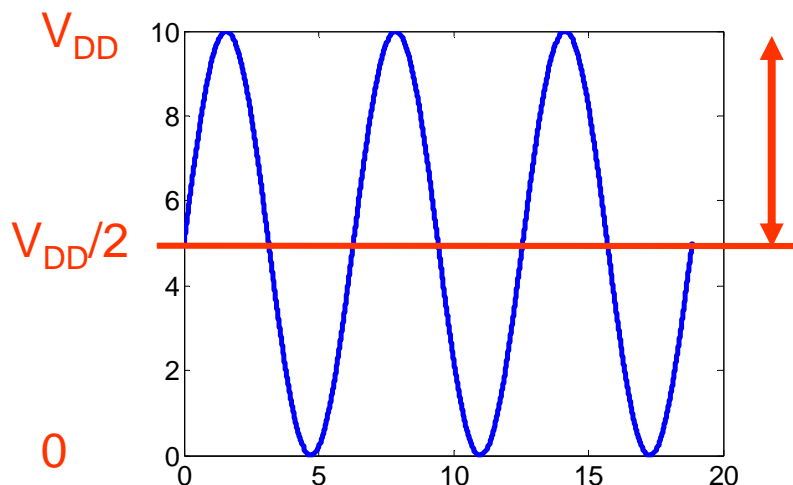
$$\eta = \frac{\left(\frac{I_{SIG} \cdot V_{SIG}}{2} \right)}{I_{DC} \cdot V_{DD}} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{\left(\frac{I_{DC} \cdot V_{SIG}}{2} \right)}{I_{DC} \cdot V_{DD}} = \frac{V_{SIG}}{2 \cdot V_{DD}}$$

Peut-on simplifier encore plus?

Classe A

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

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



On substitue!

Classe A

- En réalite, V_{SIG} n'est pas $VDD/2$ puisque la plage n'est pas 0 a VDD
 - Ça va de V_{BE} à VDD à l'entrée (trop compliqué!)

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

$$\eta = \frac{V_{SIG}}{2 \cdot VDD} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{\frac{VDD}{2}}{2 \cdot VDD} = \frac{1}{4} = 25\%$$

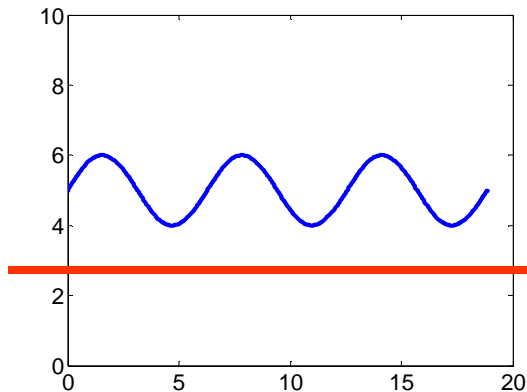
- En pratique, on s'attend à 10-15%
- Le $\frac{3}{4}$ de ma puissance est "inutile"!

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

Classe A

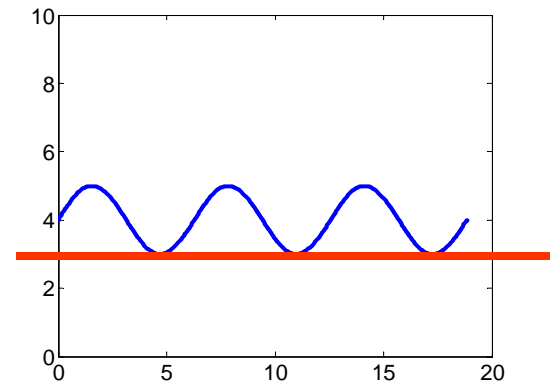
- Dans l'ampli de classe A, le signal pouvait être entre V_{BE} et V_{DD}
 - Raison, il fallait **toujours** que ça conduise

V_{DD}



Typique

V_{TH}

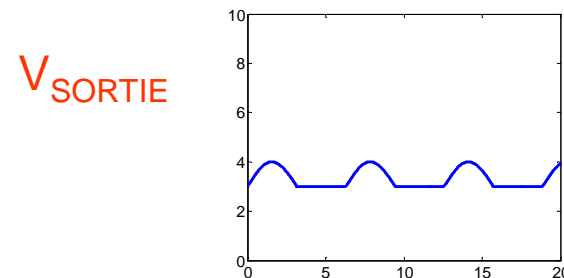
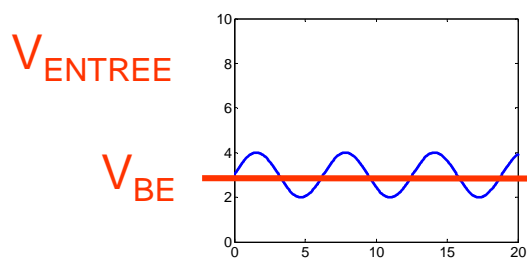


Limite

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

Classe B

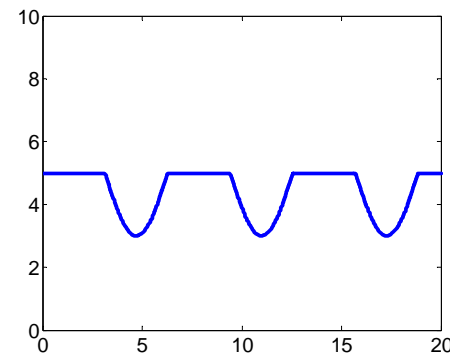
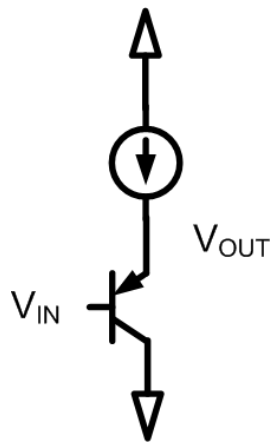
- En baissant V_{DC} , le transistor cesse de conduire durant une partie de la période
- Par exemple, mettons V_{DC} à V_{BE} :
 - En appliquant un sinus, on voit que:
 - 1) Durant la partie positive, le transistor conduit
 - 2) Durant la partie négative, le transistor ne conduit pas



Le signal n'est pas très beau...

Classe B

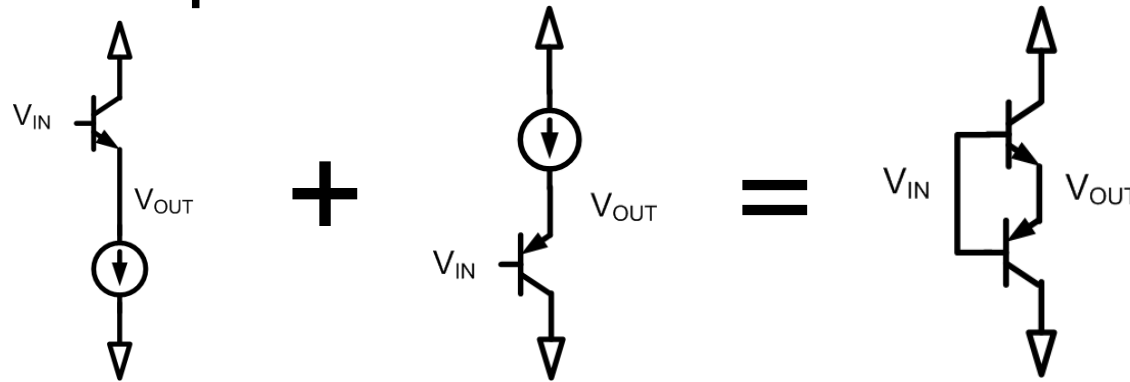
- Il existe aussi l'émetteur commun avec PNP:
 - On pourrait aussi le polariser pour opérer durant la moitié du cycle:



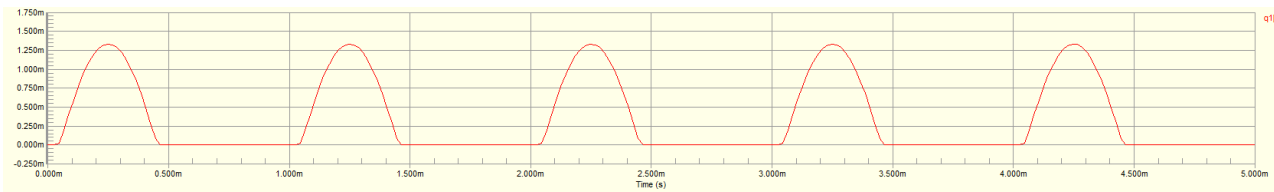
NPN et PNP semblent être complémentaires...

Classe B

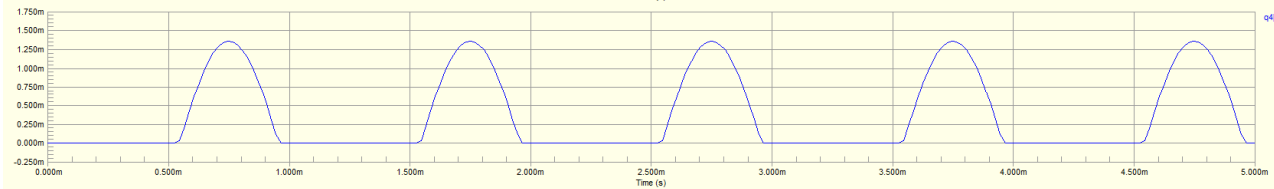
- Ce serait possible de combiner les 2:



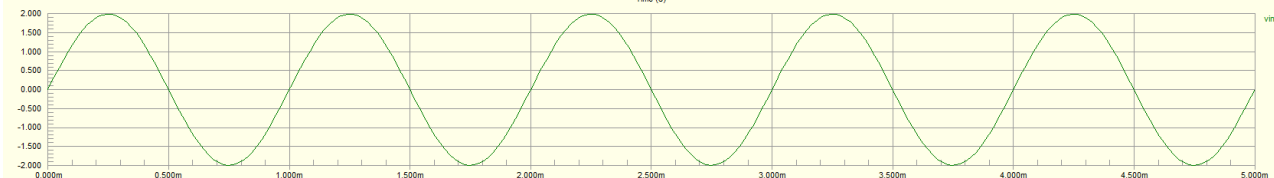
I_{C-NPN}



I_{C-PNP}



V_{IN}



Classe B

- On appelle ça un amplificateur de classe B
- Caractéristique principale:
 - Chaque transistor opère pendant ~50% du temps
- On appelle ça aussi une configuration “push-pull”:
 - Le NPN fournit du courant à la sortie (push)
 - La PNP tire du courant de la sortie (pull)
- Les transistors devraient être appariés

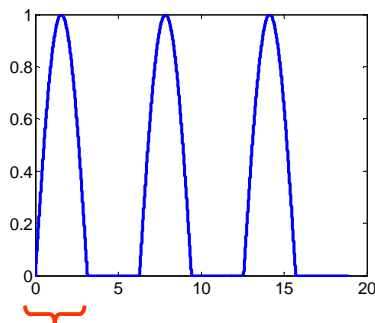
Classe B

- L'efficacité est donnée par:

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

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

Courant



Demi-période

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

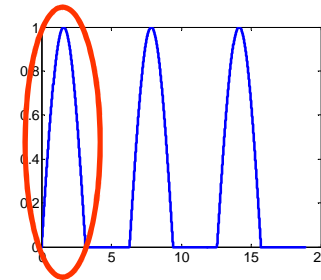
Même équation que tantôt sauf que ce n'est valide que pour $T/2$

Passons à 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'intégrale (résultat intermédiaire)

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

Classe B

- Sachant que:

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

- On pourrait ré-écrire l'équation:

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

- Après simplification, ça devient:

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

Avec le courant, on peut trouver la puissance

Classe B

- La puissance DC est donnée par:

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

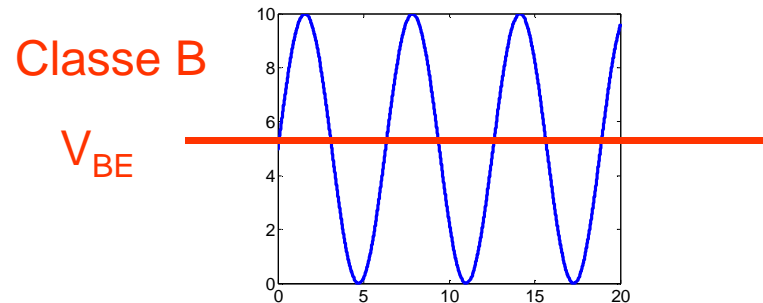
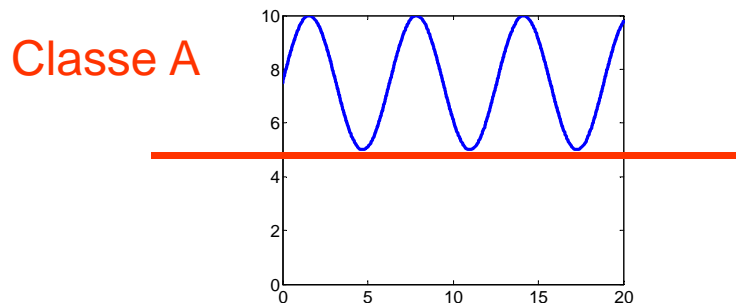
- L'efficacité devient:

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

Allons voir V_{SIG} !

Classe B

- Contrairement à la classe A, V_{SIG} maximal de classe B est 2 fois plus gros:
- Imaginons un V_{BE} 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} maximal est égal à VDD

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

- L'efficacité maximale serait donc:

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

Rappel: Classe A a une efficacité de 25%

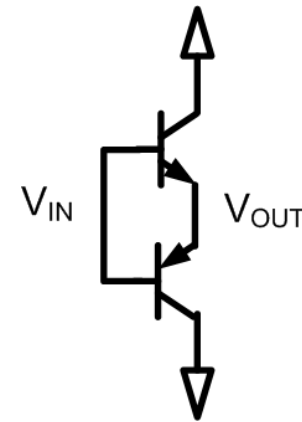
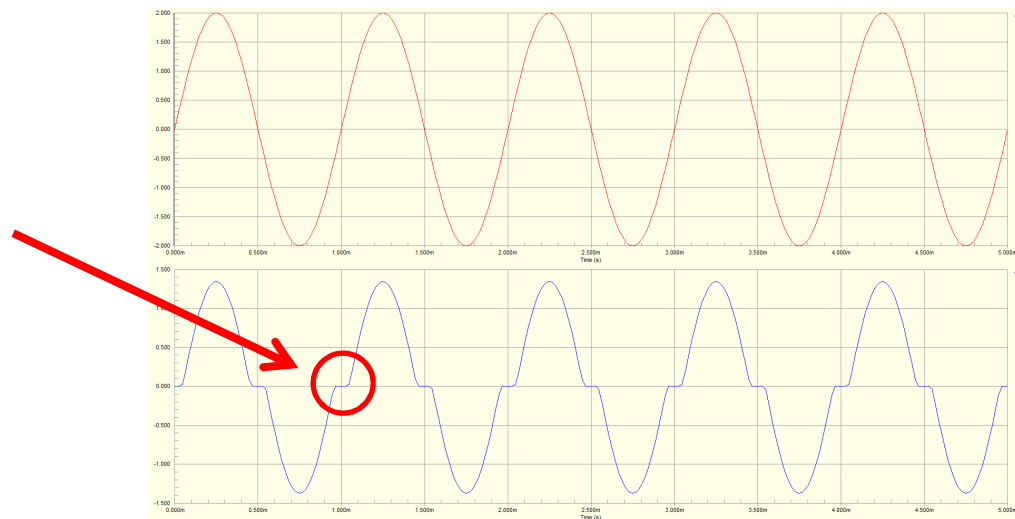
Classe B

- L'analyse précédente ne considère QU'UN SEUL transistor
- Avec les 2 transistors, les résultats sont semblables
 - L'autre demi période aura la même efficacité
- Efficacité est 3 fois celle de la classe A
 - Est-ce qu'il a des lacunes?

Classe B

- Simulation d'un amplificateur de classe B

Distortion de commutation (cross-over)



- Autour du milieu, aucun des transistors ne conduit

$$V_B = V_E \Rightarrow V_{BE} \approx 0$$

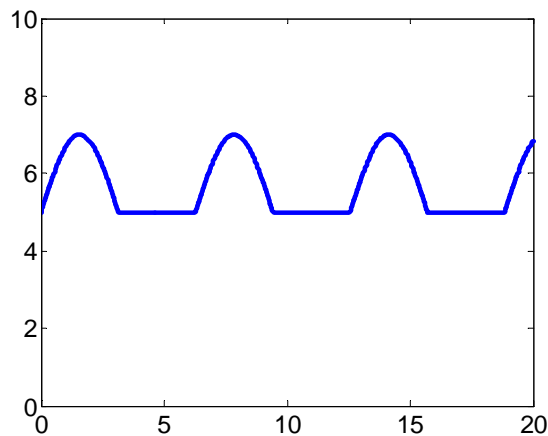
Le signal n'est pas aussi beau (linéaire) qu'avec classe A...

Classe AB

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

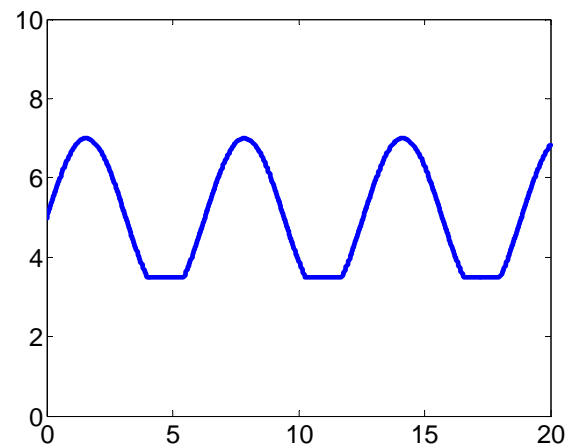
Classe AB

- Il y a la classe AB
- Dans la classe AB, les amplificateurs conduisent entre 50% et 100% du temps



50%

vs



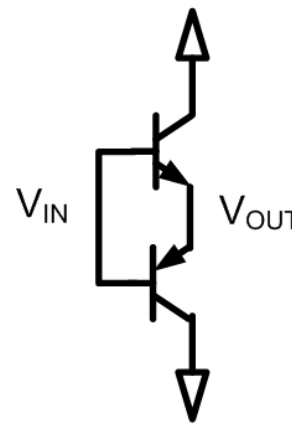
Plus que 50%

% de conduction est entre classe A et B

Classe AB

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

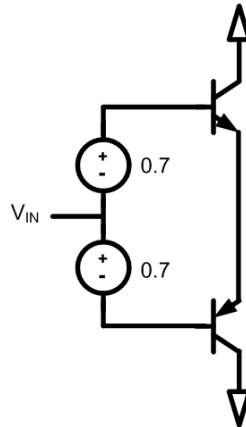
Le problème était que, autour de 0, aucun des transistors ne conduit



Comment résoudre ça?

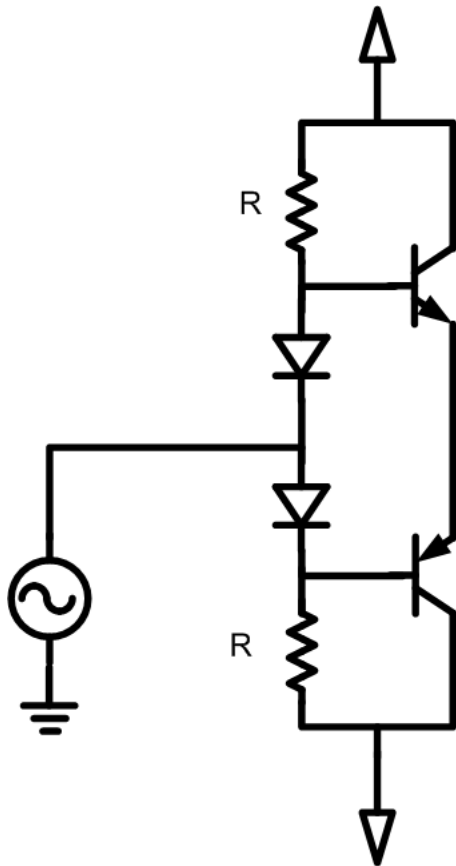
Classe AB

- Aucun transistor ne conduit parce que V_{BE} n'est pas assez grand
- Solution: Quand la sortie ~ 0
 - Donner au NPN un V_{BE} de 0.7 (ou plus)
 - Donner au PNP un V_{EB} de 0.7 (ou plus)
- Conceptuellement, on pourrait avoir ceci:



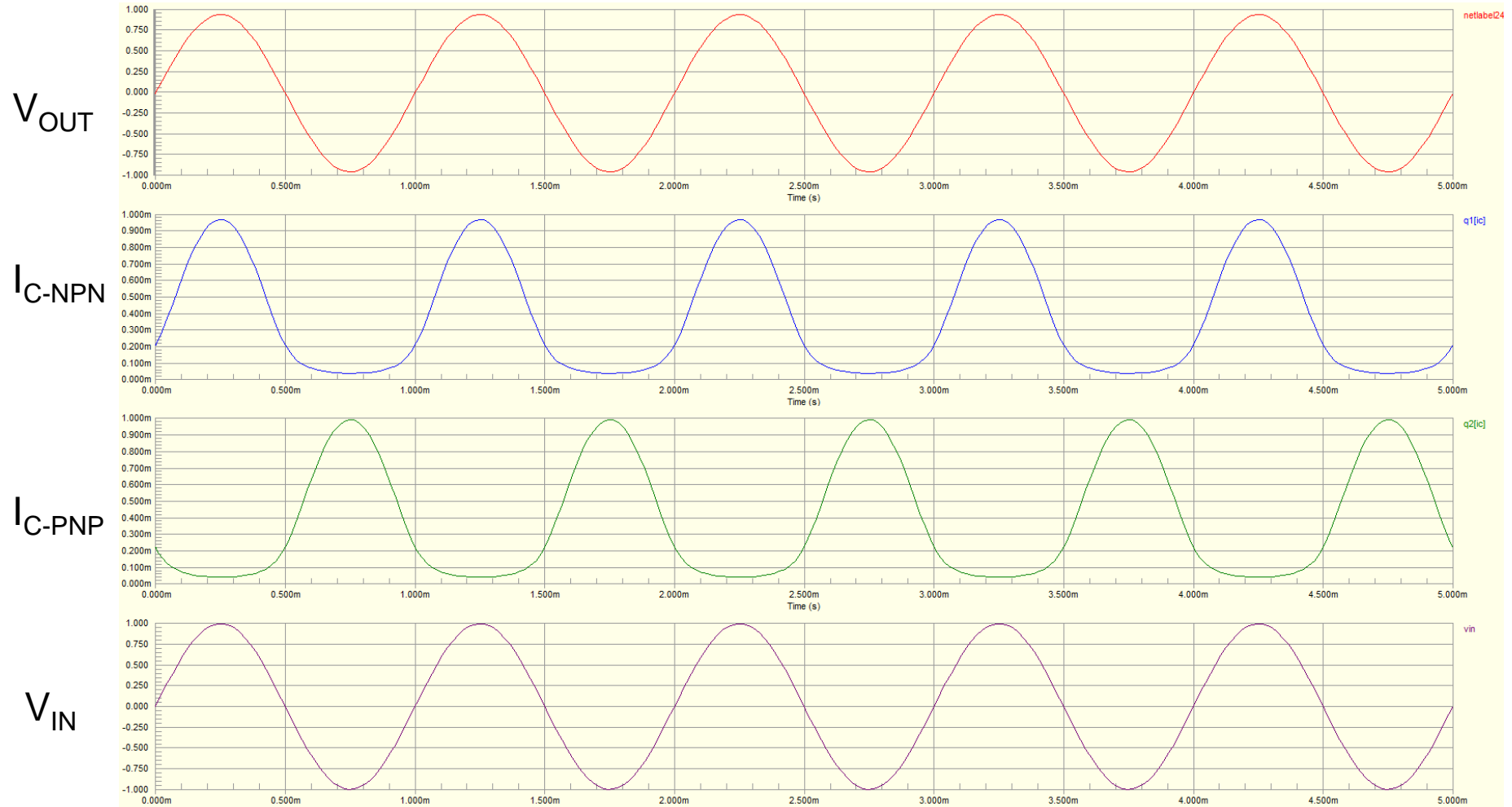
Classe AB

- En pratique, on pourrait penser à ceci:



1. Diodes en conduction cause une chute de 0.7v
2. Pour être en conduction, on a les résistances
3. Résistances calculées en fonction de la puissance requise à la sortie

Classe AB

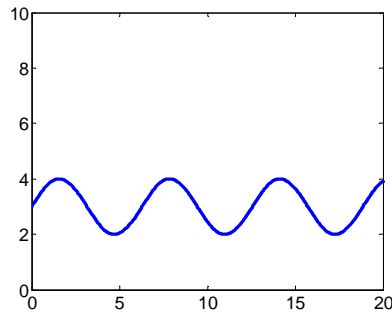


Classe AB

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

Classe C

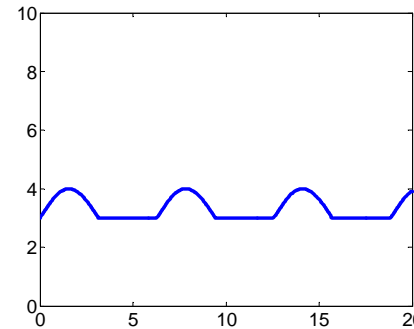
- Il est possible de conduire moins de 50%
 - Ça va nous donner une solution plus efficace
 - Ça va aussi causer plus de distortion.



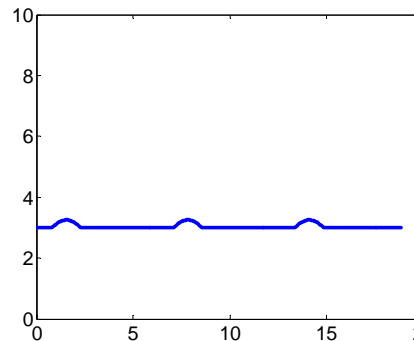
Entrée



50%
conduction

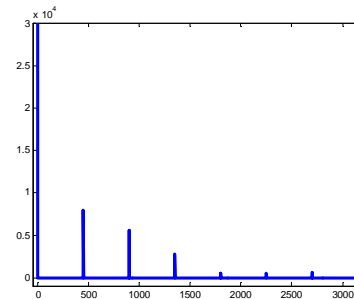
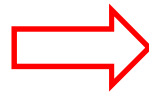
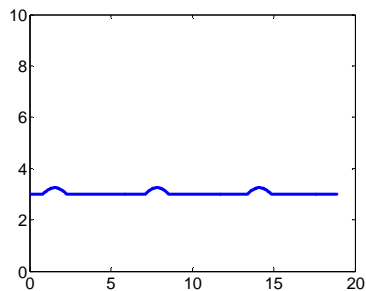


Moins de 50%
conduction



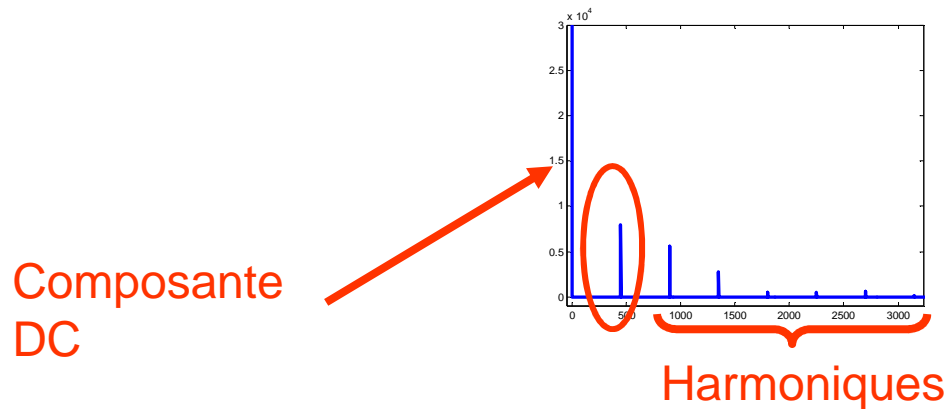
Classe C

- Ça s'appelle: amplificateur classe C.
- Il y a une non-linéarité marquée
 - Même avec 2 transistors, on n'aurait pas le signal initial
- Il faudrait “reconstruire” le signal
 - Comment?
- Commençons par une analyse de Fourier



Classe C

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



- Il faudrait enlever le DC
- Il faudrait enlever les harmoniques

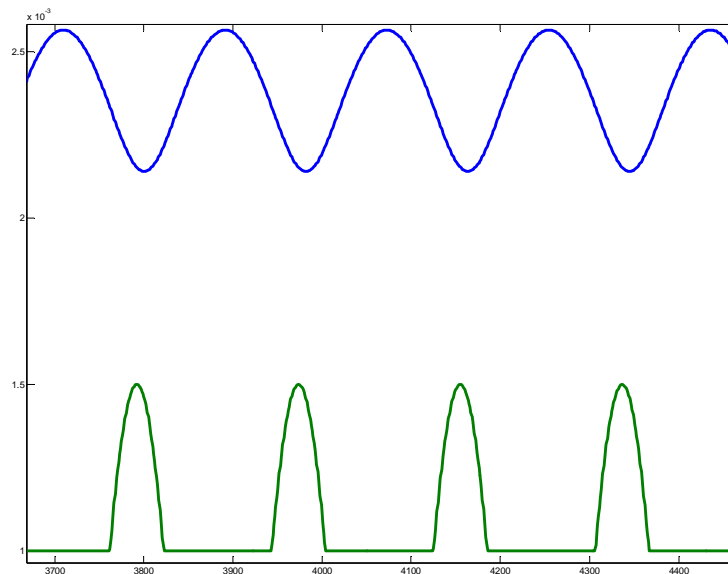
Filtre passe bande (circuit résonant)

Classe C

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

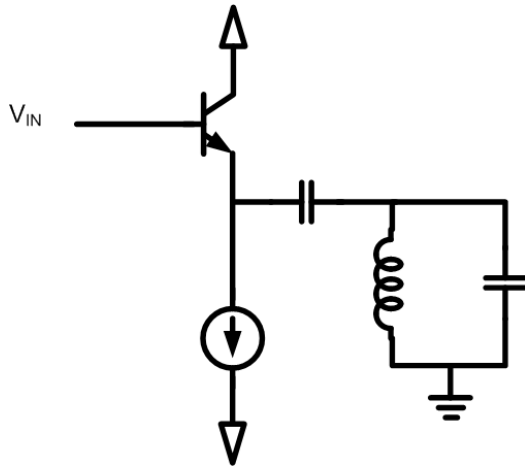
Après filtre

Signal en entrée



Classe C

- À la base, on pourrait penser à un circuit comme celui-ci:

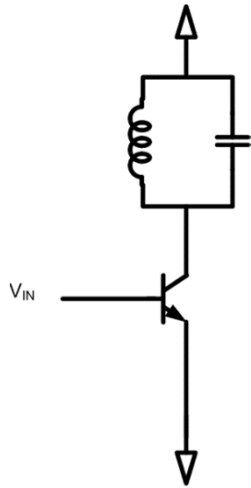


Émetteur commun avec
un circuit résonant

- Problème: le gain!
 - Avec moins de 50% conduction, le signal est petit

Classe C

- On voudrait un gain: émetteur commun?

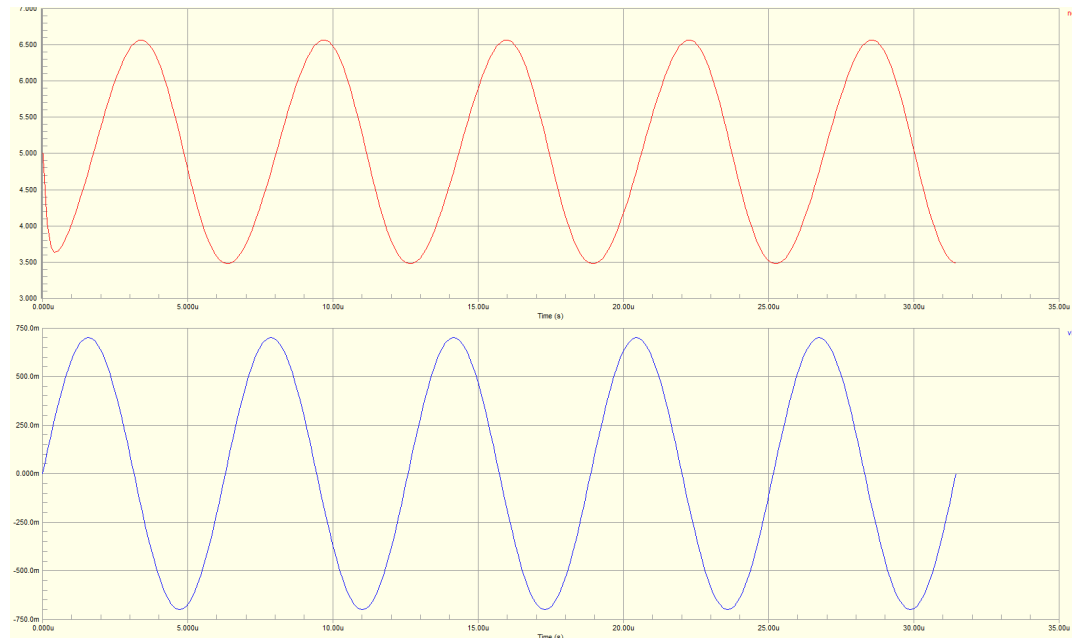
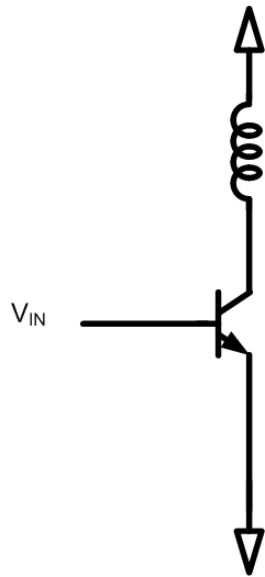


Ça fonctionne...

- Mais il existe une meilleure façon..

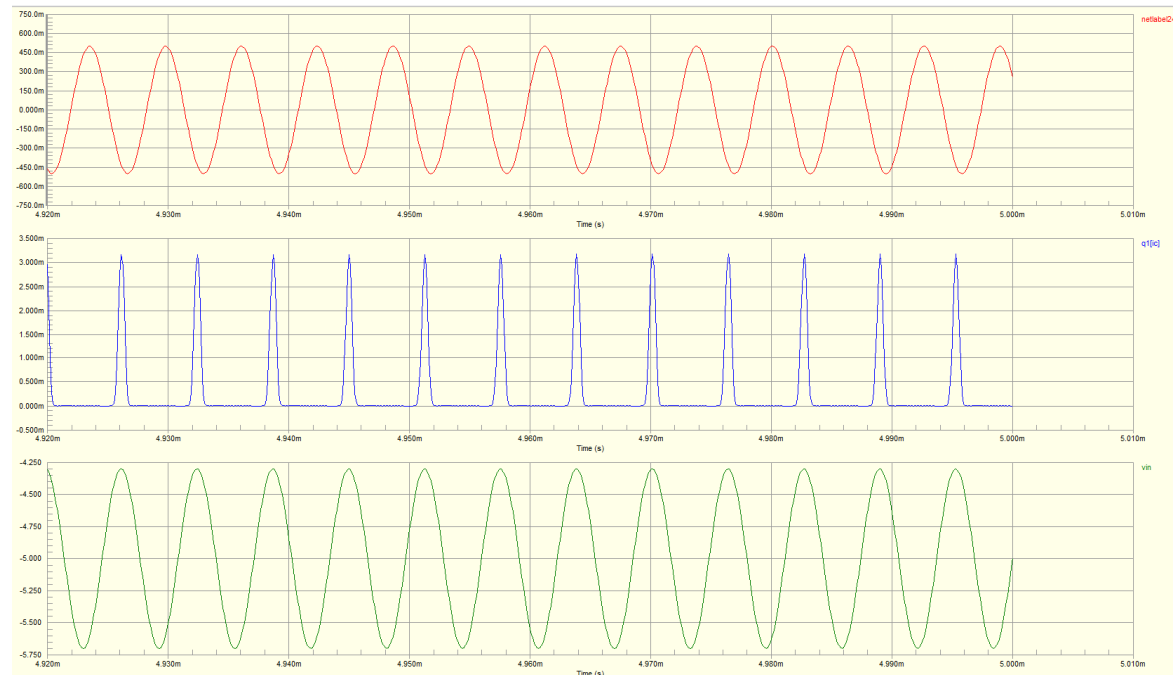
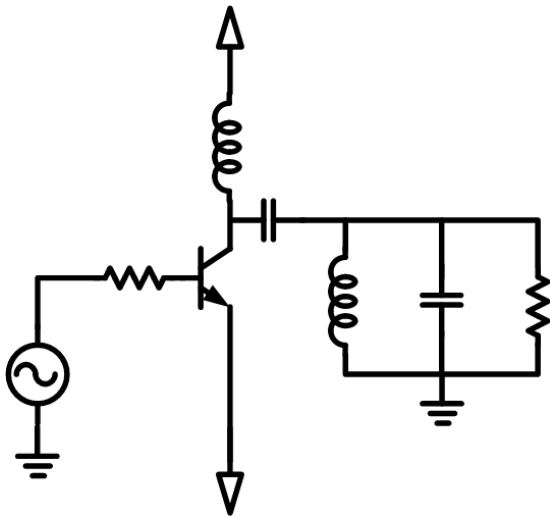
Classe C

- En ayant ceci, on a:
 - Un gain qui dépend de la fréquence (gros gain)
 - Une oscillation AUTOUR de VDD
 - Notre signal peut être beaucoup plus gros...



Classe C

- Maintenant, j'ajoute un circuit résonant:



Type de circuit populaire en transmission radio...

Classe C

- L'équation de l'efficacité ne sera pas dérivée (trop compliqué – 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 où ça conduit.
- Quand ϕ tend vers 0 (théorème de Hospital), l'efficacité tend vers 100%

Resumé

- Voici un résumé des caractéristiques

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

Classe D

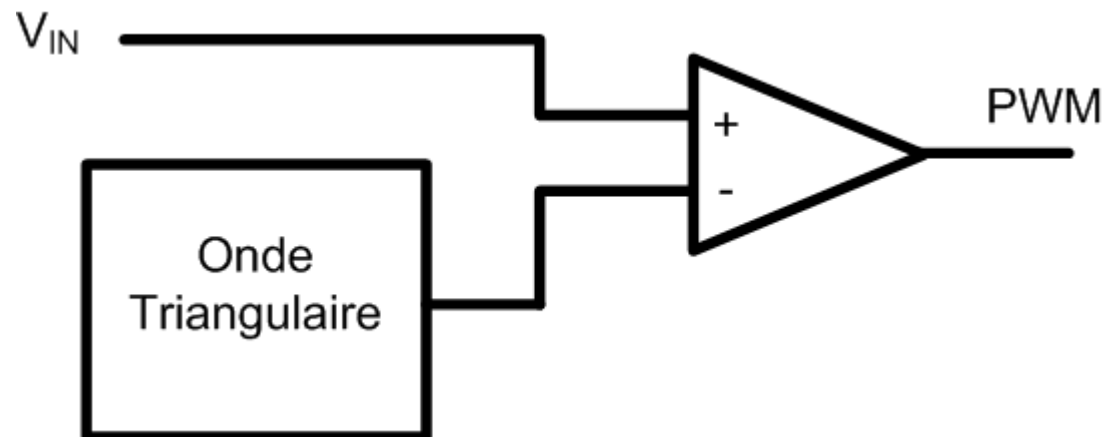
- Les amplificateurs de classe D sont différents des autres:
 - Ils fonctionnent par commutation
 - Les transistors vont conduire pleinement ou pas du tout
 - Ça réduit la puissance gaspillée sur la polarisation
- Type d'amplificateur souvent utilisé dans les systèmes audio communs...

Classe D

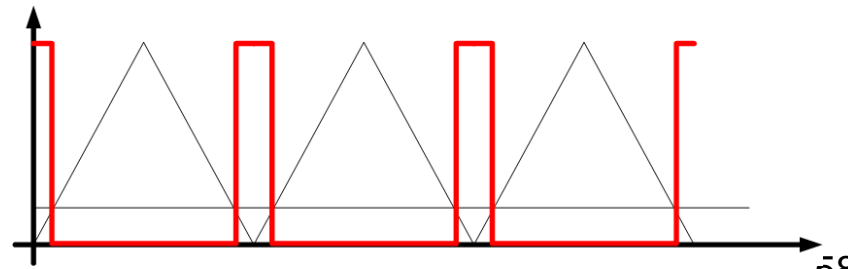
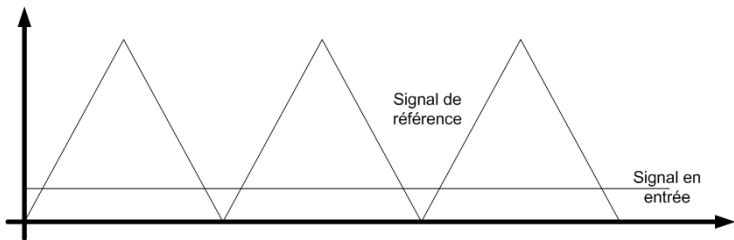
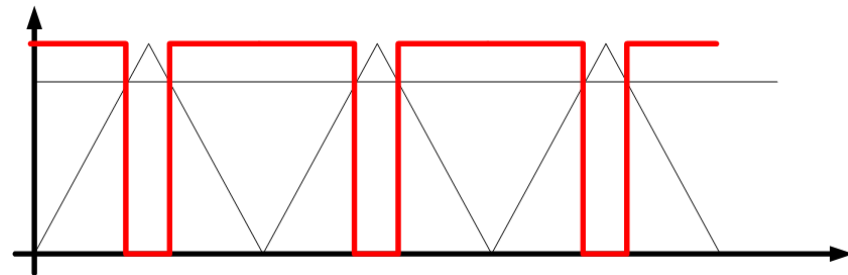
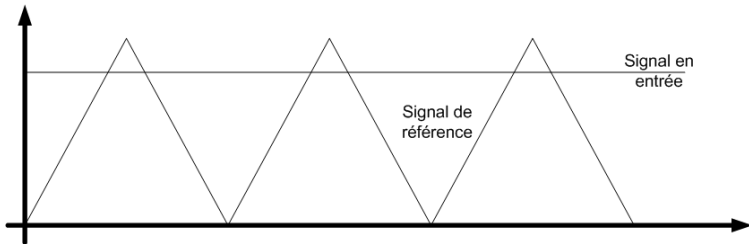
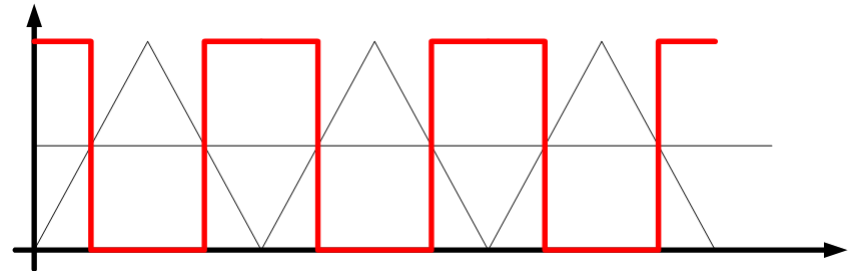
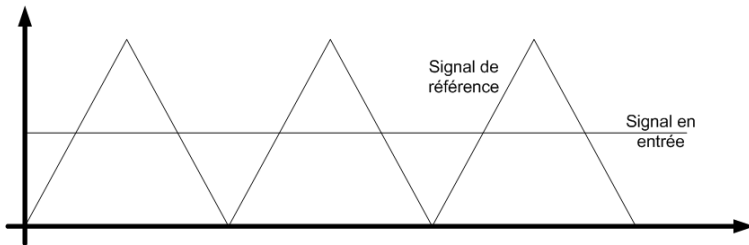
- On convertit le signal en entrée en pulsations de 0/1
 - Plus le voltage est élevé, plus les pulsations auront des 1
 - Plus le voltage est faible, moins les pulsations auront des 1
- C'est de la modulation à largeur d'impulsion:
 - Pulse width modulation (PWM)

Classe D

- Comment y arriver?
- On a besoin de:
 - Onde triangulaire (rapide)
 - Comparateur (ou ampli-op)

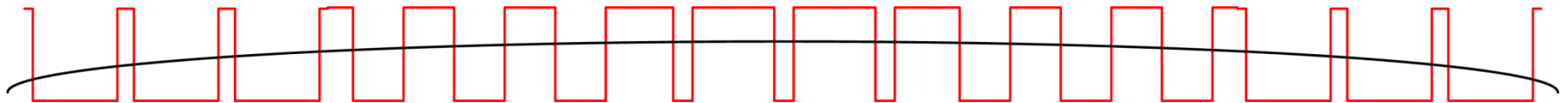


Classe D



Classe D

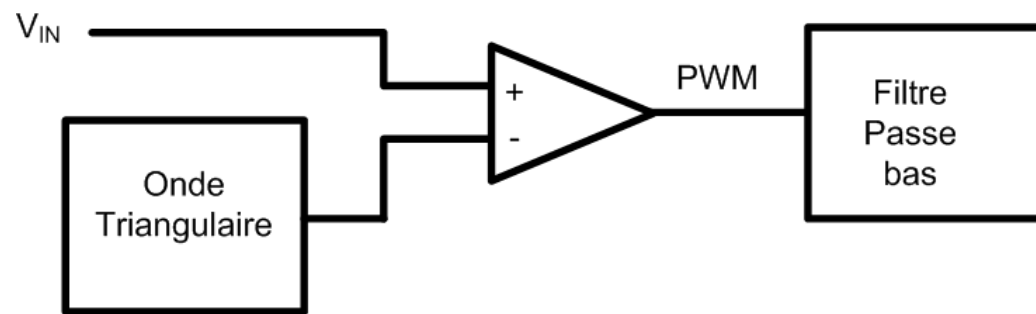
- Dans le cas d'un signal qui varie, on obtiendrait ceci:



- La sortie ne ressemble pas au signal V_{IN}
- Il faut extraire la MOYENNE de ce signal:
 - La composante a_0 de la série de Fourier
 - Il faut un filtre passe bas!

Classe D

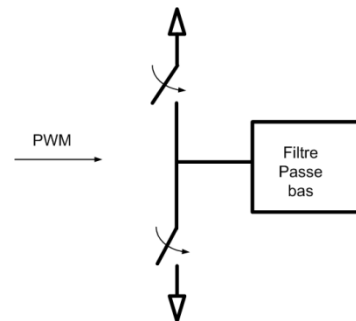
- Ça donnerait ceci:



- Par contre, ça manque de puissance!
- Il faudrait avoir un étage de puissance après le PWM...

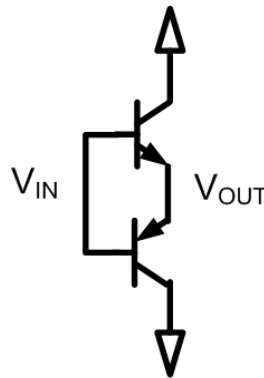
Classe D

- Idéalement, le PWM contrôlerait des commutateurs:
 - Quand c'est '1', ça fournit un gros courant
 - Quand c'est '0', ça tire un gros courant
- Un commutateur fournit un gros courant, mais la tension est 0:
 - Aucune puissance dissipée
 - Très efficace



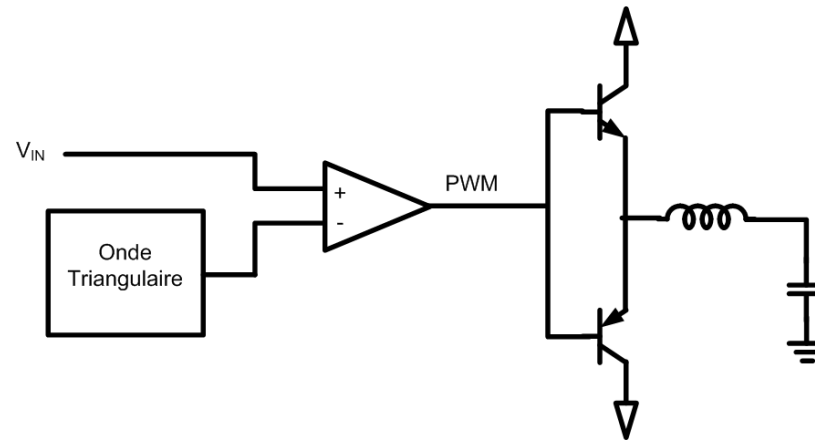
Classe D

- C'est typiquement fait avec des transistors MOS
 - Très bons pour la commutation
- Pour les buts de notre cours, on fait l'équivalent avec BJT:
 - Malheureusement, V_{CESAT} n'est pas 0...
 - Donc, il y a une puissance dissipée



Classe D

- Au final, le circuit ressemble à ceci:



Classe D

