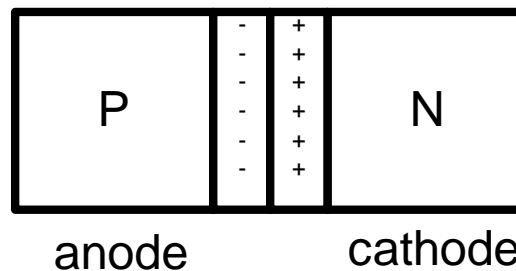


Électronique

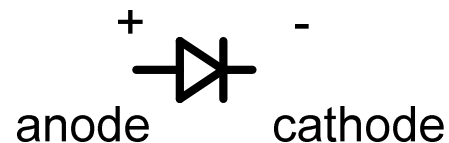
Cours 3: Les diodes

Structure

- La structure physique d'une diode:

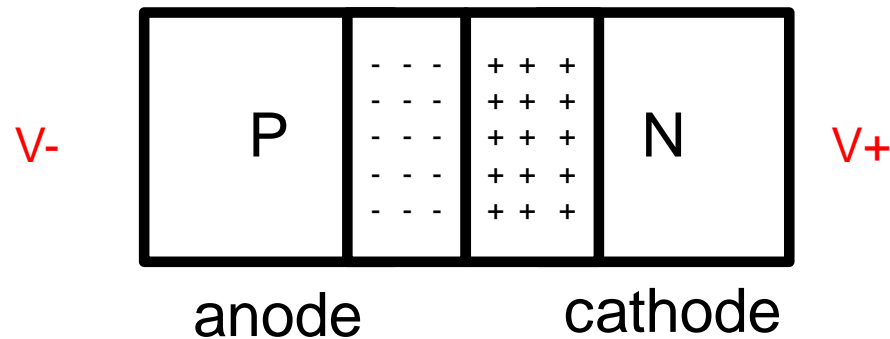


- Pour les représenter dans les circuits, on utilise le symbole suivant



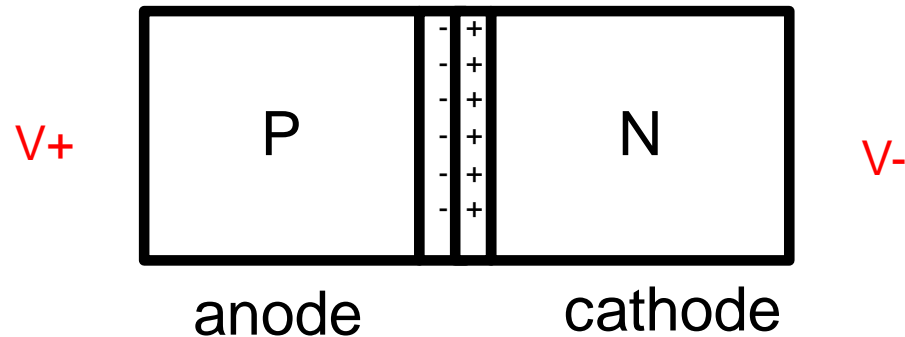
Structure

- Quand on applique une tension V :



La région charge-espace grossit:
Très faible courant passe (drift)

On estime que le courant est 0



La région charge-espace rapetisse:
courant de diffusion passe

La diode semble être une structure uni-directionnelle

Modélisation

- Pour analyser son comportement, nous avons 2 options:
 - Utiliser l'équation exponentielle $I_D = I_S \left(e^{V_D/V_{TH}} - 1 \right)$
 - Modéliser son comportement
- On va s'attarder sur les détails au prochain cours:
 - Aujourd'hui, on apprend le comportement le plus simple: le modèle idéal
 - Ça va nous donner un meilleur aperçu

Diode: modèle idéal

- Nous savons que le courant circule quand il y a $V+$ à l'anode et $V-$ à la cathode:

- Un très grand courant peut circuler
- C'est comme un COURT-CIRCUIT



- On sait qu'aucun courant ne circule quand $V+$ est à la cathode et $V-$ à l'anode:

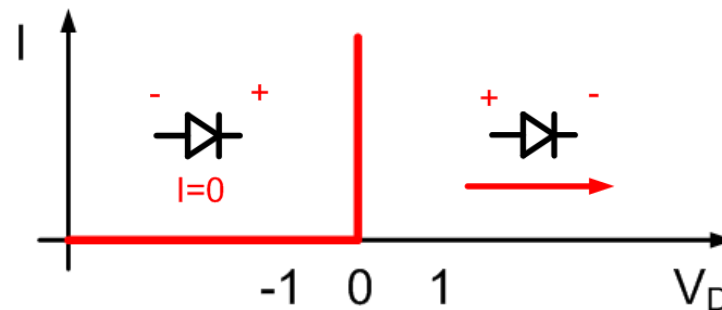
- C'est comme un circuit ouvert



Ça s'appelle aussi le "modèle ON-OFF sans chute de tension"

On-Off sans chute de tension

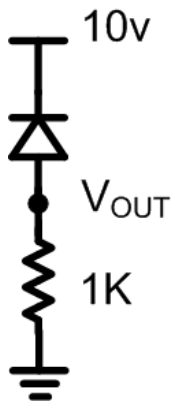
- Le modèle on-off sans chute:
 - Plus rapide
 - Moins précis
- C'est utile pour l'analyse rapide de circuits
 - V_D c'est le voltage entre l'anode et la cathode



$$V_D = V_{ANODE} - V_{CATHODE}$$

Exemple

- Dans chaque cas:
 - Donnez la valeur de V_{OUT}
 - Donnez le courant qui circule dans la branche



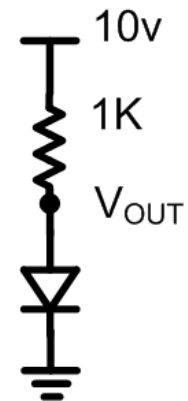
a)



b)



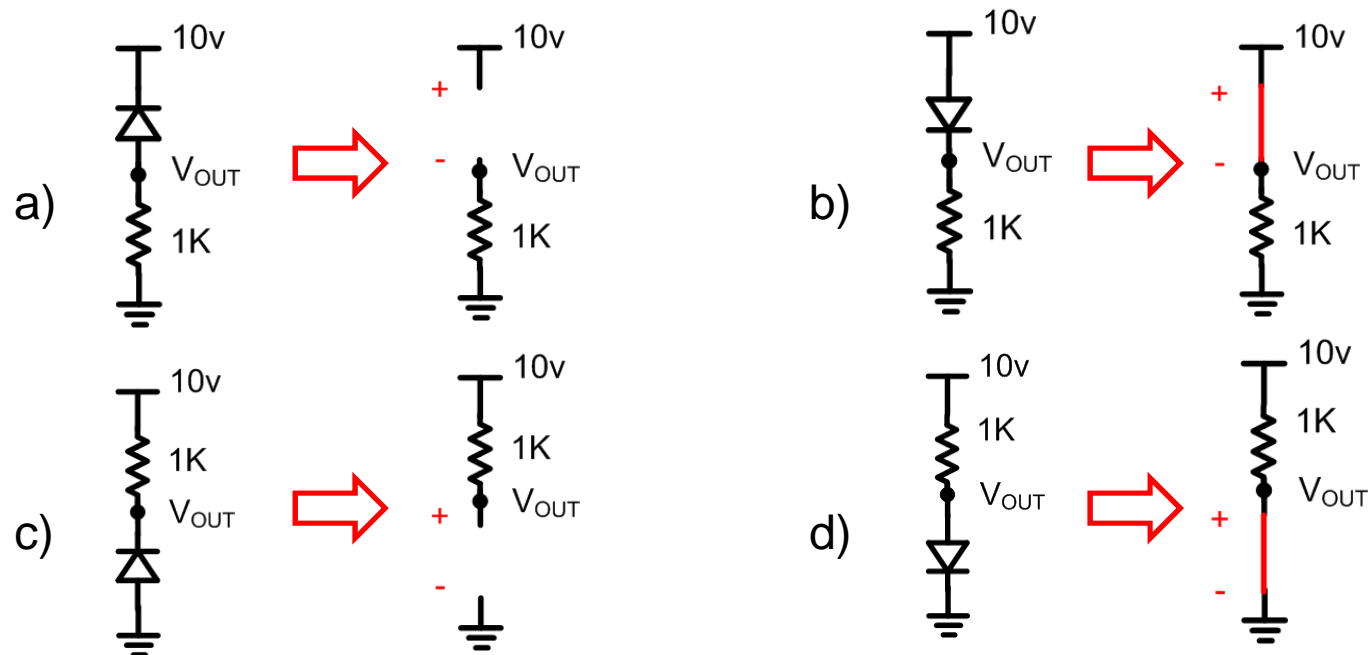
c)



d)

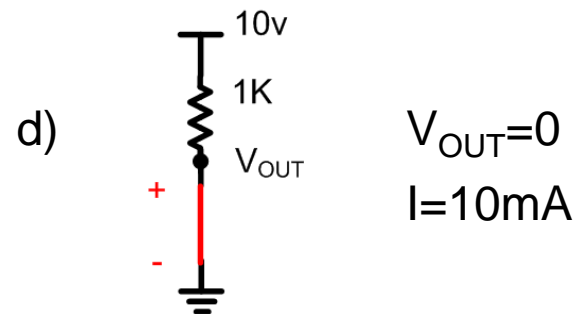
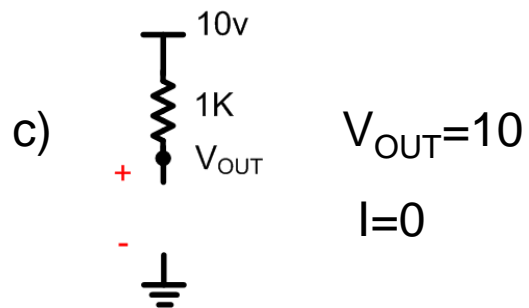
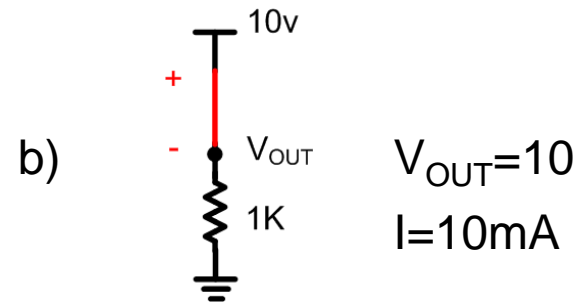
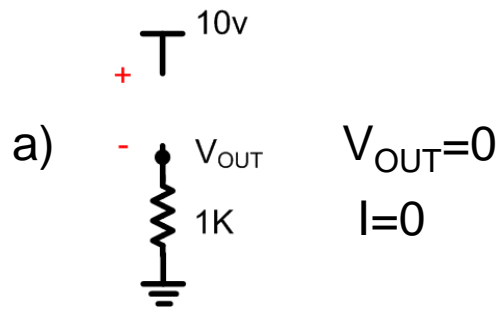
Exemple

- On met les tensions relatives aux bornes des diodes:
 - Quand V_D est positif, on a un court circuit
 - Quand V_D est négatif ou nul, on a circuit ouvert



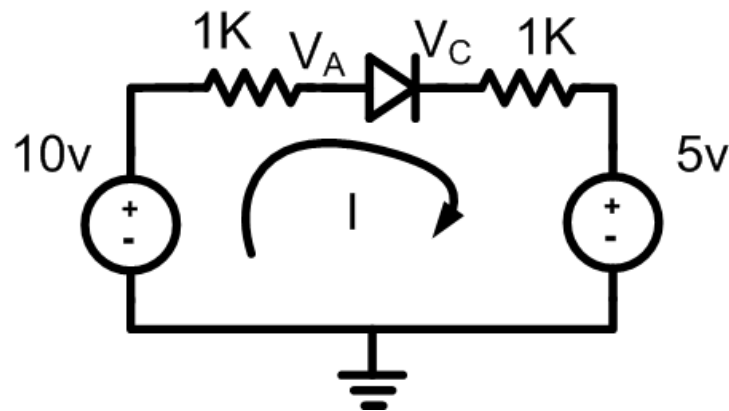
Exemple

- On met les tensions et le courant se calcule:



Exemple (seul)

- Analysez le circuit suivant pour trouver:
 - Les tensions V_A et V_C
 - Le courant I



Exemple (seul)

- En regardant le circuit, on dirait que V_A est plus grand que V_C :
 - V_D est positif



- Le courant sera:

$$I = \frac{10 - 5}{2K} = 2.5mA$$

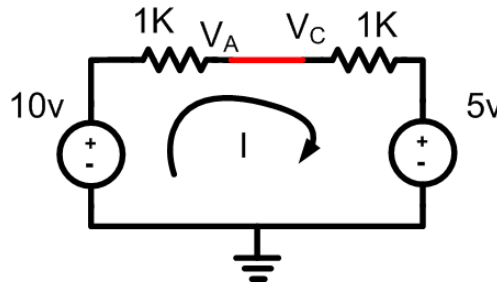
Exemple (seul)

- Les 2 chutes de tensions seront:

$$\Delta V = 2.5mA \cdot 1K = 2.5v$$

- Donc, de 10v à V_A (et de V_A à V_C), il y a chute de 2.5v:

- $V_A = V_C = 7.5v$
- On vérifie... la chute entre V_A/V_C et 5v devrait être de 2.5v aussi...
- $7.5 - 2.5 = 5$: C'est confirmé

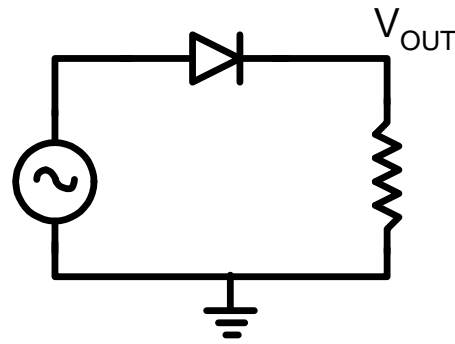


Signaux variables

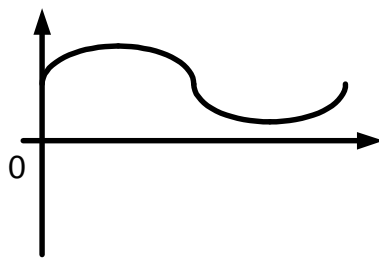
- Avec des voltages stables, c'est simple
- Avec des voltages qui fluctuent, c'est différent
 - En considérant des signaux qui varient, il faut identifier quand les conditions changent
 - Par exemple, le signal peut parfois mettre V_D positif et parfois le mettre négatif
- On doit identifier ces points avant de faire l'analyse

Exemple

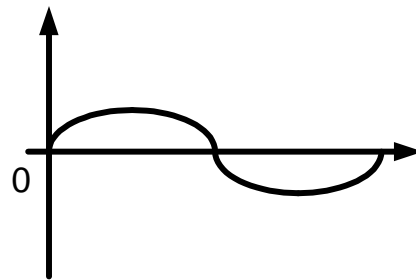
- Considérez ce circuit:



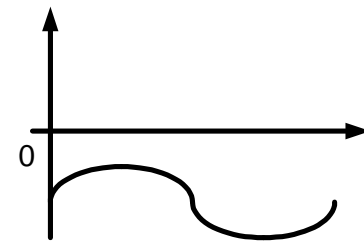
- Trouvez V_{OUT} pour les entrées suivantes:



a)



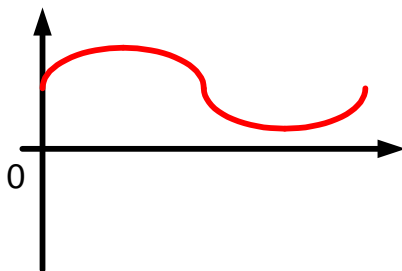
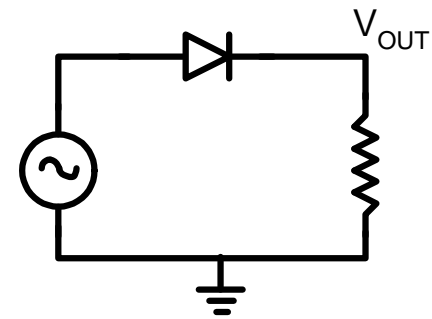
b)



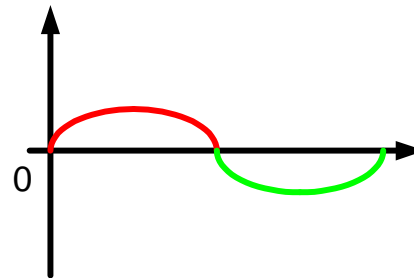
c)

Exemple

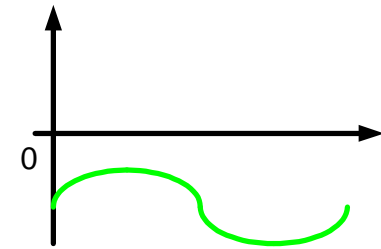
- Il faut identifier quand la diode conduit et quand elle ne conduit pas
 - Selon le circuit, $V > 0$ à l'anode suffit pour conduire
- Dans les figures suivantes:
 - Rouge: Ça conduit
 - Vert: Ça ne conduit pas



a)



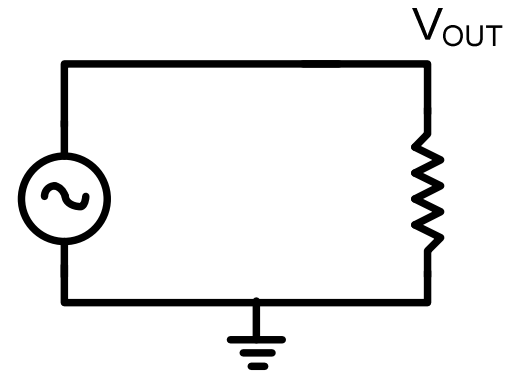
b)



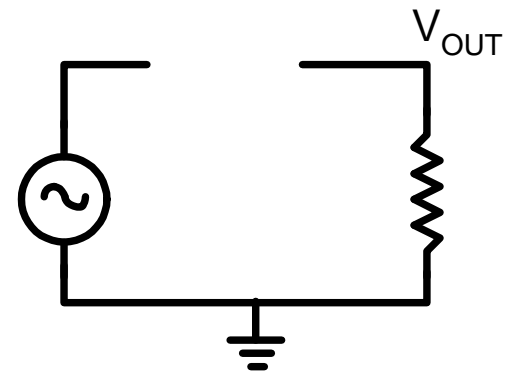
c)

Exemple

- Quand ça conduit:
 - Diode devient un court-circuit
 - $V_{OUT} = V_{SOURCE}$

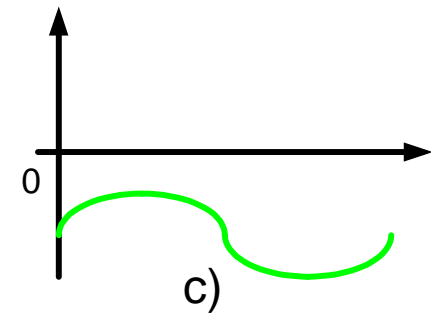
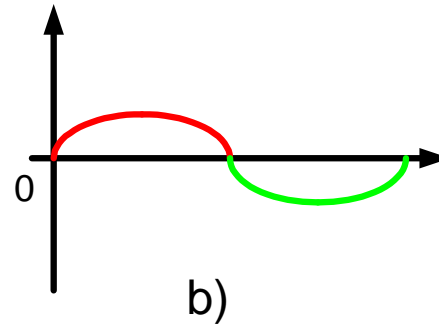
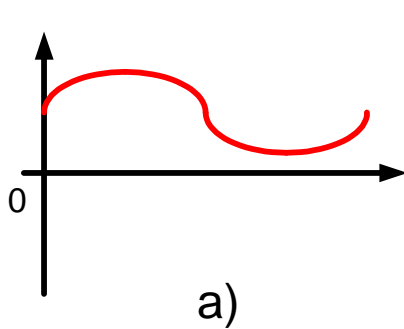


- Quand ça ne conduit pas
 - Diode devient circuit ouvert
 - $V_{OUT} = 0$

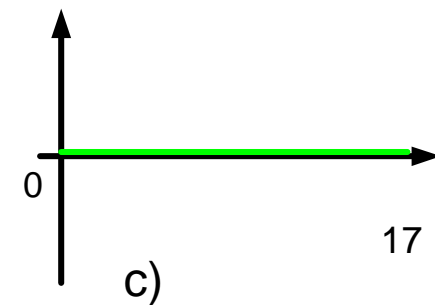
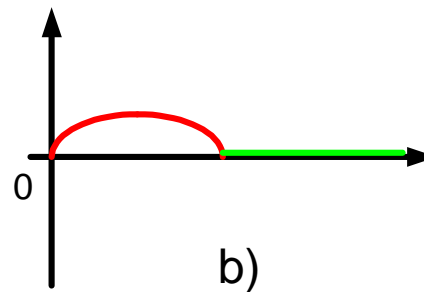
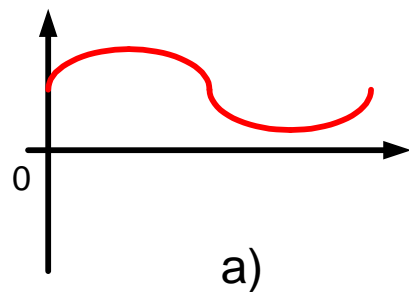


Exemple

- Les signaux en entrée ressemblent à:
 - Rouge: Ça conduit ($V_{OUT}=V_{SOURCE}$)
 - Vert: Ça ne conduit pas ($V_{OUT}=0$)



- En sortie, on aura ceci:

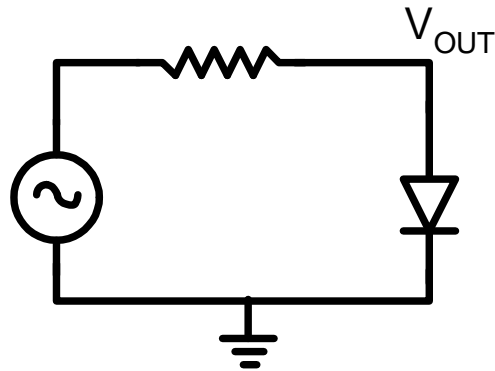


Méthode

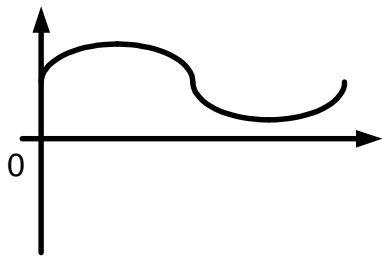
- 1) Identifier quand la diode conduit et quand elle ne conduit pas
- 2) Quand ça conduit c'est un court-circuit, sinon c'est un circuit ouvert
- 3) Indiquer ce que ça implique (ex: $V_{OUT}=0$) dans chacun des cas
- 4) Dessiner le signal de sortie

Exemple (seul)

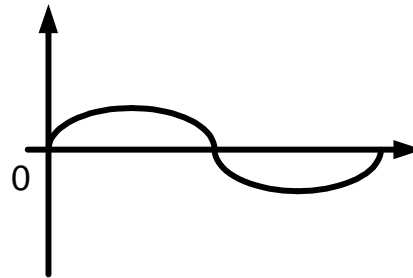
- Considérez ce circuit:



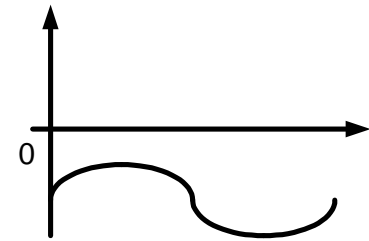
- Trouvez V_{OUT} pour les entrées suivantes:



a)



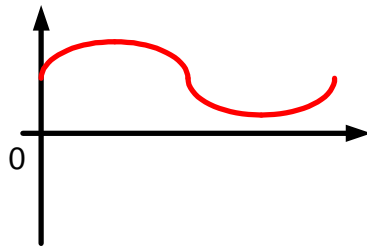
b)



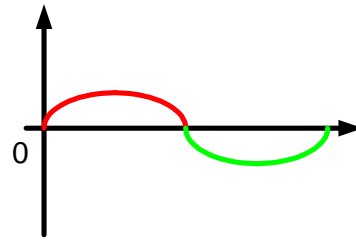
c)

Exemple (seul)

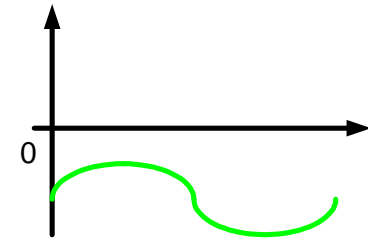
- La condition de conduction: $V_{\text{SOURCE}} > 0$
 - Rouge: conduit
 - Vert: ne conduit pas



a)



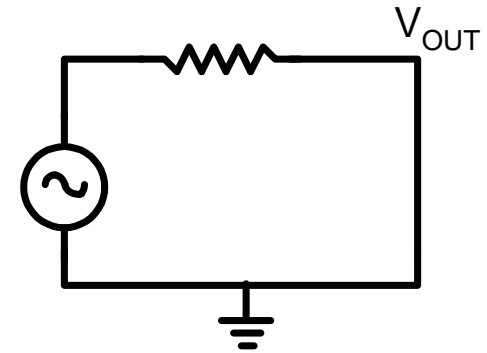
b)



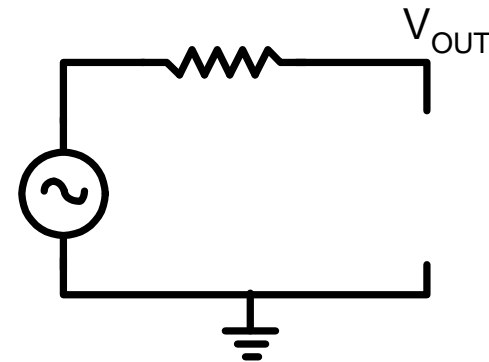
c)

Exemple (seul)

- Quand ça conduit:
 - Diode devient un fil
 - Sortie connectée à 0

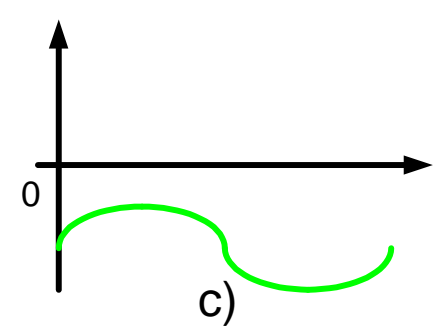
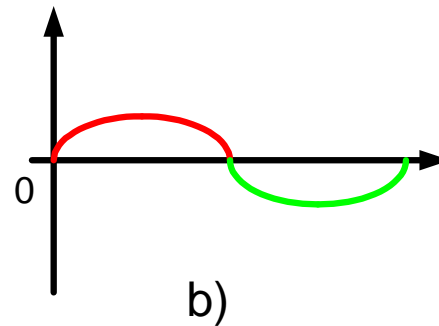
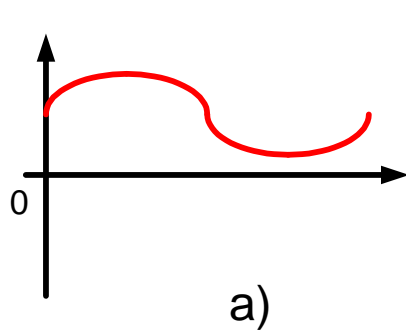


- Quand ça ne conduit pas:
 - Diode devient un circuit ouvert
 - Sortie connectée à l'entrée

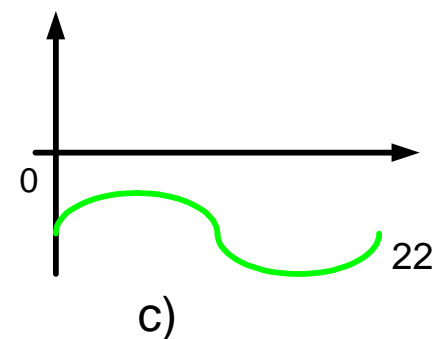
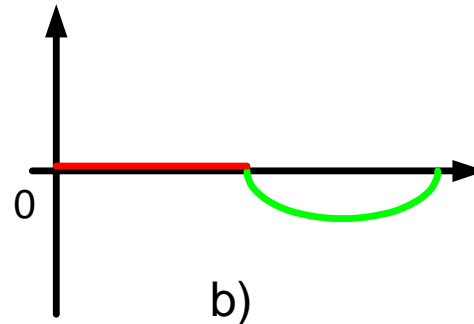
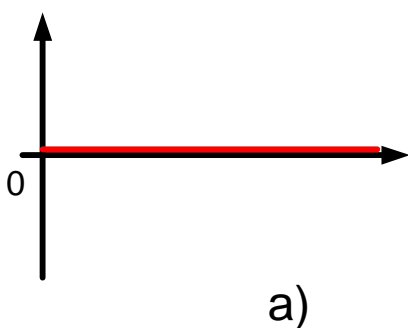


Exemple (seul)

- Les signaux en entrée ressemblent à:
 - Rouge: Ça conduit ($V_{OUT}=0$)
 - Vert: Ça ne conduit pas ($V_{OUT}=V_{SOURCE}$)

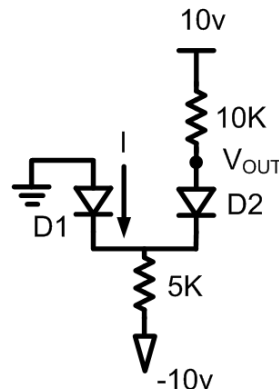


- En sortie, on aura ceci:



Circuits à multiples diodes

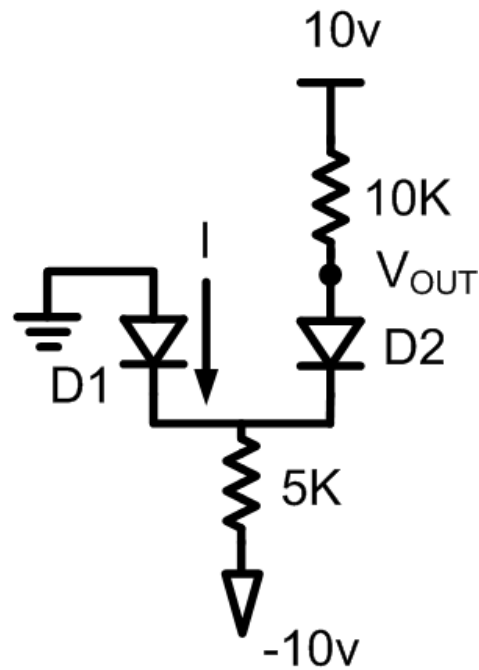
- Il arrive souvent qu'on ait des circuits avec plusieurs diodes
 - Chaque diode peut conduire ou ne pas conduire
 - Parfois c'est évident, parfois ce l'est moins
- Considérez par exemple le circuit suivant
 - Le voltage au noeud positif du 5K détermine si D1, D2, les 2 ou aucune diode conduit...



Comment faire pour analyser ça?

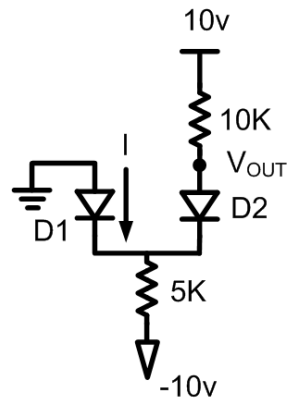
Exercice

- Trouvez le courant I et dites si les diodes D1 et D2 conduisent ou pas



Exercice

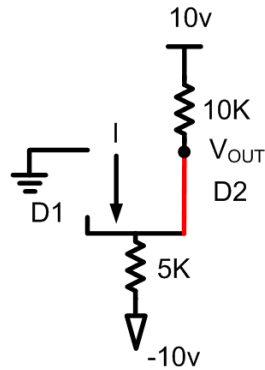
- C'est difficile de partir...
 - On ne sait pas à 100% lesquelles conduisent
 - On ne peut donc pas écrire d'équations
 - Sans équations, on ne connaît pas les tensions pour savoir quelles diodes conduisent!
- Il faut se donner un point de départ...
 - Par la suite, on vérifie...



HYPOTHÈSE: D2 conduit et D1 ne conduit pas..

Exercice

- Avec l'hypothèse, le circuit devient



- Le courant dans D2 serait:

$$I = \frac{10 - (-10)}{15K} = 1.33mA$$

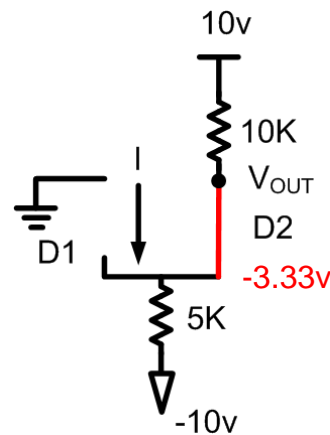
- Et V_{OUT} serait

$$V_{OUT} = 10 - 1.33mA \cdot (10K) = -3.33v$$

Est-ce que c'est fini?

Exercice

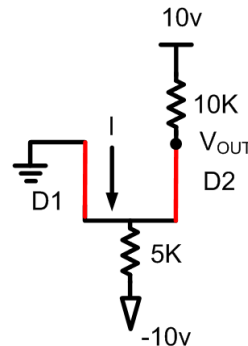
- Quand on fait des hypothèses, il faut les vérifier:
 - D2 conduit: La tension à l'anode est plus élevée que celle à la cathode
 - D1 ne conduit pas: La tension à l'anode (0v) est plus élevée que celle à la cathode
 - Il y a incohérence: notre hypothèse n'est pas bonne



On recommence

Exercice

- Cette fois-ci, on dit que les 2 conduisent
 - La tension à V_{OUT} sera donc 0v



Les 2 hypothèses tiennent

- On cherche le courant I dans D1:

$$I_{5K} = \frac{0 - (-10)}{5K} = 2mA$$

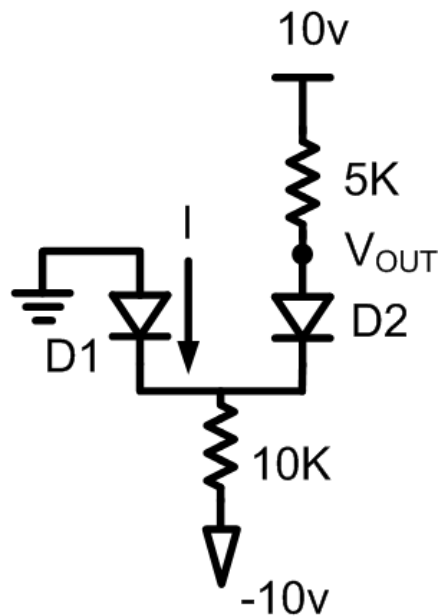
$$I_{D2} = \frac{10 - 0}{10K} = 1mA$$

$$I_{D1} = I_{5K} - I_{D2} = 1mA$$

On a fini

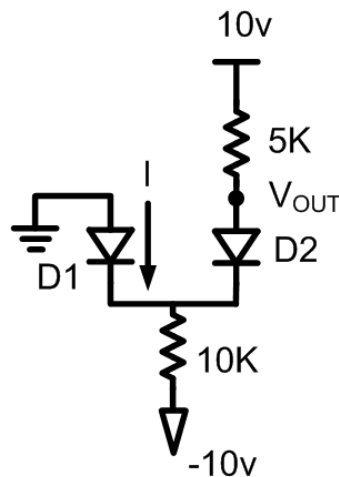
Exercice (seul)

- Trouvez le courant I et dites si les diodes D1 et D2 conduisent ou pas



Exercice (seul)

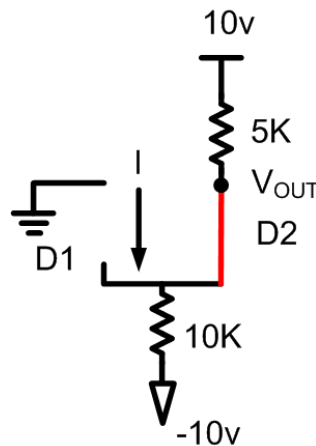
- L'hypothèse est que D2 conduit puisque son anode est à la tension la plus élevée
 - Si D1 conduisait V_{OUT} serait 0
 - Le courant dans D2 serait 2 fois plus grand que celui dans le 10K
 - D1 devrait conduire à l'envers... impossible



On va donc prendre l'hypothèse que D1 ne conduit pas

Exercice (seul)

- Le circuit deviendrait le suivant:



- Le courant I_{D2} est égal à

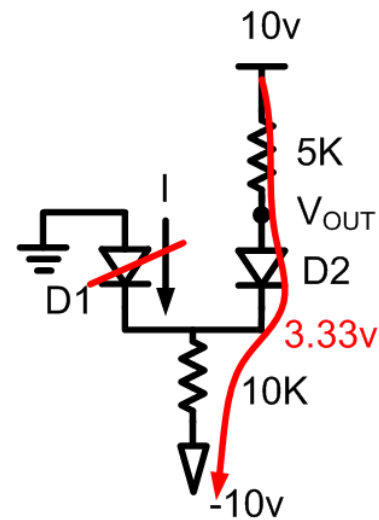
$$I = \frac{10 - (-10)}{15K} = 1.33mA$$

Exercice (seul)

- La chute de tension dans le 5K serait:

$$\Delta V = 1.33mA \cdot 5K = 6.66v$$

- V_{OUT} serait 3.33v:
 - L'anode de D1 est 0 et la cathode est à 3.33v
 - La diode D1 ne conduit pas
 - Hypothèse confirmée
- Problème est terminé...

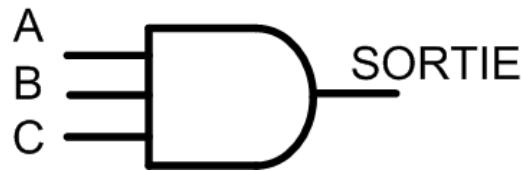


Application: Portes logiques

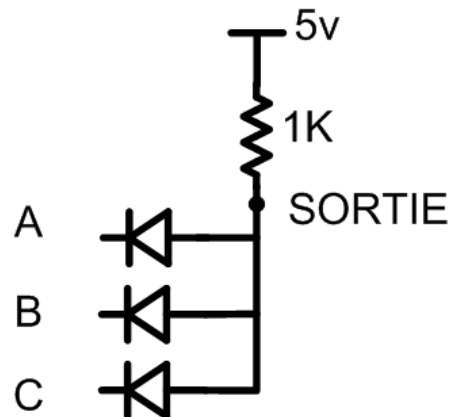
- Les portes logiques se trouvent dans tout système numérique
 - On peut utiliser les diodes pour faire des portes logiques simples
 - Ce n'est plus conventionnel, mais c'est possible..
- Pour notre système logique, on va utiliser des 0v ou 5v (par exemple)
 - '0' sera 0v
 - '1' sera 5v

Application: Portes logiques

- Pour la porte ET, on veut que toutes les entrées soient '1' pour donner '1'
 - Sinon, ça donne '0'

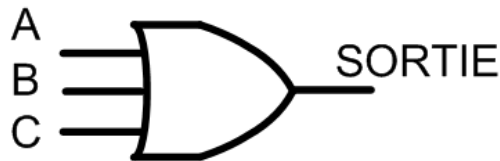


- On pourrait le faire avec le circuit suivant:

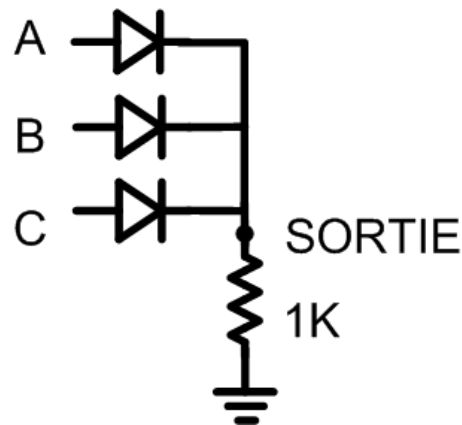


Application: Portes logiques

- Pour la porte OU, on veut qu'au moins une entrée soit '1' pour donner '1'
 - Sinon, ça donne '0'



- On pourrait le faire avec le circuit suivant :



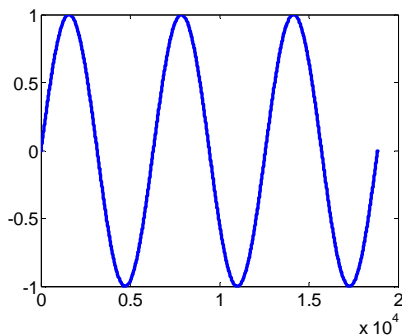
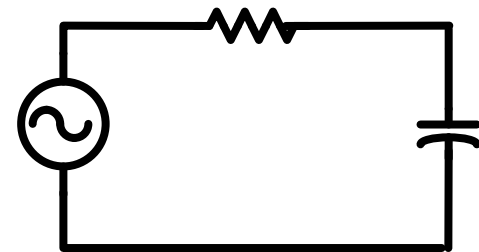
Application: Redressement

- Exemple: Conversion AC vers DC
 - L'électricité est envoyée en AC, mais plusieurs systèmes ont besoin du DC
 - Il faut convertir AC vers DC pour ces systèmes
- Objectifs:
 - 1) Enlever les oscillations
 - 2) Donner une tension constante (non-nulle)

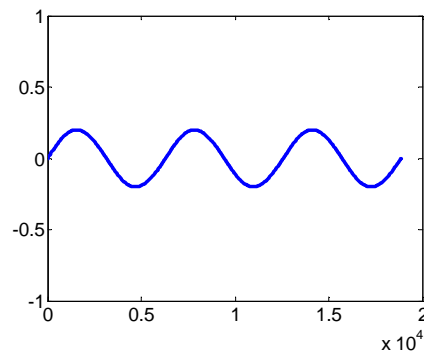
Comment enlever les oscillations?

Mauvaise solution #1

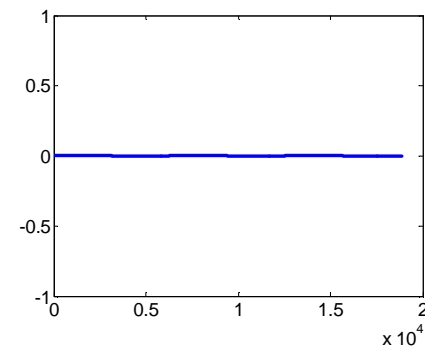
- Oscillations: frequence “élevée”
- Filtres passe-bas:
 - Réduisent les oscillations
 - Donnent la valeur moyenne.
- Prenons un cas simple:



Entrée



Sortie (peu filtré)

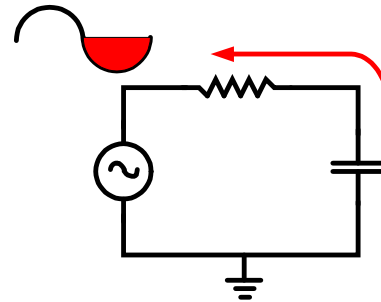
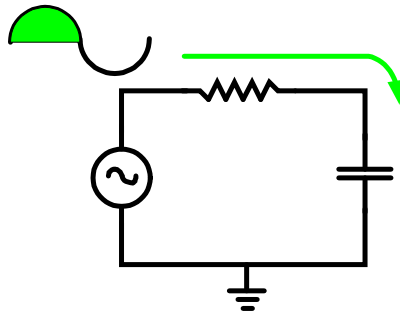


Sortie (beaucoup filtré)

Ça enlève effectivement les oscillations...

Mauvaise solution #1

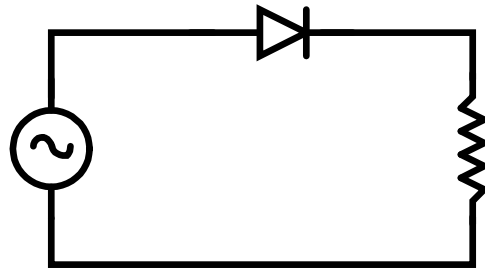
- Pas bonne solution: moyenne est 0!
 - Aucun système n'utilise une alimentation de 0v
- Raison pour la moyenne 0:
 - On fournit des charges la moitié du temps (positif)
 - On reçoit des charges la moitié du temps (négatif)
 - Résultat moyen: 0 charge au condensateur



Si seulement on pouvait bloquer le courant de retour...

Mauvaise solution #2

- Comme par hasard, la diode fait ça...
- Diode conduit quand V_D est positif
 - La diode bloque donc la partie négative de la courbe

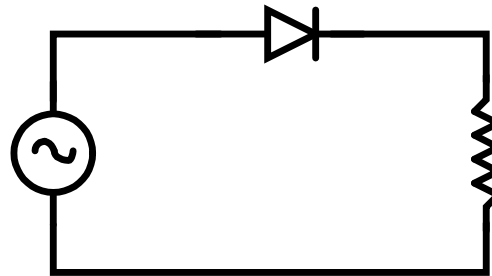
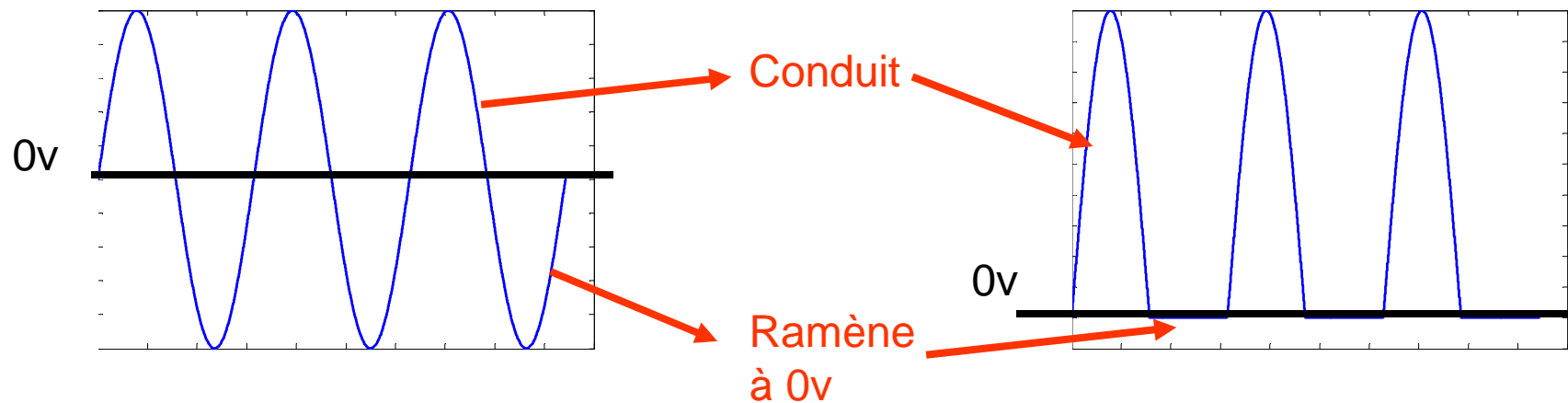


- Si tension négative: diode ne conduit pas
 - La résistance RAMÈNE la sortie à 0v.

Illustrons ça avec des dessins...

Mauvaise solution #2

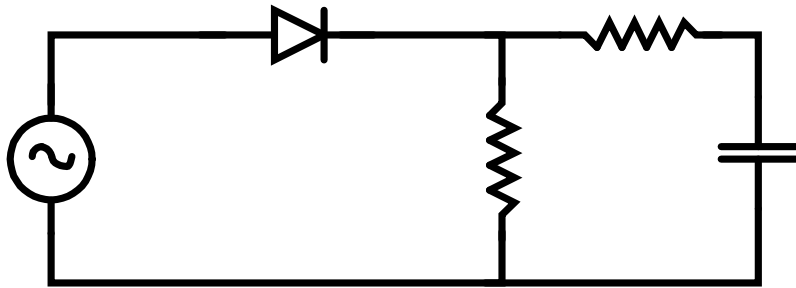
- Illustration du comportement:



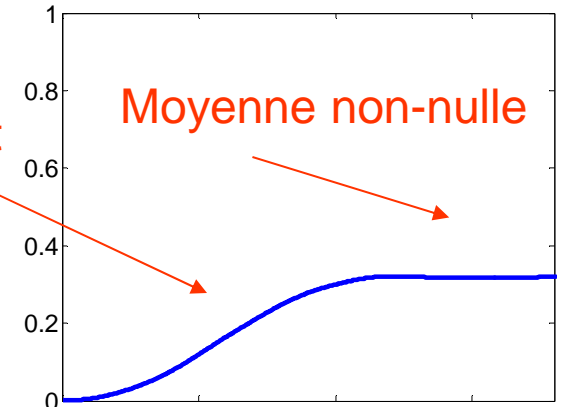
La moyenne maintenant devrait être non-nulle...

Mauvaise solution #2

- Enlevons les oscillations
 - Filtre passe-bas RC
 - On met la diode en série avec un filtre passe-bas



Transitoire:
pas important

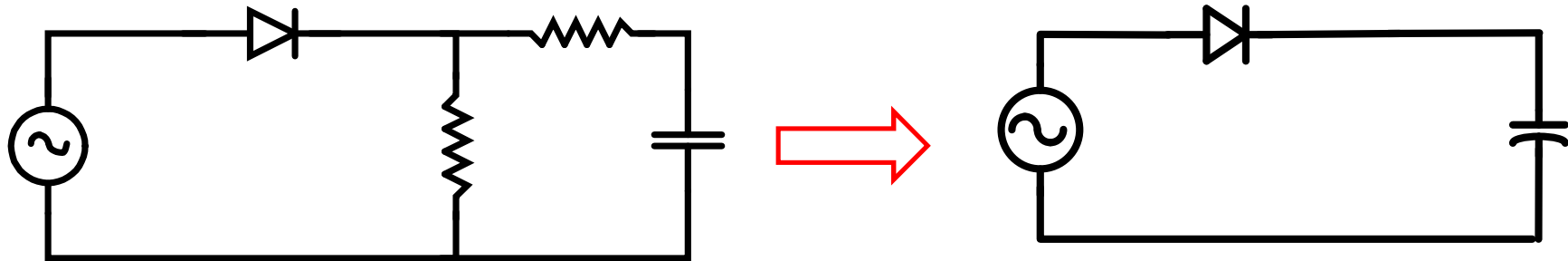


Ça prend une entrée de 1v (crête-à-crête) pour obtenir 0.3v

Ce n'est pas très efficace

Bonne Solution

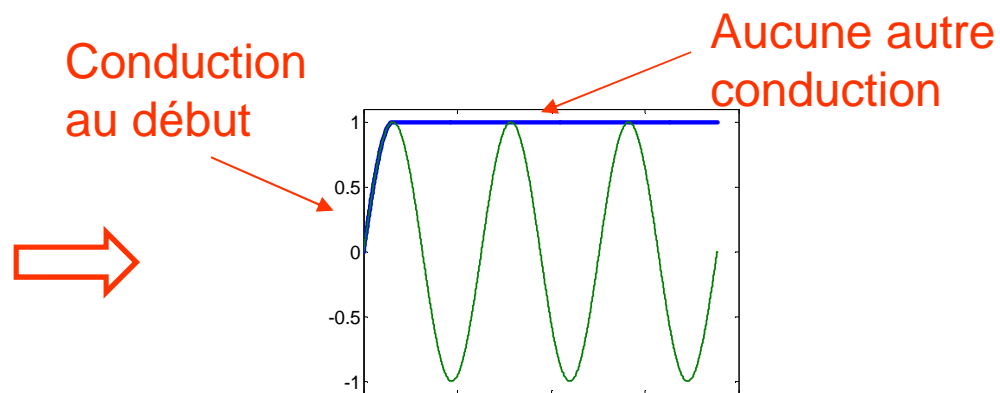
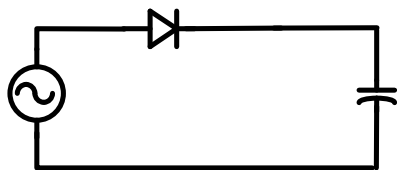
- La moyenne est faible due aux résistances
 - A-t-on réellement besoin des résistances?
- Enlevons toutes les résistances!



Qu'est-ce que ça donne en sortie?

Bonne Solution

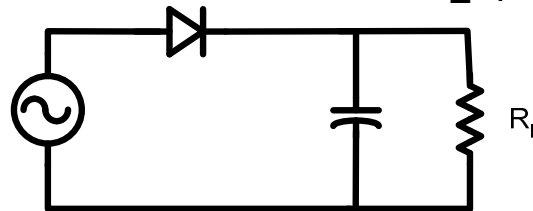
- Au début
 - $V_{\text{SORTIE}}=0$: La source charge le condensateur
- Quand V_{SORTIE} est au maximum:
 - $V_{\text{SOURCE}} \leq V_{\text{SORTIE}}$: la diode ne conduit plus
 - Les charges RESTENT dans le condensateur



Mais... les choses se compliquent!

Redressement : demi cycle

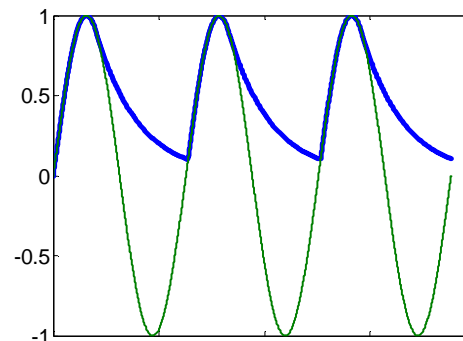
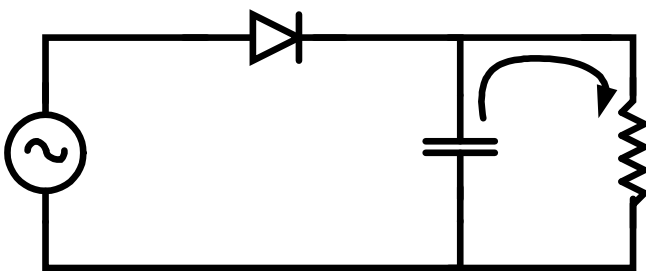
- Source DC sert à alimenter quelque chose
 - Ce “quelque chose”, on appelle ça une CHARGE (‘load’ en anglais)
 - Exemple d’une charge: votre ordinateur
- La charge tire du courant
 - Votre ordinateur tire du courant
 - On fait semblant que l’ordinateur tire du courant COMME une résistance R_L (on “modélise”)



Qu'est-ce que ça implique?

Redressement : demi cycle

- V_{source} positif:
 - La diode conduit
 - La source charge le condensateur
- V_{source} négatif
 - La diode ne conduit plus
- Le condensateur se décharge par R_L
 - Votre ordinateur (R_L) tire un courant



$$V(t) = V_{DD}e^{-t/R_L C}$$

Une source de tension
devrait être stable!

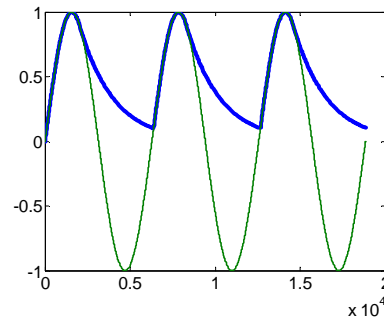
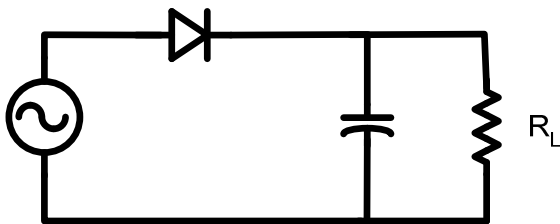
Redressement : demi cycle

- Pour garder une tension stable on a 2 options:
 - 1) Diminuer la vitesse à laquelle les charges partent
 - 2) Augmenter la quantité de charges
- Traduction “pratique”, il faut soit:
 - 1) Augmenter R
 - 2) Augmenter C } Augmenter la constante de temps (RC)
- Normalement, on ne peut pas changer R_L
 - R_L est déterminé par votre ordinateur

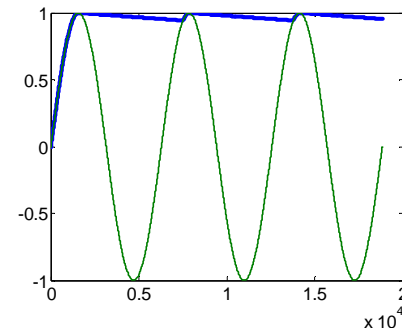
On peut donc juste changer C

Redressement : demi cycle

- Si C faible: grosse chute de tension
- Si C élevé: faible chute de tension
- Cas idéal: C infini, aucune chute de tension



C faible

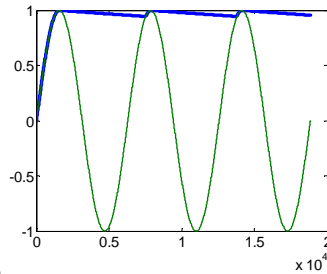


C élevé

Quand C est élevé, la pente ressemble presque à une ligne droite...

Redressement : demi cycle

- Si C est élevé, on peut simplifier la situation



- On va dire que:

- Ça décharge durant toute la période $t=T$

$$V(t) = VDD e^{-T/R_L C}$$

- $T/R_L C$ est très petit.. On approxime l'exponentielle avec une série de Taylor (2 premiers éléments)

$$V(t) = VDD \left(1 - \frac{T}{R_L C} \right)$$

Redressement : demi cycle

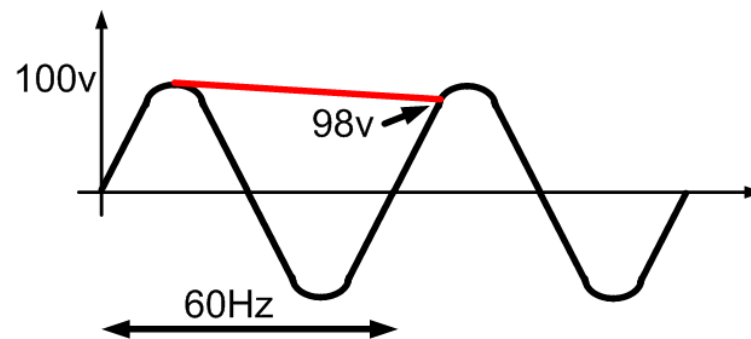
- On connaît la période (ou la fréquence) du sinus en entrée et R_L
- Pour avoir une “chute acceptable” ($v(t)$ minimum), je peux calculer C

$$V(t) = VDD \left(1 - \frac{T}{R_L C} \right)$$

Exemple (seul)

- La source AC a une fréquence de 60Hz et une amplitude maximale de 100V.
- Mon système a une résistance de charge $R_L=10K$
- Quelle est la valeur de C requise pour avoir une chute maximale de 2V?

$$V(t) = VDD \left(1 - \frac{T}{R_L C} \right)$$



Exemple (seul)

- On utilise l'équation suivante:

$$V(t) = VDD \left(1 - \frac{T}{R_L C} \right)$$

- Ici, $VDD=100v$, $R_L=10K$ et $T=1/60$

$$98 = 100 \left(1 - \frac{0.0167}{10000C} \right)$$

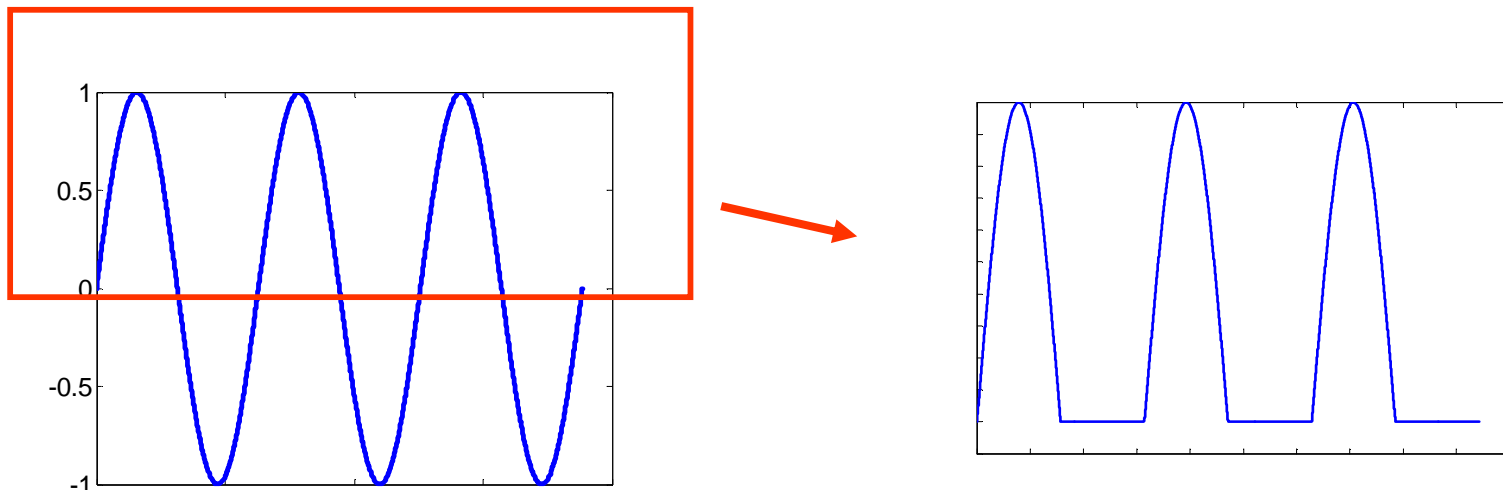
- On isole C:

$$C = 83.5 \mu F$$

Problème terminé... on revient à ce qu'on faisait...

Gaspillage

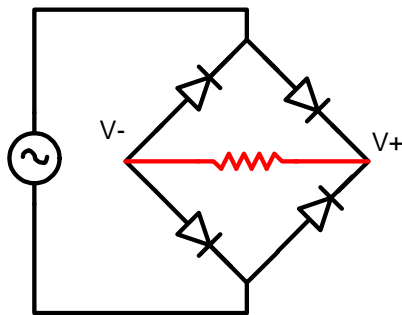
- On applique un sinus et on n'en retire que lorsque c'est positif
 - Quand c'est négatif, ça ne conduit pas
 - L'énergie de la source est gaspillée à ce moment



Serait-il possible de se servir de la partie négative aussi?

Redressement : cycle complet

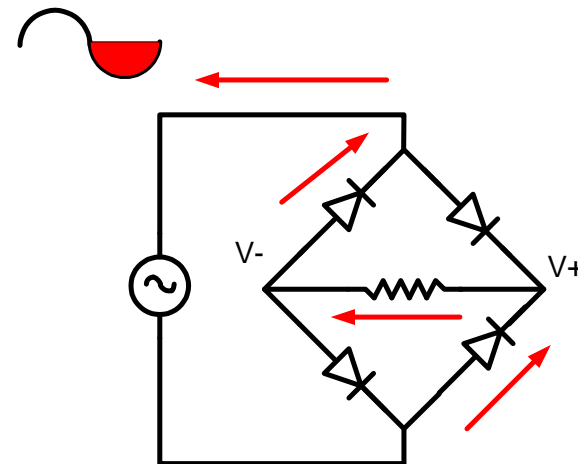
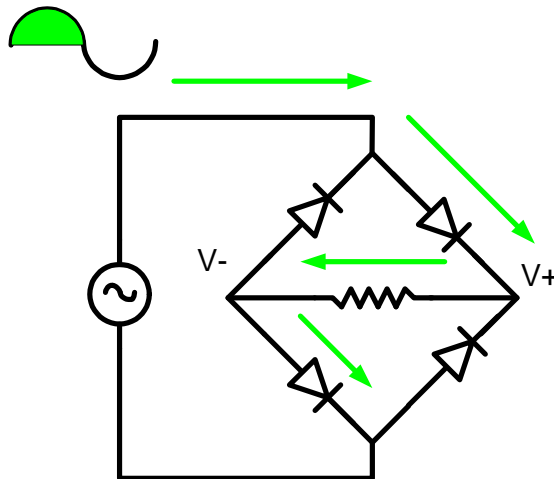
- On pourrait utiliser un pont de diodes
- Qu'est-ce qu'un pont de diodes?
 - 4 diodes connectés d'une façon particulière
- Pour le dessiner, on peut faire ceci:
 - Commencer à "gauche" avec V^-
 - Une branche va en haut, l'autre va en bas
 - Les 2 branches reconvergent à V^+



V^+ et V^- sont les noeuds où on connecte la charge

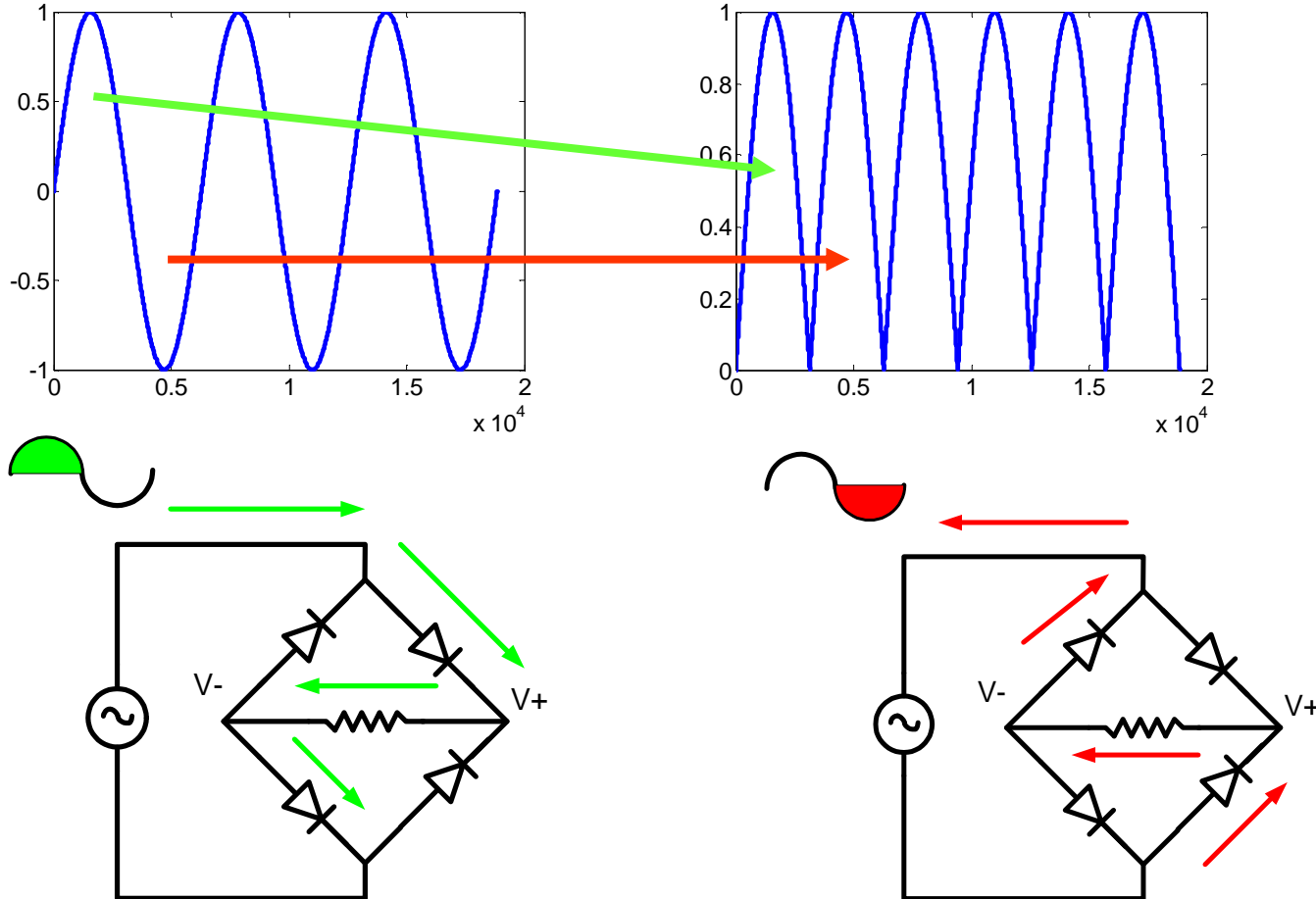
Redressement : cycle complet

- Comment ça fonctionne?
 - Durant le cycle positif, le courant passe par 2 diodes et par la charge
 - Durant le cycle négatif, le courant passe par 2 autres diodes et par la charge
 - La direction du courant dans R est toujours la même: la tension sera toujours positive.



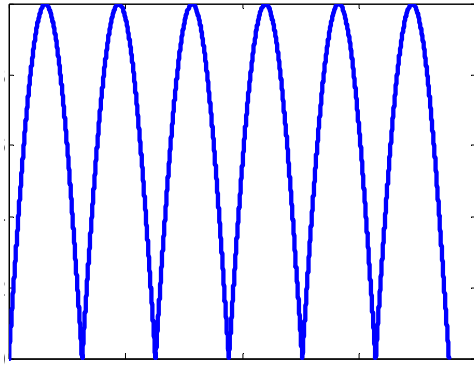
Redressement : cycle complet

- L'onde de sortie devrait ressembler à ceci:

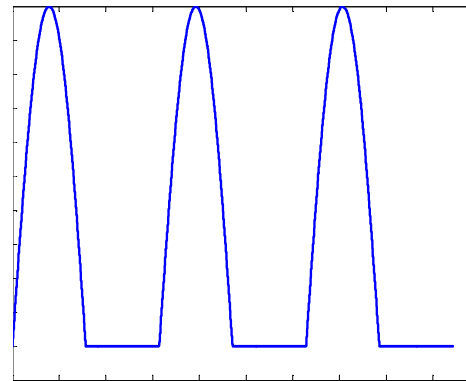


Redressement : cycle complet

- Comparons cycle complet vs. demi-cycle:



Cycle complet



Demi Cycle

- Signal est au maximum plus souvent
- Pour conversion AC→DC, la chute de tension est moins importante
- C peut être réduite de moitié

Passons maintenant à une autre application...

Limiteur

- Les circuits opèrent bien quand les tensions sont raisonnables
- Qu'arrive-t-il quand on sort des limites raisonnables?
 - Si on est chanceux: ça continue à bien fonctionner
 - Si on est moins chanceux, ça fonctionne mal
 - Si on est malchanceux, ça cesse de fonctionner

Dans quels cas est-ce que les tensions sortent des limites?

Limiteur

- Le corps développe des charges avec le mouvement
 - Une accumulation de charges: tension
 - Cette tension monte à des kilovolts
- Quand vous touchez à n'importe quoi, les charges peuvent être transmises
 - Sans le vouloir, vous pouvez appliquer des kilovolts à vos circuits
 - Ce serait bien d'avoir une façon de les protéger

On peut se protéger en LIMITANT la tension avec un circuit limiteur

Limiteur

- Certains matériaux attirent des charges positives
 - On aura une tension positive
- Certains matériaux attirent des charges négatives
 - On aura une tension negative
- Ce serait bien d'avoir une manière de se protéger contre chacune de ces situations

Commençons par une protection contre le négatif

Limiteur

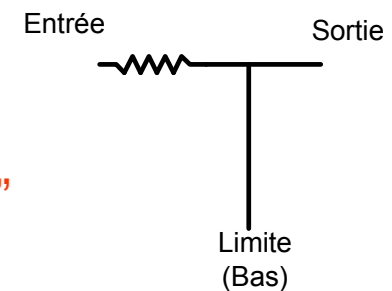
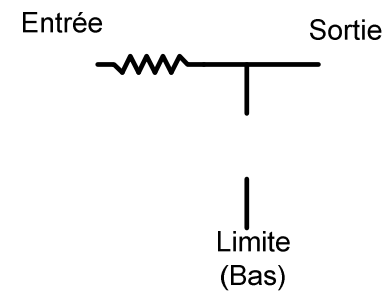
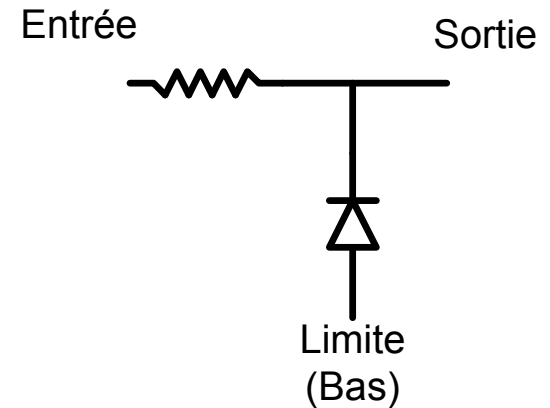
- Limiteur de tension basse:
 - Une résistance avec une diode

- Si $entrée > Limite$

Laisse passer le signal d'entrée

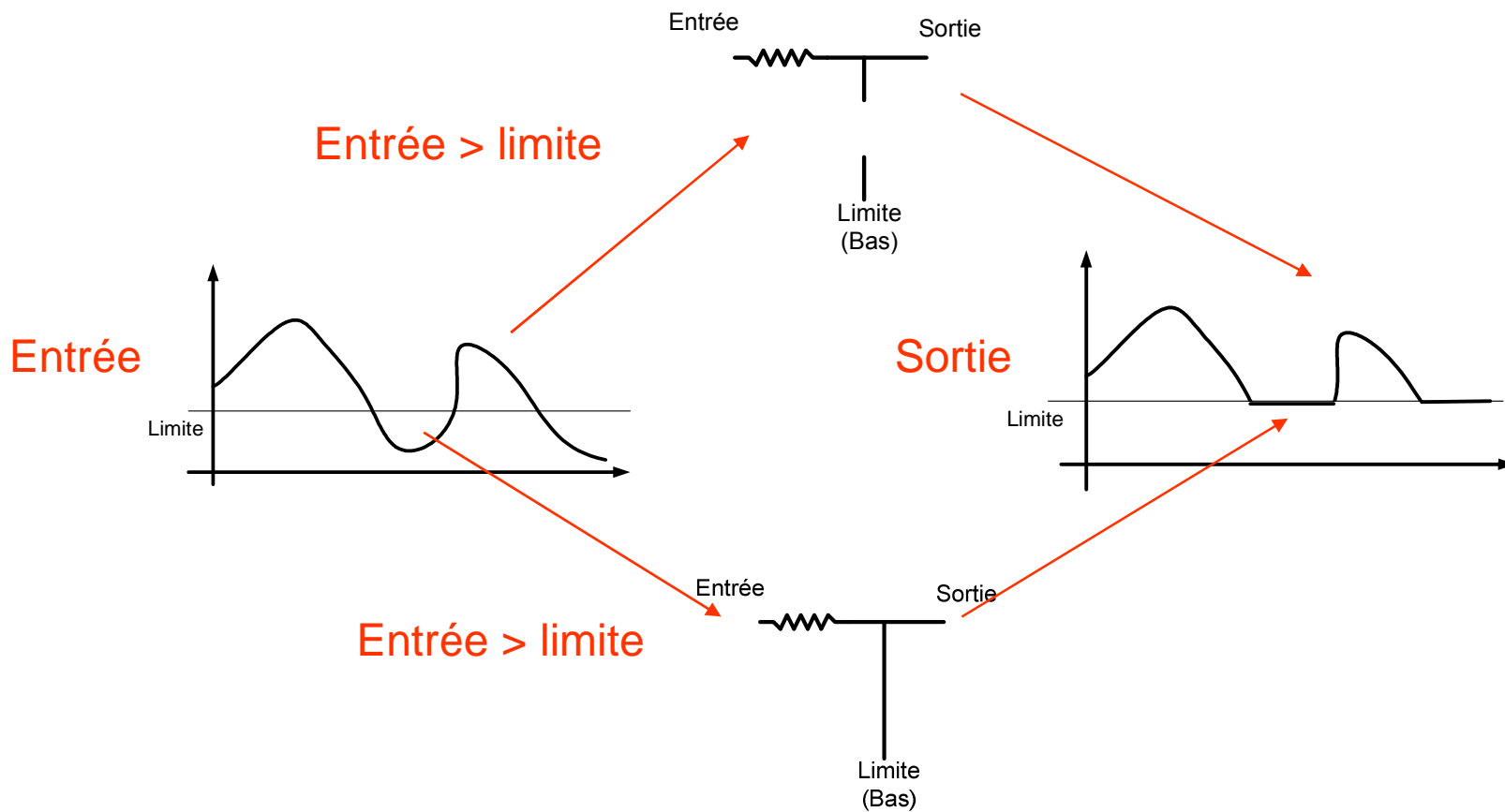
- Si $entrée < Limite$

Ramène la sortie à "limite"



Limiteur

- Exemple



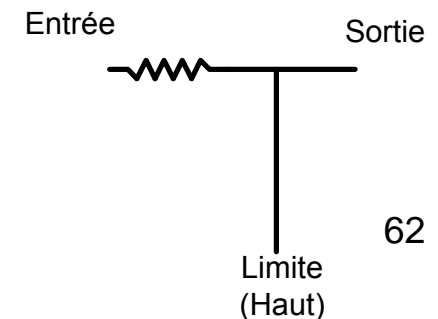
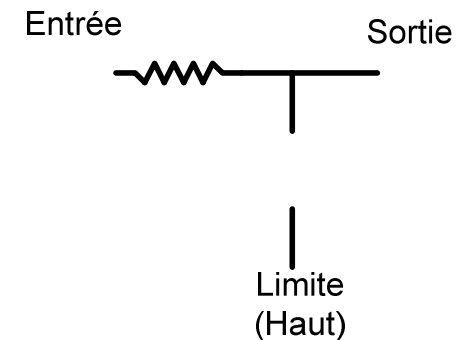
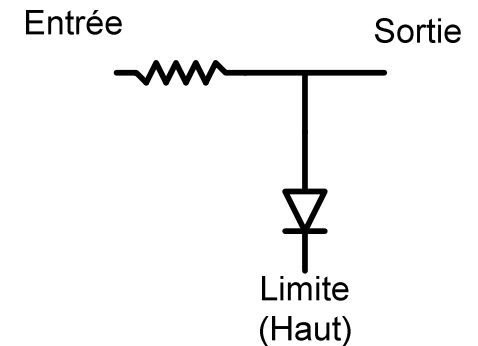
Limiteur

- Limiteur de tension élevée
 - Une résistance avec une diode
 - Si $entrée < Limite$

Laisse passer le signal d'entrée

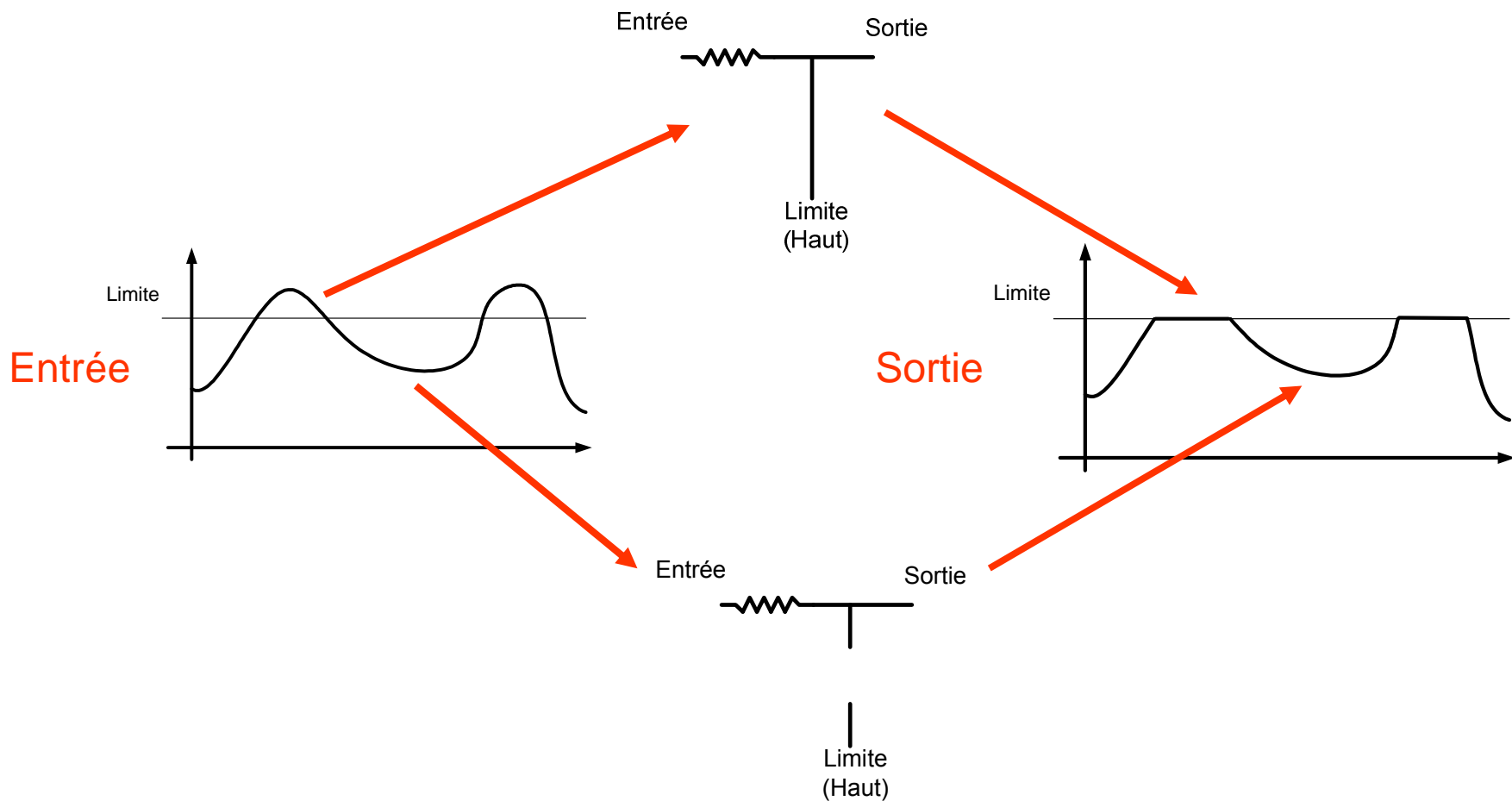
- Si $entrée > Limite$

Ramène la sortie à "limite"



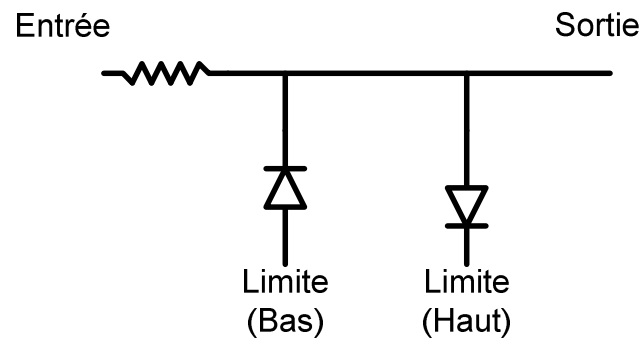
Limiteur

- Exemple:

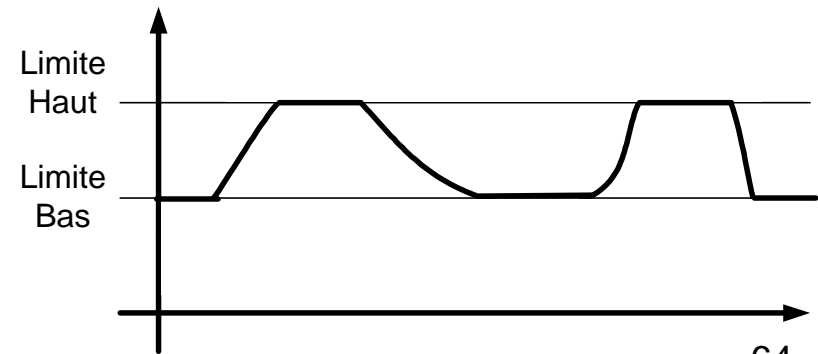
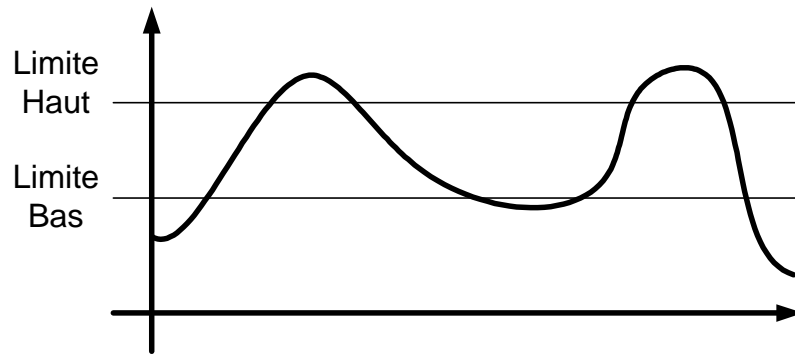


Limiteur

- On peut combiner les 2 types de limiteurs:

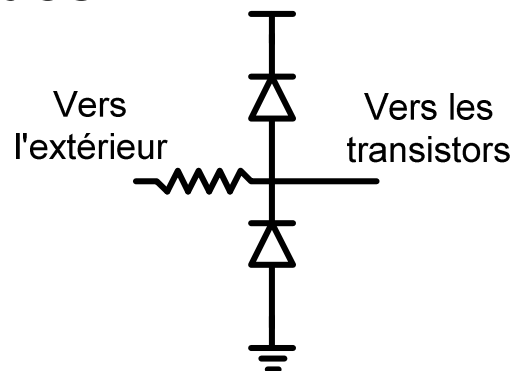


- Voici un exemple:



Limiteur

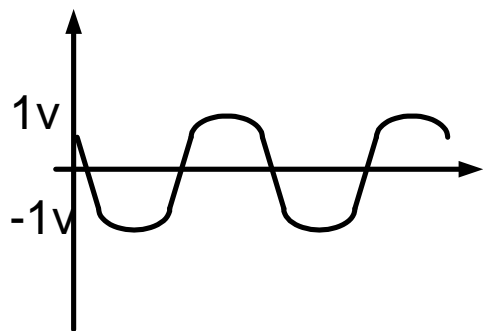
- Exemple d'application:
 - Les transistors CMOS sont faits avec, entre autres, des isolants
 - Isolants sont minces de quelques nm
 - Haute tension peut faire “claquer” l'isolant
 - Il faut protéger contre les décharges électrostatiques:



Passons maintenant à la dernière application: le clamping

Clamping

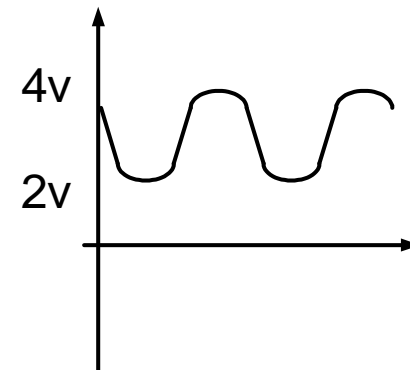
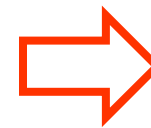
- Dans certaines applications, on va vouloir changer le niveau DC d'un signal
- On utilise les diodes pour fixer ("clamp") la tension basse/haute du signal
- Exemple:



Sinus de -1v à +1v



Clamp
en bas
à 2v

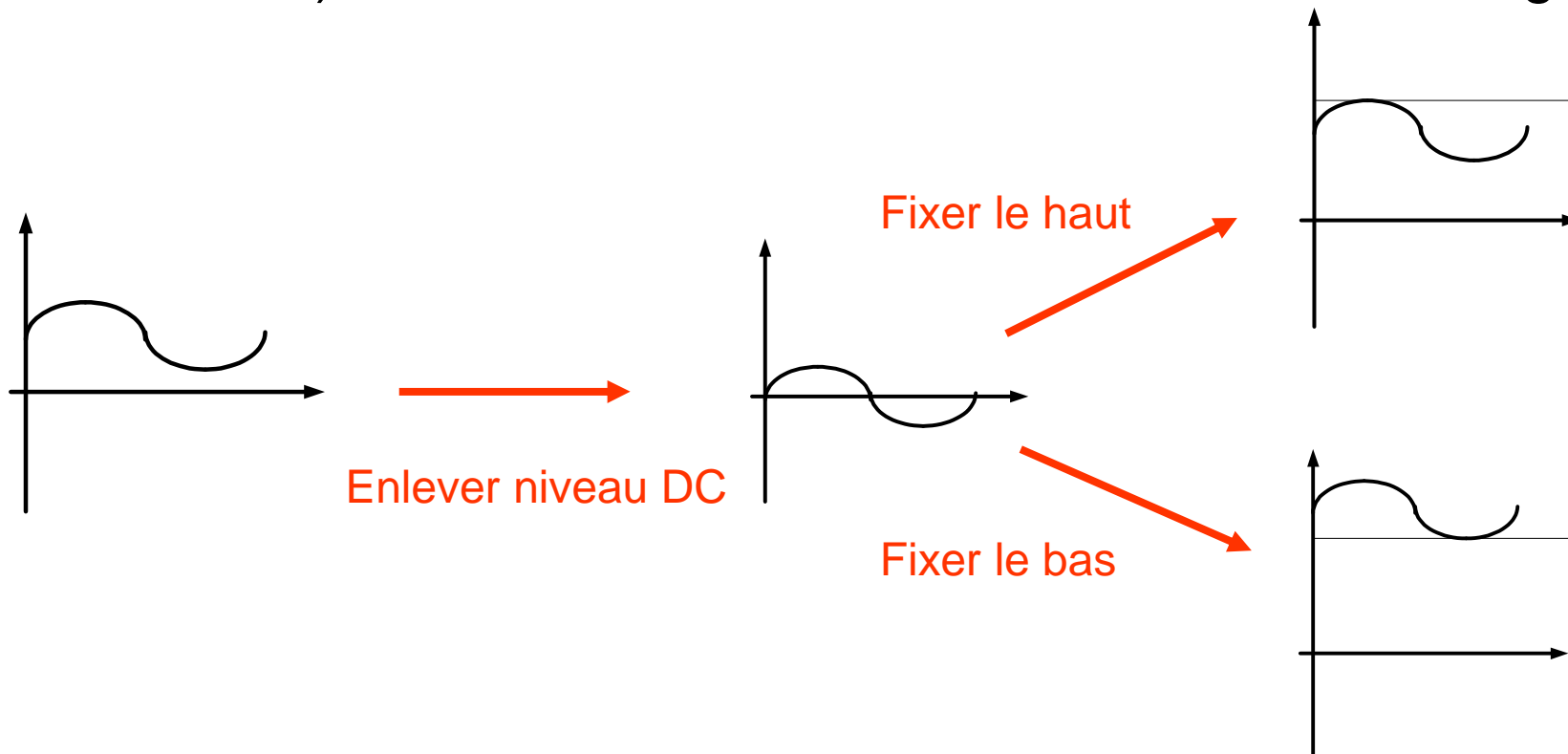


Sinus de 2v à 4v

Comment est-ce qu'on fait ça?

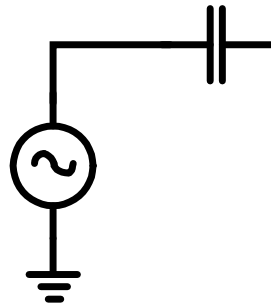
Clamping

- On procède en 2 étapes:
 - 1) On enlève le niveau DC du signal
 - 2) On FIXE une tension haute ou basse au signal



Clamping

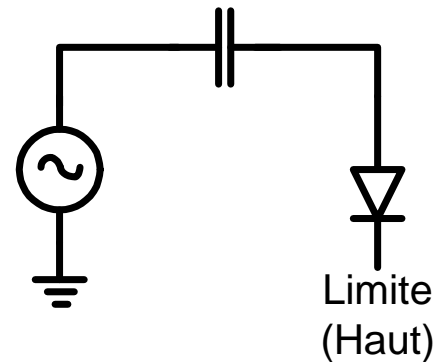
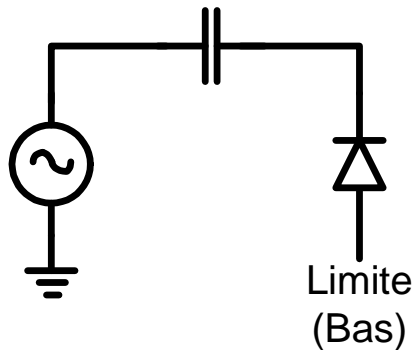
- Premièrement, on enlève le niveau DC:
 - On enlève le niveau DC avec un condensateur en série



- Le C bloque le DC
 - Seulement les “variations” vont passer
 - Le niveau DC n’est pas défini à droite du C

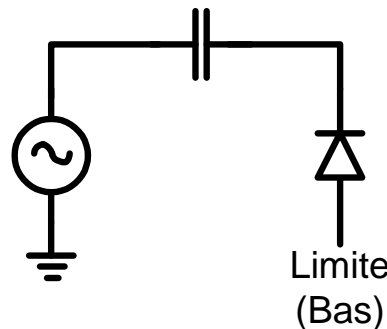
Clamping

- Le niveau DC n'est pas défini à droite
- On en profite pour l'ajuster
 - Soit on lui impose une valeur minimale (bas) OU
 - Soit on lui impose une valeur maximale (haut)



Clamping

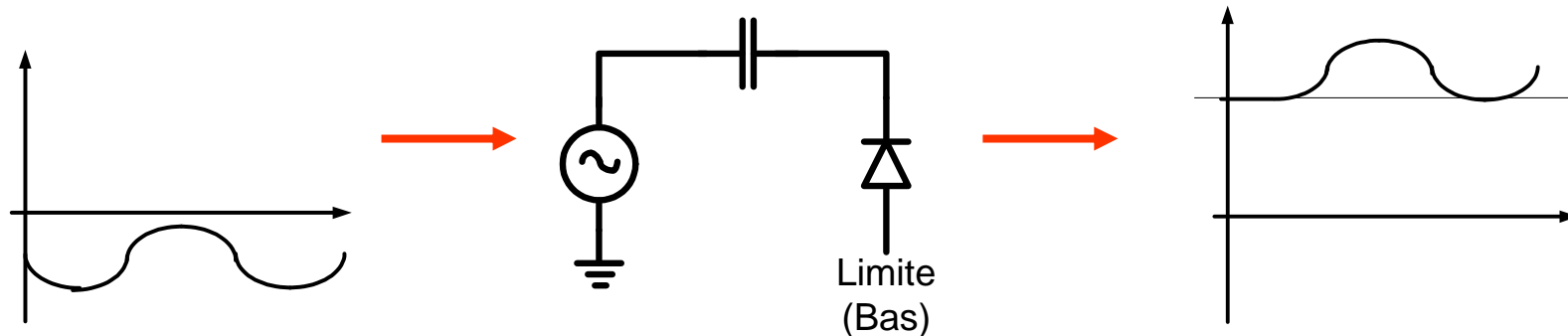
- Comment ça fonctionne?
 - Pour expliquer, il faut raisonner un peu plus...
- Imaginons que l'entrée est un sinus
 - La sortie sera aussi un sinus de même taille
 - Cependant, on ne connaît pas son niveau DC



Pour le trouver, il faut raisonner...

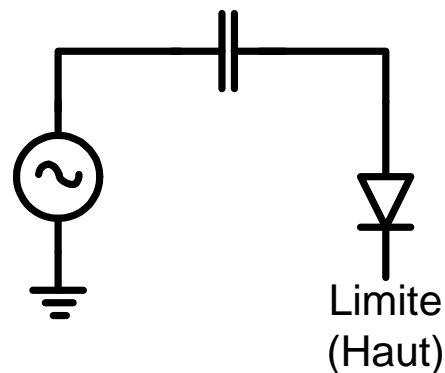
Clamping

- SI la sortie était MOINS que *Limite*.
 - La diode conduirait et ramènerait la sortie a *Limite*
 - Donc, la sortie a une valeur minimale de *Limite*
- Quand le sinus commencera à monter, la tension de sortie montera aussi
 - L'entrée et la sortie auront la même forme
 - La sortie sera toujours en haut de *Limite*



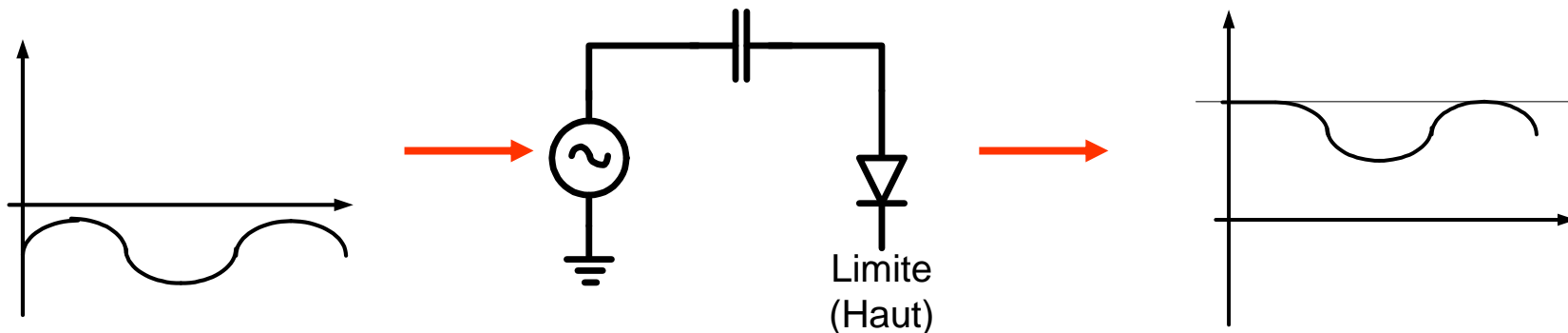
Clamping

- Pour le clamping par le haut, un raisonnement semblable s'applique
- Imaginons que l'entrée est un sinus
 - La sortie sera aussi un sinus de même taille
- Cependant, on ne connaît pas son niveau DC



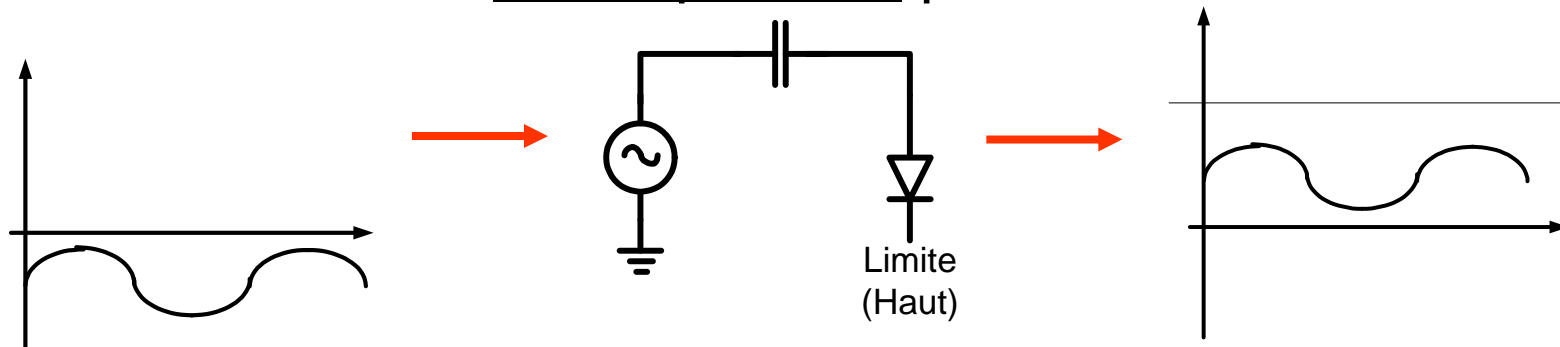
Clamping

- SI la sortie est PLUS que *Limite*.
 - La diode conduirait et ramènerait la sortie à *Limite*
 - Donc, la sortie a une valeur maximale de *Limite*
- Quand le sinus commencera à descendre, la tension de sortie descendra aussi
 - L'entrée et la sortie auront la même forme
 - La sortie sera toujours en bas de *Limite*



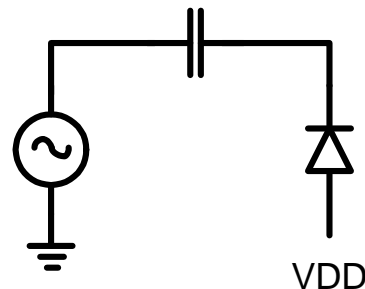
Clamping

- Le clamping aide à changer le niveau DC
- On a 2 méthodes:
 - Fixer un minimum
 - Fixer un maximum
- Notez que le signal ne doit pas nécessairement **TOUCHER** la limite
 - Ex: Il est théoriquement possible d'avoir ceci:



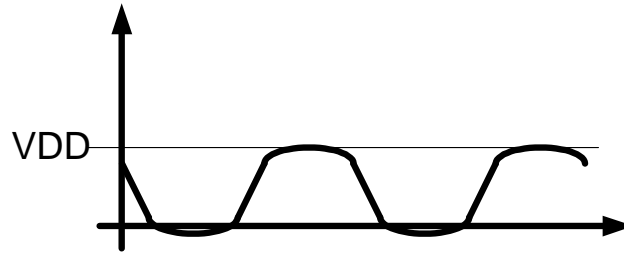
Application du clamping

- Application: pompe à charges
- Contexte:
 - Imaginez qu'une batterie nous donne 3v mais qu'on ait besoin de plus
 - Comment faire?
- On peut utiliser le clamping
 - On fixe *Limite* (bas) à la tension maximale du circuit

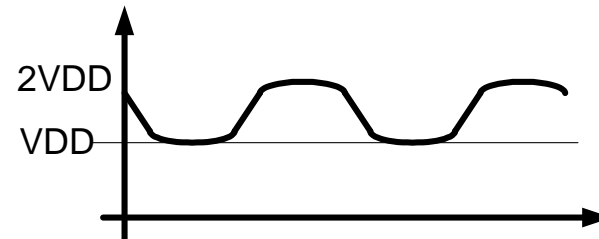
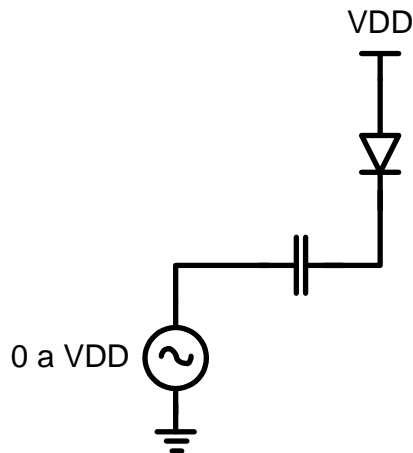


Application du clamping

- Si l'entrée était un sinus de 0 à VDD

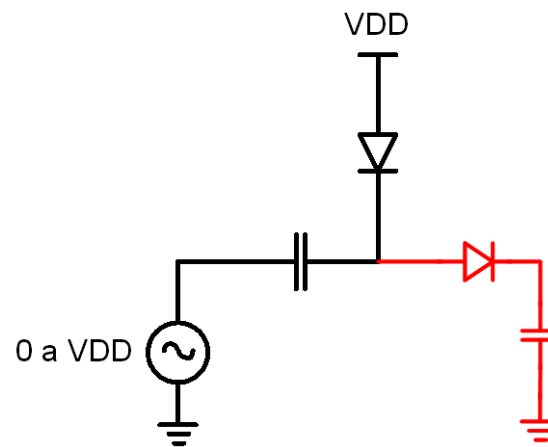


- La sortie sera un sinus de VDD à $2VDD$



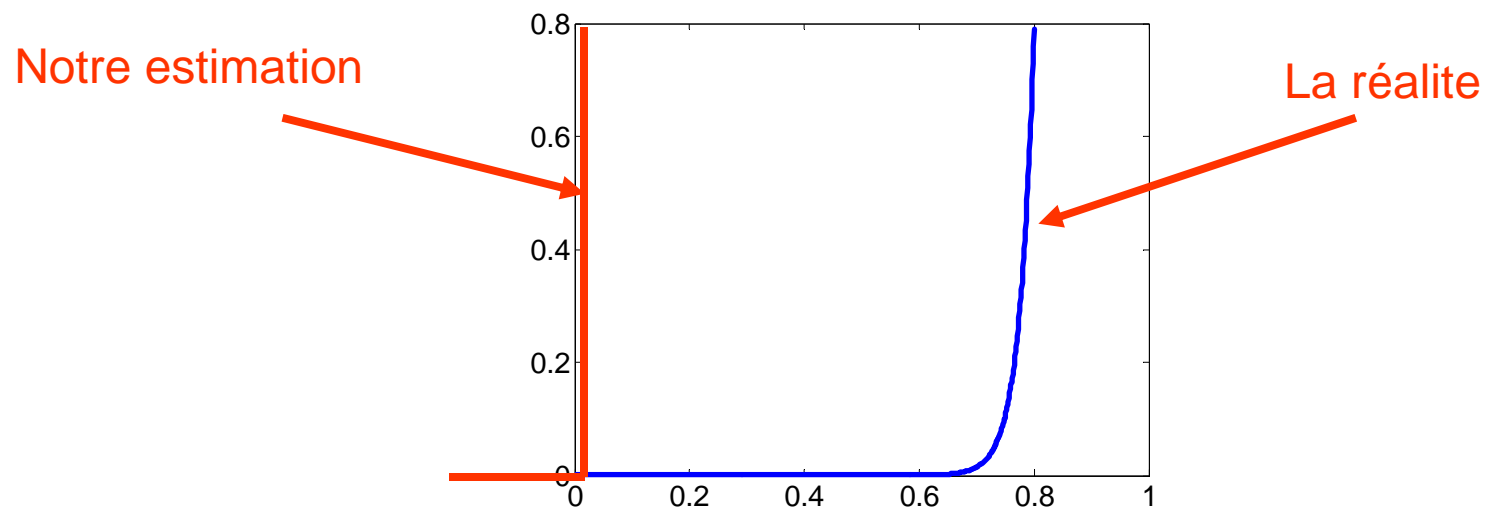
Application du clamping

- On passe ce circuit dans un redresseur avec capacité:
 - Ça donne une tension de $2V_{DD}$



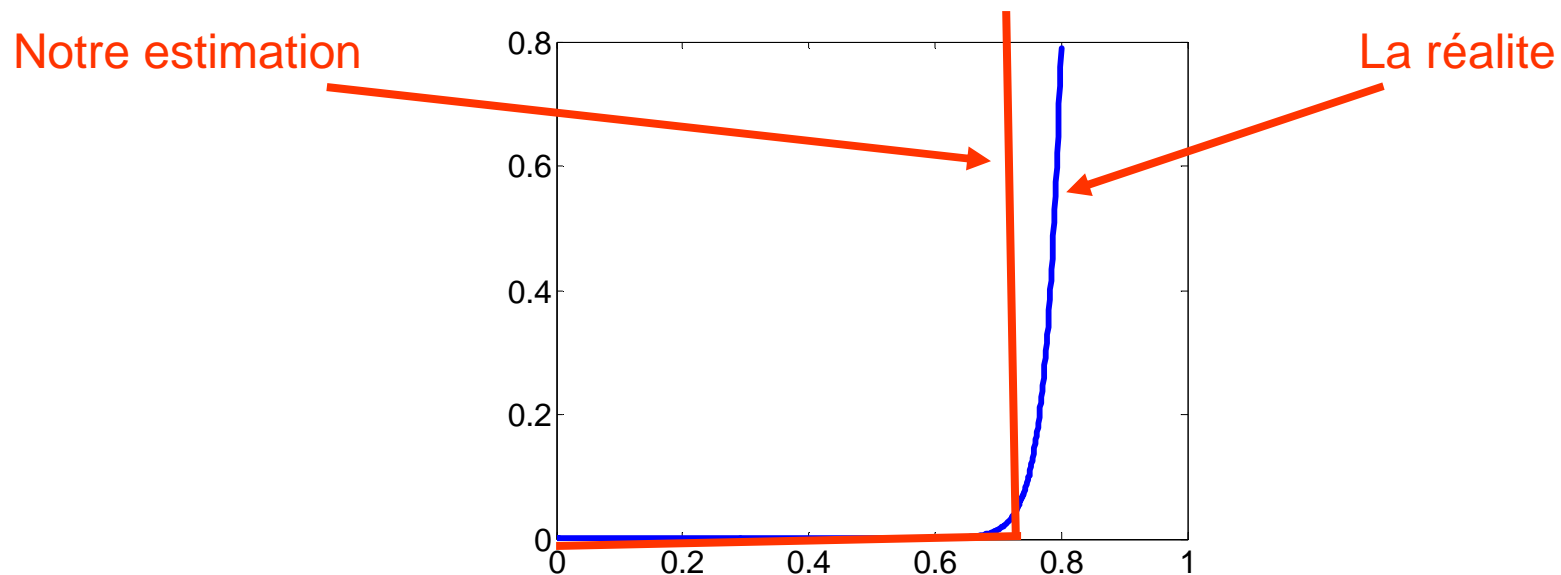
Modèle “plus réel”

- On approxime le comportement d’une diode avec un commutateur:
 - Quand la tension est positive, ça donne un court-circuit
 - Quand la tension est 0 ou négative, ça donne un circuit ouvert



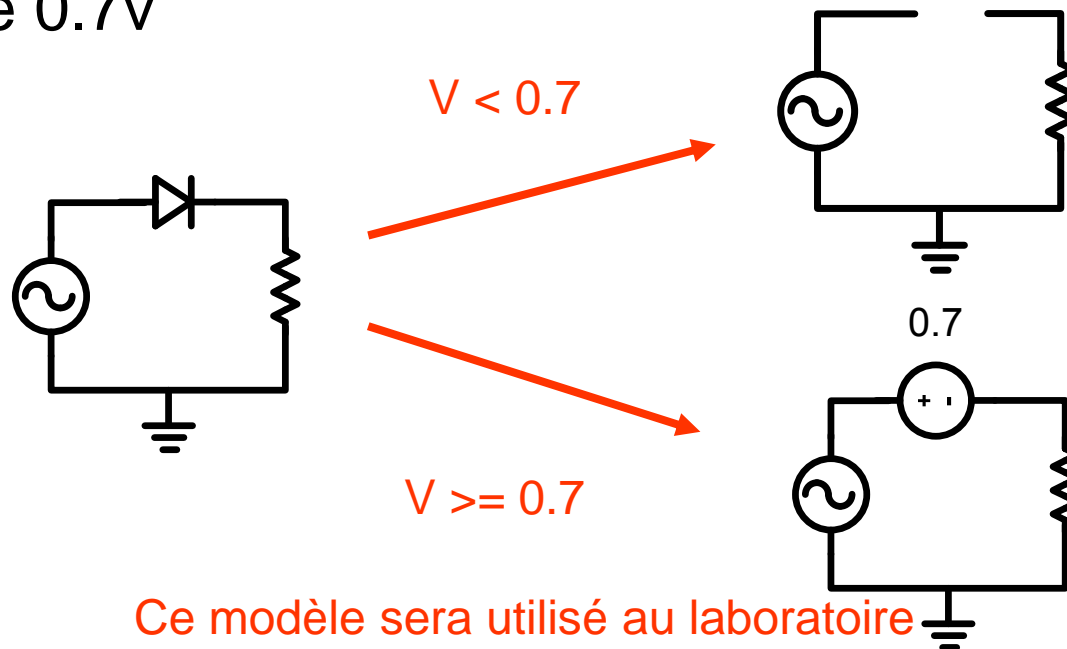
Modèle “plus réel”

- Pour mieux approximer la fonction, on pourrait “déplacer” la ligne verticale
 - On estime que ça prend une tension de 0.7 pour que ça conduise



Modèle “plus réel”

- Comment s’en sert-on?
 - Quand ça ne conduit pas, c’est un circuit ouvert
 - Quand ça conduit, il y a une chute de 0.7v
 - Quand ça conduit, on approxime avec une source de 0.7v



Ce modèle sera utilisé au laboratoire