

Traitement de l'information analogique

Chapitre 3 : La diode

Corinne Berland

Une école de

 CCI PARIS ILE-DE-FRANCE
EDUCATION

 Université
Gustave Eiffel

► Chapitre 1 : Montages en régime sinusoïdal établi

1. Les sources sinusoïdales
2. Régime établi et notation complexe
3. Les phaseurs – relation avec les éléments passifs
4. Lois de Kirchhoff en régime établi
5. Fonctions de transfert
6. Diagrammes de Bode : 1er ordre
7. Fonctions de filtrage

► Chapitre 2 : l'amplificateur opérationnel

1. L'amplificateur opérationnel : principe
2. Fonctionnement en amplificateur
3. Fonctionnement en oscillateur
4. Fonctionnement en comparateur

► **Chapitre 3 : La diode**

1. Le fonctionnement de la diode PN
2. Modèles équivalents de la diode
3. Circuits élémentaires

► Chapitre 4 : le transistor bipolaire

1. Le fonctionnement du transistor
2. Modèle équivalent petit signal du transistor
3. L'amplificateur à transistor bipolaire
4. Le transistor bipolaire en commutation

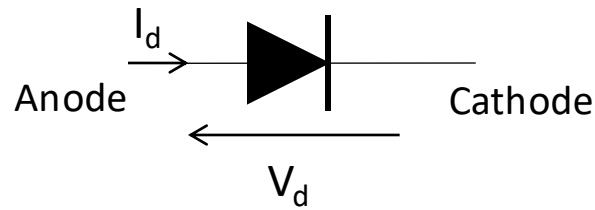
- ▶ La diode est un élément fondamental en électronique
 - Elle est un composant essentiel pour réaliser des alimentations continues
 - ✓ Passer du 200Volt au 12 volt continu
 - ✓ Régulateur de tension : diode Zener
 - Elle permet de mesurer la puissance d'un signal
 - ✓ Elle récupère l'amplitude d'un signal
 - ❖ Dans tous les téléphones portables
 - C'est un composant essentiel dans les systèmes de communication
 - La diode est une des « briques » du transistor
- ▶ Il existe plusieurs types de diodes : LED, Diode PN, diode Schottky,....

1. Le fonctionnement de la diode PN

► La diode est une jonction PN

- C'est un dipôle électrique avec une anode et une cathode

- ✓ Le courant va de l'anode vers la cathode
- ✓ La diode est en convention récepteur

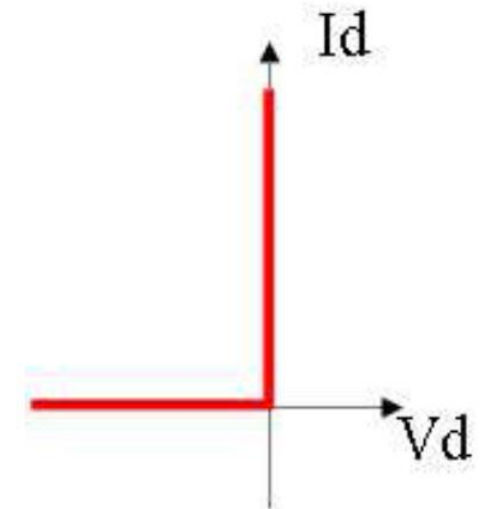


- ✓ I_d est le courant qui traverse la diode, V_d est la tension à ses bornes

- Son fonctionnement théorique est le suivant :

- ✓ Pour $V_d < 0$, $I_d = 0$, la diode est un circuit ouvert : le courant ne passe pas
- ✓ Pour $V_d > 0$, la diode est un court circuit, le courant passe à travers la diode

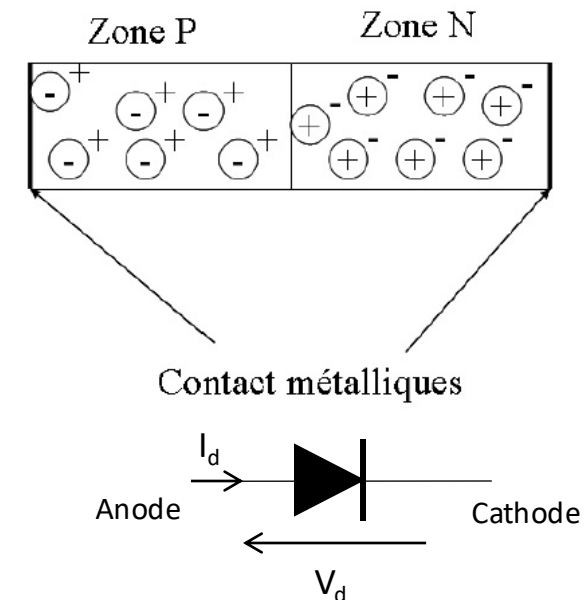
- La diode est un commutateur ouvert/fermé commandé par la tension V_d



1. Le fonctionnement de la diode PN

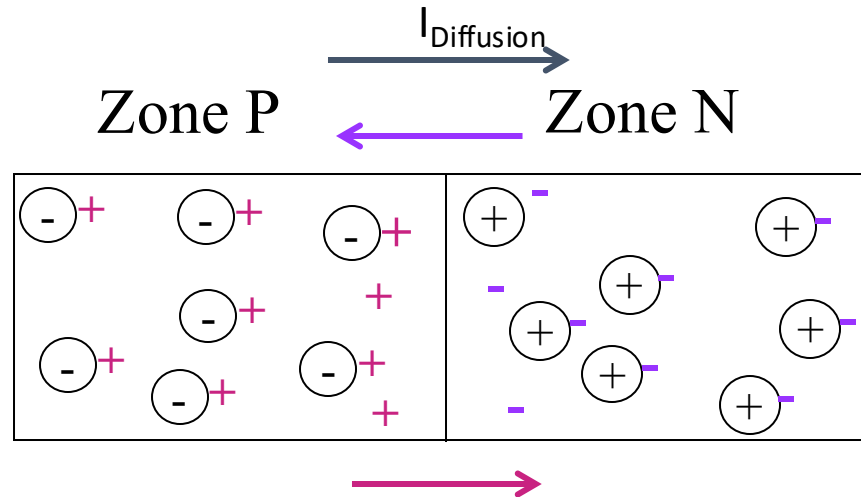
► La diode PN est constituée :

- D'un semiconducteur dopé P, avec des ions négatifs, électriquement neutre
- D'un semiconducteur dopé N, avec des ions positifs, électriquement neutre
- Les deux semiconducteurs sont accolés



1. Le fonctionnement de la diode PN

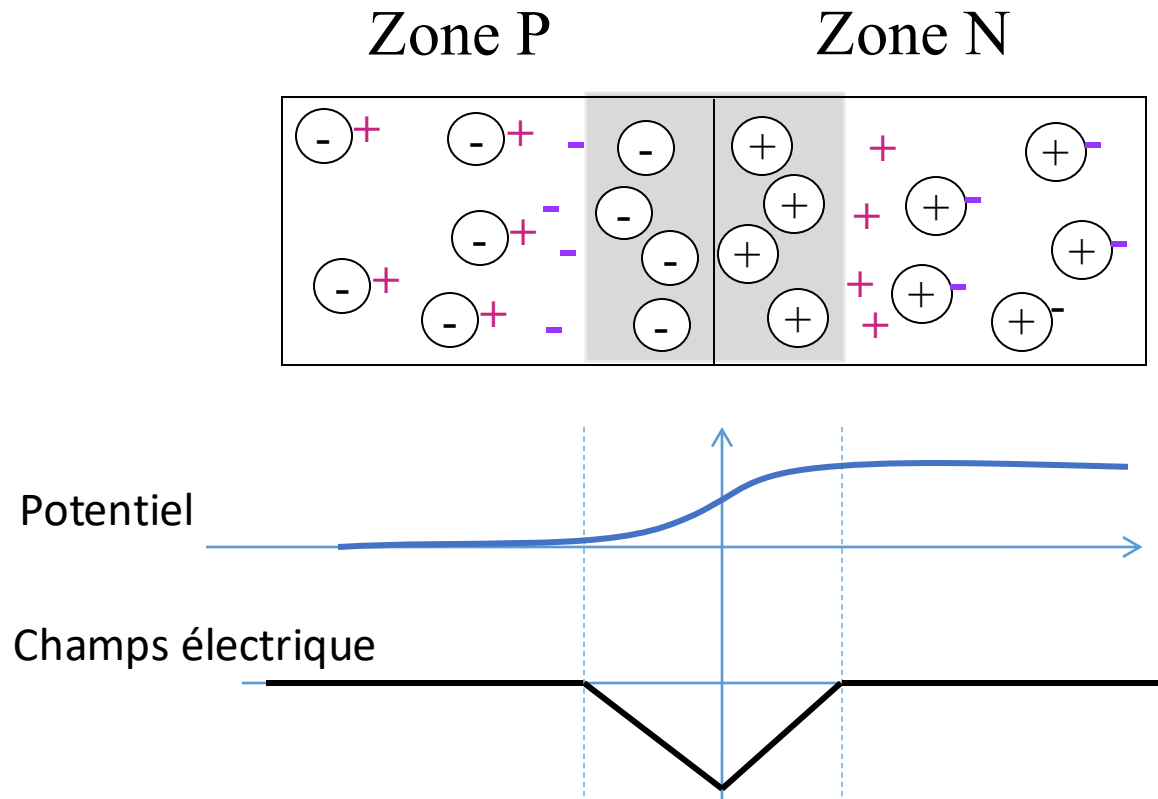
- ▶ Que se passe t'il lorsque l'on accole les deux semiconducteurs ?
 - La diode est à l'équilibre : il n'y a pas de tension appliquée à ses bornes
 - Il se crée un courant de diffusion



- ✓ Les électrons et les trous se répartissent uniformément dans le semiconducteur
 - ❖ Il se crée une zone dans laquelle il n'y a plus de porteurs libres : zone déplétée

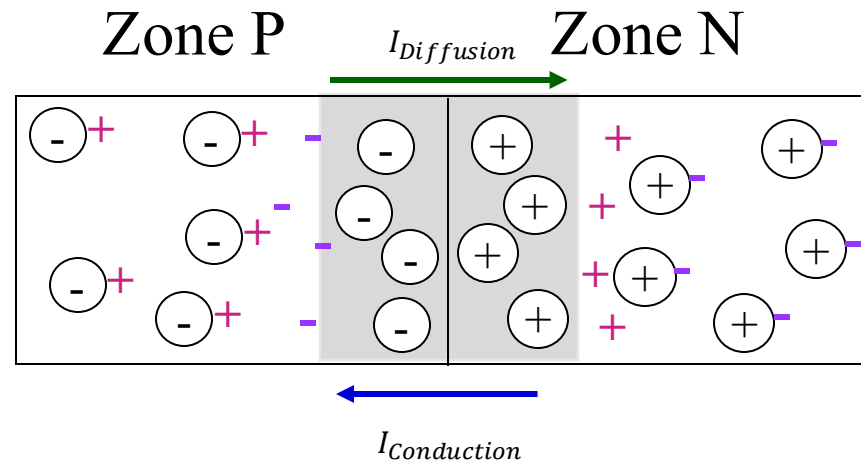
1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ Que se passe t'il lorsque l'on accole les deux semiconducteurs ?
 - Il y a alors création d'un champs électrique dans cette zone



1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ Que se passe t'il lorsque l'on accole les deux semiconducteurs?
 - Le champs électrique dans la zone déplétée s'oppose au courant de diffusion
- ✓ Il y a création d'un courant de conduction en sens inverse
 - ❖ Le champs électrique fait se déplacer les électrons et les trous dans l'autre sens



1. Le fonctionnement de la diode PN

► Que se passe t'il lorsque l'on accole les deux semiconducteurs?

- Au bout d'un moment il y a stabilisation des deux courants

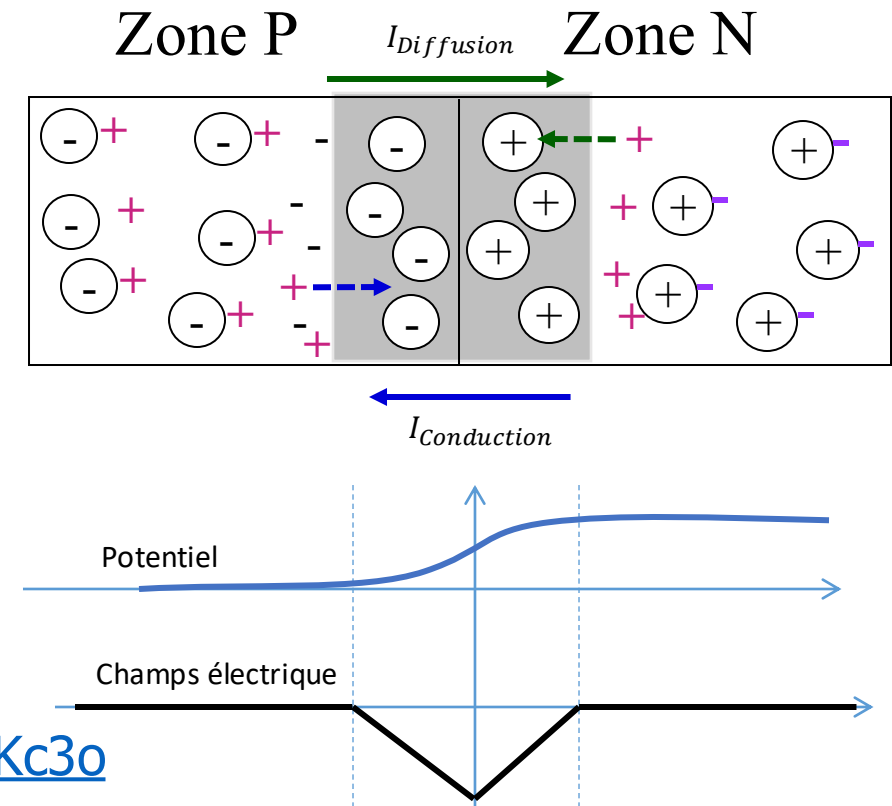
✓ $I_{Conduction} = I_{Diffusion}$

- ✓ Il n'y a pas de courant qui traverse la diode

❖ $I_d = 0$

- Lien vidéo

✓ https://www.youtube.com/watch?v=ll313_OKc3o



1. Le fonctionnement de la diode PN

► L'utilisation de la diode PN : on lui applique une tension extérieure

- Que se passe t'il si la tension qu'on lui applique est une tension inverse ?

✓ $V_d < 0$

- La tension inverse vient favoriser le courant de conduction

✓ La zone déplétée s'élargie, le champs électrique augmente.

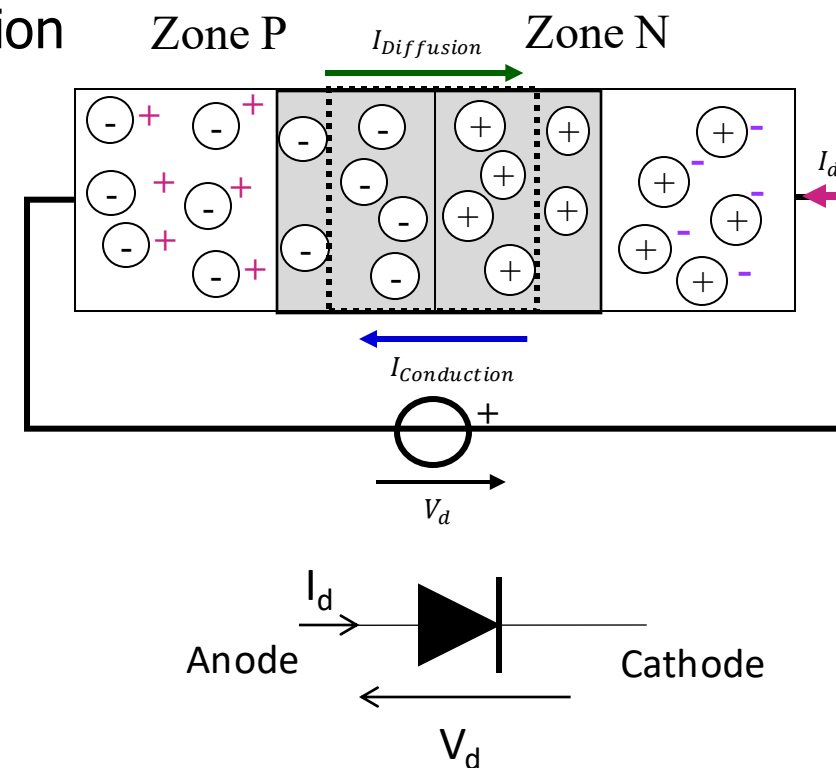
✓ Plus la tension augmente, plus la zone déplétée s'élargie

✓ Le courant I_d reste nul

- La diode se comporte comme un condensateur

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{\left(1 + \frac{V_D}{\phi_0}\right)^m}}$$

○ $m=1/2$ ou $1/3$



1. Le fonctionnement de la diode PN

► L'utilisation de la diode PN : on lui applique une tension extérieure

■ Et si la tension inverse qu'on lui applique est trop forte ?

✓ Il se passe un phénomène de claquage de la jonction

- ❖ Le champ électrique augmente dans la zone déplétée
- ❖ Un fort courant I_D inverse se crée

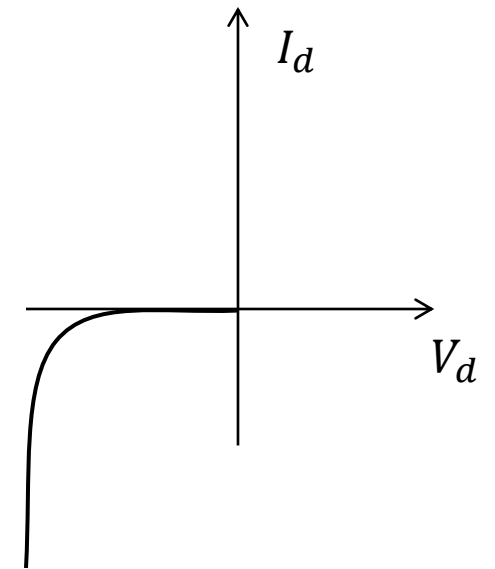
✓ Il y a deux effets qui génèrent ce courant: l'un est destructif, l'autre non

❖ Effet Zener : pour une diode courte

- Le champ électrique est très fort dans la zone déplétée
- Les électrons sont arrachés de la bande de valence, le courant circule
- Non destructif car l'effet est voulu :
 - on stabilise la tension aux bornes à une valeur voulue.

❖ Effet d'avalanche : pour une diode longue

- Il y a accélération des électrons avec le champ électrique
- Il rentre en collision avec des ions : il y a alors ionisation des atomes du cristal par choc
- Ce qui entraîne la libération de paires électron/trou
- Le phénomène est destructif



1. Le fonctionnement de la diode PN

► L'utilisation de la diode PN : on lui applique une tension extérieure

- Que se passe t'il si la tension qu'on lui applique est une tension directe ?

✓ $V_D > 0$

- La tension vient favoriser le courant de diffusion

✓ La zone déplétée diminue

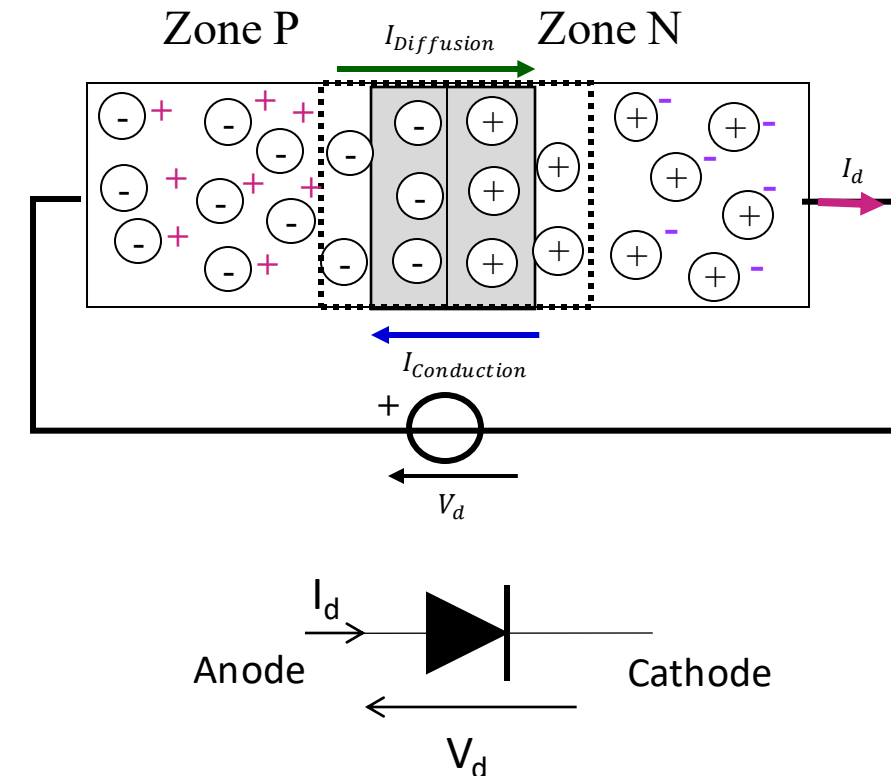
✓ Le champ électrique devient moins fort

✓ Il ne s'oppose plus au passage des porteurs

✓ Au-delà d'un certain seuil, le courant se met à circuler

❖ $V_d > V_{seuil} \approx 0.6V$

❖ $I_d > 0$



1. Le fonctionnement de la diode PN

- L'utilisation de la diode PN : on lui applique une tension extérieure
 - Que se passe t'il si la tension qu'on lui applique est une tension directe ?

✓ Pour $V_d > V_{\text{seuil}}$: $I_d > 0$

✓ L'expression du courant est donnée par la loi de Shockley

$$I_D = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right]$$

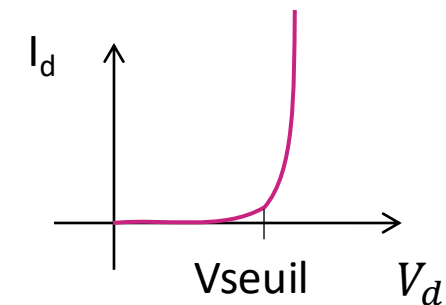
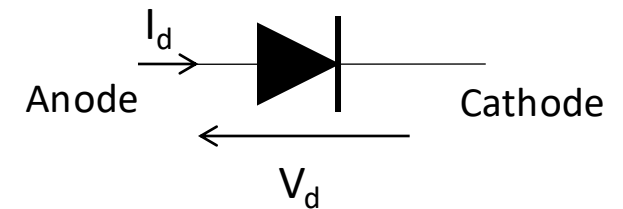
✓ Avec :

❖ $V_T = \frac{KT}{q} \approx 26\text{mV}$: tension Thermique

○ $K = 1.38e^{-23}\text{J/K}$: la constante de Boltzmann

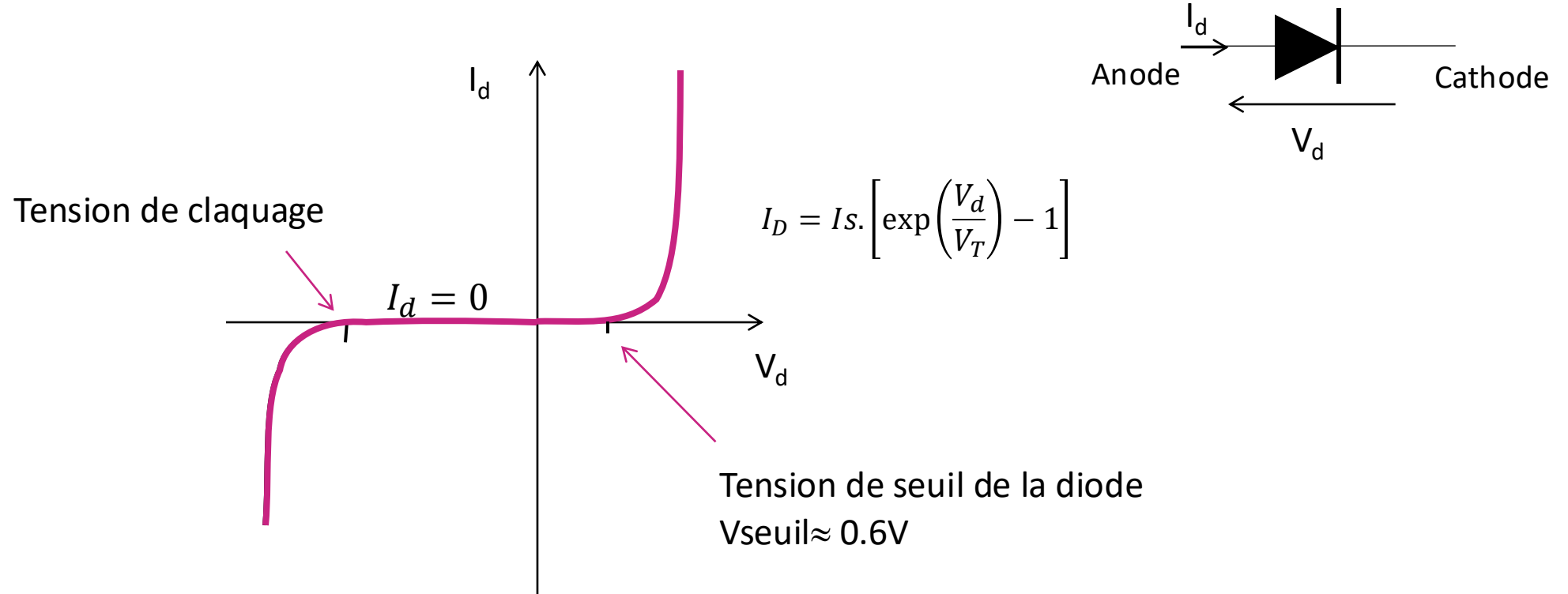
○ $q = 1.6e^{-19}\text{C}$: la charge d'un électron

○ $T = 290\text{K}$: la température en Kelvin ici à $16,85^\circ\text{C}$



1. Le fonctionnement de la diode PN

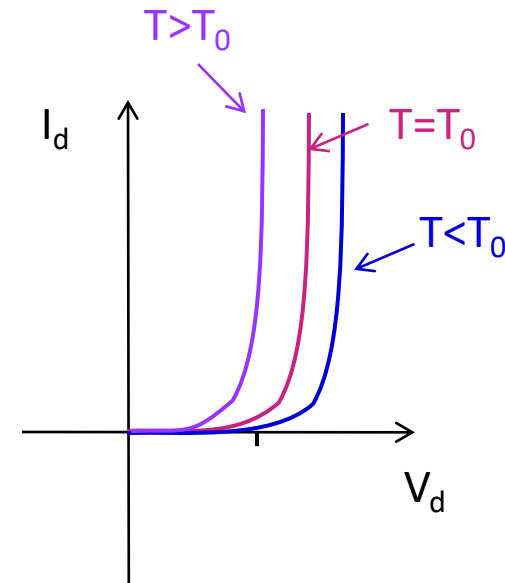
- La diode PN a donc la caractéristique suivante : $I_D = f(V_D)$



1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ Attention : la caractéristique de la diode varie en fonction de la température
 - Cette variation est très stable et connue

$$\left. \frac{\partial V_d}{\partial T} \right|_{I_D = cte} = -2mV/Kelvin$$

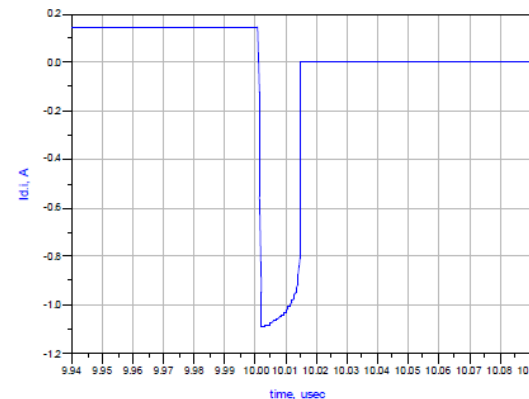
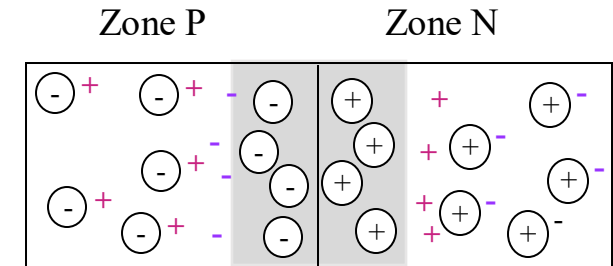


- On utilise la diode pour faire des mesures de température

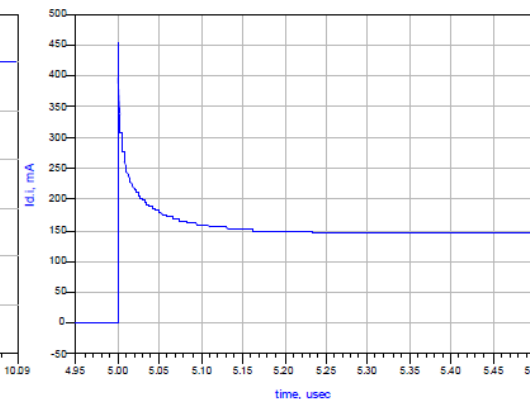
1. Le fonctionnement de la diode PN

► Que se passe t'il si on passe trop vite d'une polarisation directe à une polarisation inverse (et vice versa) ?

- On cherche à faire commuter la diode : « on », « off »
 - ✓ Passante ou bloquée
- La diode ne peut pas changer d'état instantanément
 - ✓ Diode « on » : accumulation de charge minoritaire dans chaque région et circulation des porteurs
 - ✓ Diode « off » : les charges minoritaires « retournent » dans leur région pour que la diode retrouve un état d'équilibre
- Cela va mettre un certain temps : cela s'appelle le temps de recouvrement
 - ✓ la diode ne fonctionne plus en diode



Temps de recouvrement inverse



Temps de recouvrement direct

2. Modèles équivalents de la diode

► Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

✓ On prend un circuit simple avec un générateur, une résistance et une diode

■ Les équations qui régissent le montage sont les suivantes :

✓ La loi des maille : $E = V_{d1} + R \cdot I_{d1}$

✓ L'équation de Shockley : $I_{d1} = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{d1}}{V_T}\right) - 1 \right]$

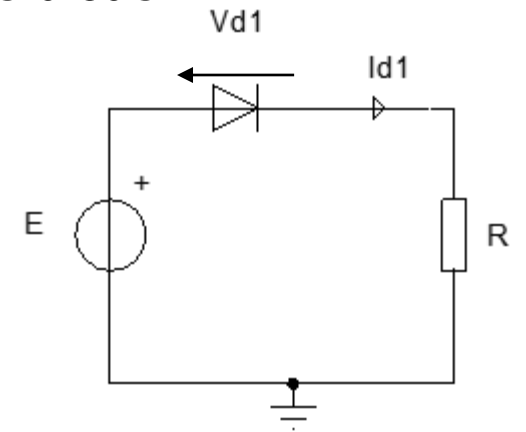
■ Si on remet la seconde équation dans le première , nous obtenons :

$$E = V_T \ln\left(\frac{I_{d1}}{I_s} + 1\right) + R I_{d1}$$

✓ Cette équation n'a pas de solution analytique !!!! Comment faire ?

❖ Première hypothèse : $V_d = V_{seuil} \approx 0,6 V$

❖ L'équation devient : $E = V_{d1} + R \cdot I_{d1}$



2. Modèles équivalents de la diode

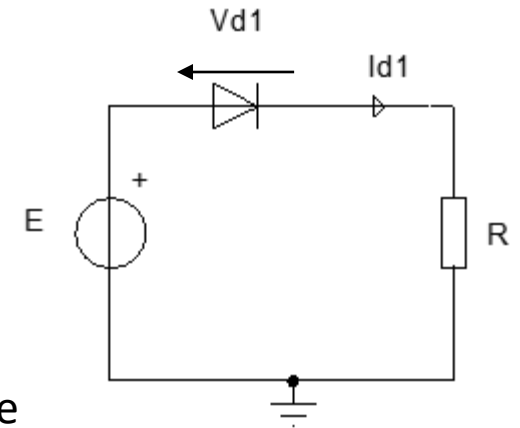
► Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

■ Deuxième solution : la résolution graphique

✓ Le courant et la tension répondent aux deux équations

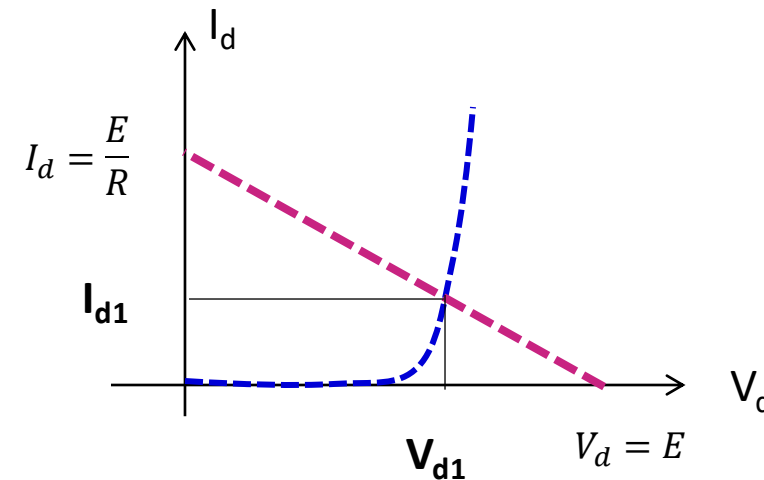
❖ On trace les deux équations dans un repère $I_D = f(V_D)$

- L'intersection des deux courbes donne les valeurs de V_{D1} et I_{D1}
 - C'est ce que l'on appelle le point de fonctionnement du montage



$$E = V_d + R \cdot I_d$$

$$I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right]$$



2. Modèles équivalents de la diode

► Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

- Troisième solution : on utilise un modèle équivalent par approximation de sa caractéristique
- On identifie deux parties sur la caractéristique

✓ En dessous de la tension V_{d0} , il n'y a pas de courant

❖ La diode est un circuit ouvert

✓ Au dessus de la tension V_{d0} , la caractéristique est une droite

❖ Elle passe par le point ($V_d = V_{d0}, I_d = 0$)

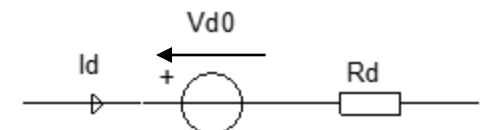
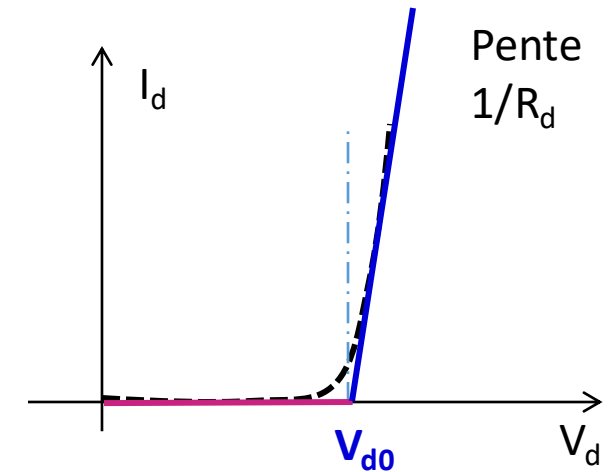
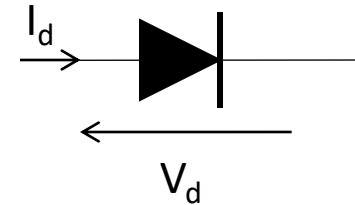
❖ Sa pente est homogène à l'inverse d'une résistance : $\frac{\Delta I_d}{\Delta V_d} = \frac{1}{R_d}$

❖ La relation entre le courant I_d et V_d pour $V_d \geq V_{d0}$ s'écrit:

$$I_d = \frac{V_d - V_{d0}}{R_d} \Leftrightarrow V_d = V_{d0} + R_d \cdot I_d$$

✓ On peut ainsi en déduire un modèle équivalent de la diode pour $V_d \geq V_{d0}$

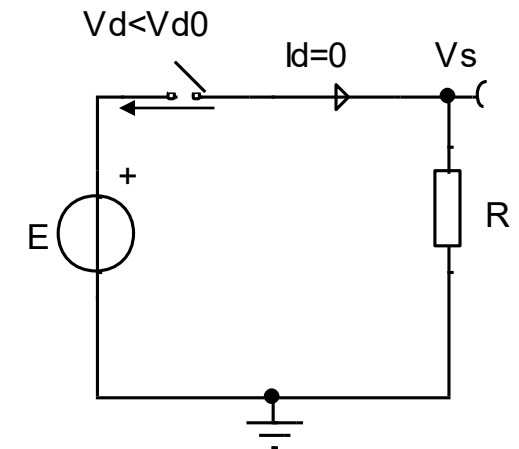
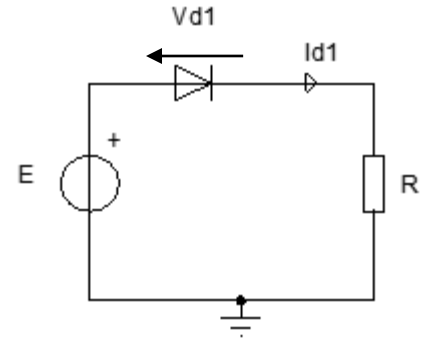
- C'est le modèle Grand Signal de la diode



2. Modèles équivalents de la diode

► Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

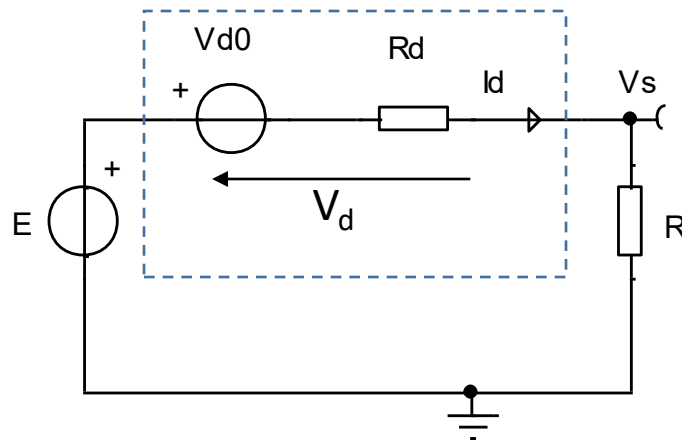
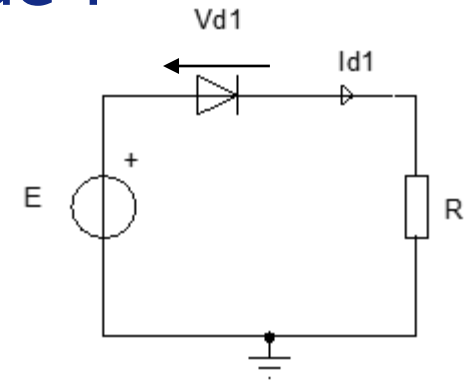
- On utilise le modèle grand signal pour calculer le montage
 - ✓ Comme la diode à deux modes de fonctionnement différents
 - ❖ il faut donc faire deux sous-circuits : diode bloquée ou diode passante
 - ✓ Il faut donc savoir quand elle est bloquée ou quand elle est passante
 - ❖ La loi des mailles sur le circuit est : $E = V_d + R \cdot I_d$
- On cherche la valeur de E qui fait que la diode devient passante
 - ✓ On commence par prendre $E = 0$
 - ❖ Il n'y a pas de tension dans le circuit
 - ❖ Il n'y a pas de courant
 - ✓ L'équation de la maille est donc : $E = V_d$
 - ✓ La diode ne deviendra passante que pour $V_d \geq V_{d0}$
 - ✓ Donc tant que $E < V_{d0}$, la diode reste bloquée et $I_d = 0$



2. Modèles équivalents de la diode

► Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

- la diode devient passante pour $E \geq V_{d0}$
 - ❖ On remplace alors la diode par son schéma équivalent
 - ❖ on fait le calcul du montage
 - Il suffit d'appliquer une loi des mailles



$$E = V_{d0} + R_d \cdot I_d + R \cdot I_d$$

$$\Rightarrow I_d = \frac{E - V_{d0}}{R_d + R}$$

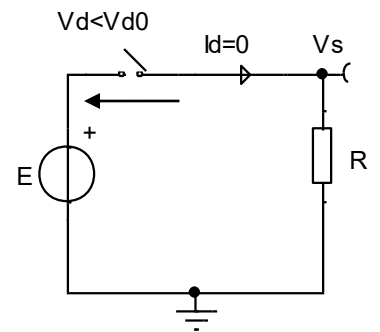
$$\Rightarrow V_S = R I_d = R \frac{E - V_{d0}}{R_d + R}$$

2. Modèles équivalents de la diode

► Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

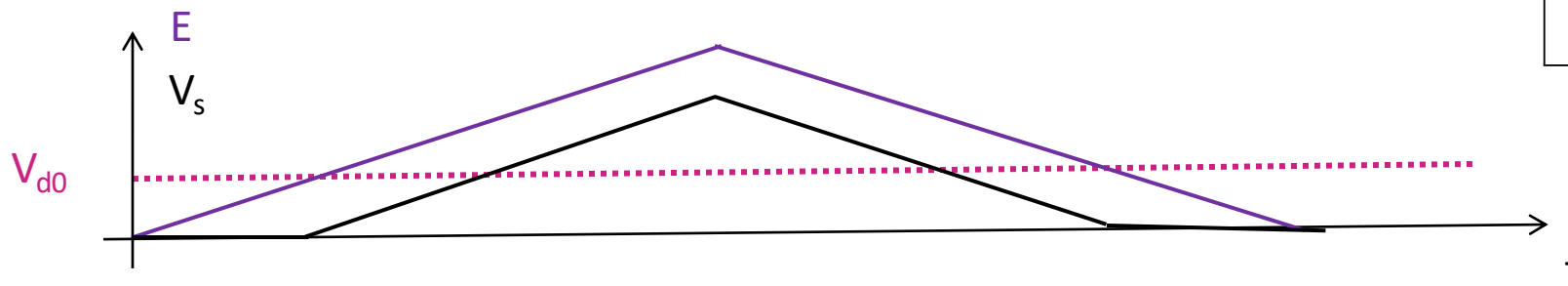
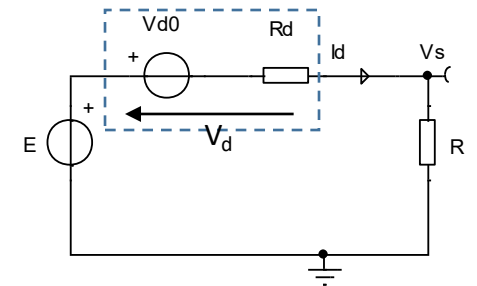
- On obtient deux modes de fonctionnement du montage

✓ Tant que : $E < V_{d0}$, $I_d = 0$ et $V_s = 0$



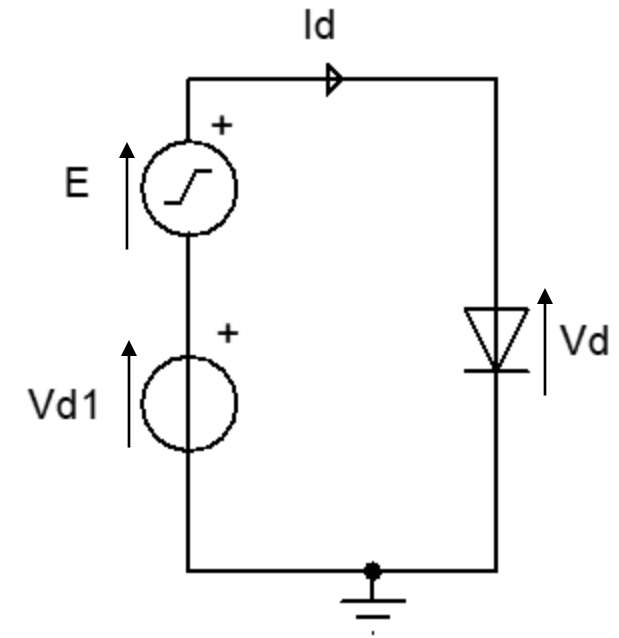
✓ Pour $E \geq V_{d0}$, le courant circule dans le montage et l'équation devient :

$$I_d = \frac{E - V_{d0}}{R_d + R} \Rightarrow V_s = R \cdot I_d = R \frac{E - V_{d0}}{R_d + R}$$



2. Modèles équivalents de la diode

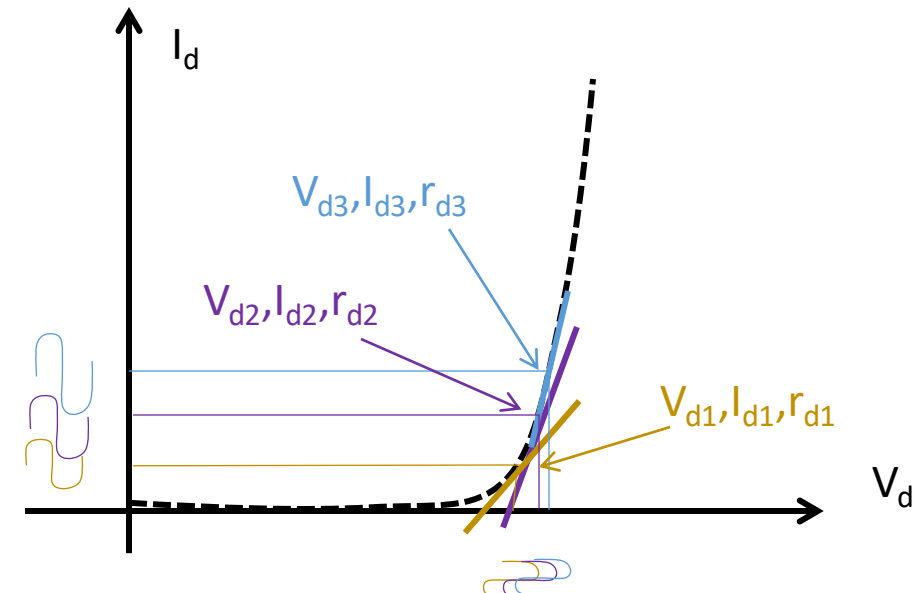
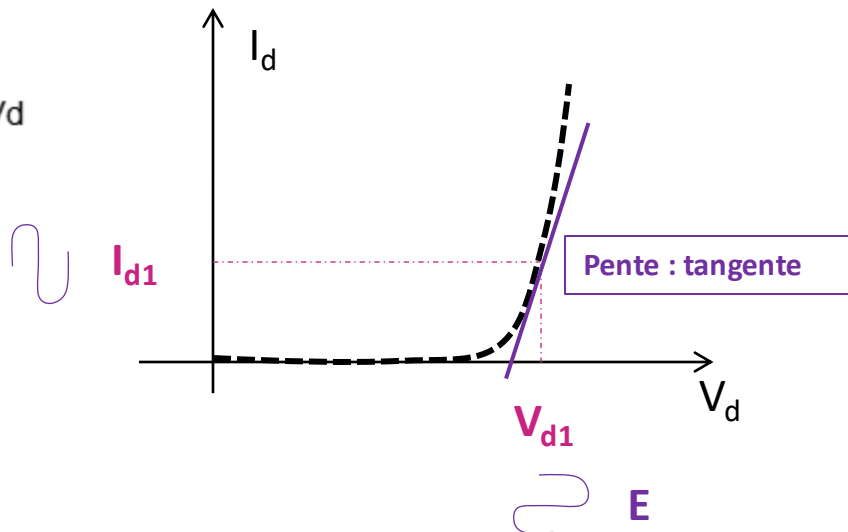
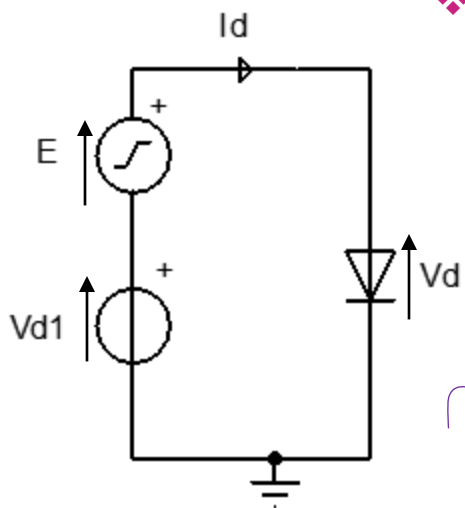
- ▶ Il existe un autre modèle pour la diode quand l'amplitude du signal sur V_d est de petite amplitude
 - ✓ L'approximation du fonctionnement sur la grande caractéristique n'a plus de sens
 - ✓ **C'est un modèle dit petit signal** (amplitude petite)
- Le signal ici varie autour d'une valeur continue V_{d_1}
 - ✓ On dit que la diode est polarisée
 - ❖ La tension de polarisation est telle que $V_{d_1} > V_{d_0}$
 - ❖ Un courant continu circule dans la diode : I_{d_1}
 - ❖ On appelle point de polarisation les valeurs (V_{d_1}, I_{d_1})
- Un signal sinusoïdal E de faible amplitude est rajouté
 - ✓ $V_d = E + V_{d_1}$



2. Modèles équivalents de la diode

► Le modèle petit signal de la diode

- ✓ La diode dans ce cas est toujours passante
- ✓ La linéarisation de la diode cette fois-ci de fait au niveau du point de polarisation
 - ❖ On calcule la tangente au point de polarisation pour trouver la résistance équivalente
 - Attention : la valeur de la tangente varie beaucoup en fonction du points de fonctionnement



2. Modèles équivalents de la diode

► Le modèle petit signal de la diode

- On reprend l'équation de Shockley pour calculer la résistance équivalente du modèle

- ✓ On approxime l'équation puisque : $\exp\left(\frac{V_{d1}}{V_T}\right) \gg 1$

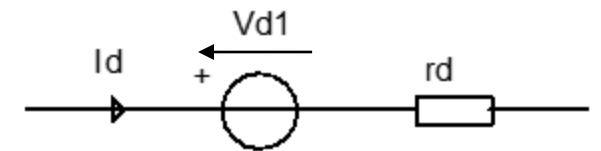
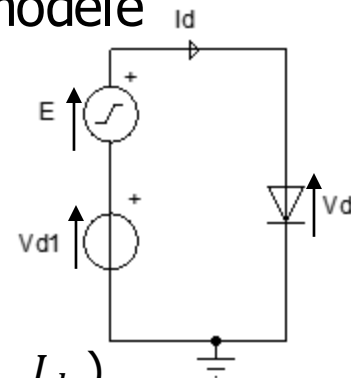
$$I_d = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \approx I_s \cdot \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right)$$

- ✓ La pente au point de fonctionnement se calcule avec la dérivée de l'équation au point (V_{d1}, I_{d1}) .
 - ❖ La pente est homogène à une conductance

$$\left. \frac{\partial I_d}{\partial V_d} \right|_{(V_{d1}, I_{d1})} = \frac{I_s}{V_T} \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) \bigg|_{(V_{d1}, I_{d1})} \approx \frac{I_{d1}}{V_T} = \frac{1}{r_d}$$

- ✓ On en déduit alors le modèle équivalent petit signal de la diode :

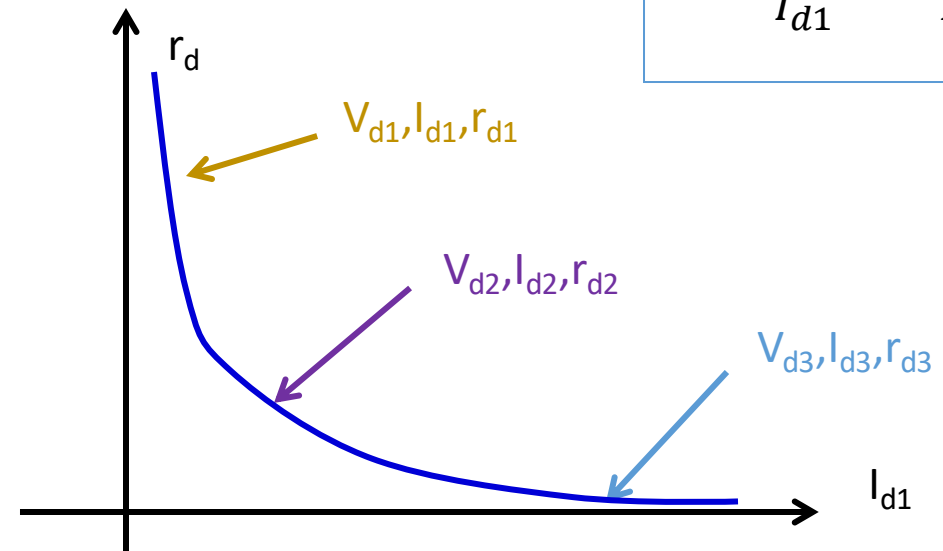
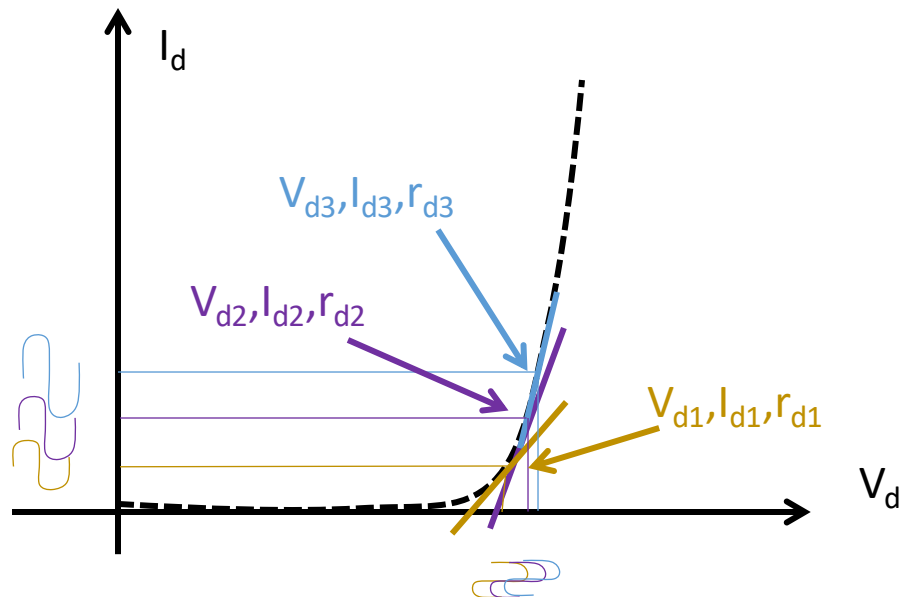
$$V_d = V_{d1} + r_d \cdot I_d$$



2. Modèles équivalents de la diode

► Le modèle petit signal de la diode

- Si l'on trace la valeur de la résistance équivalente en fonction de la tension V_d
 - ✓ On observe qu'elle est très importante quand le point de polarisation est proche de V_{d0}
 - ✓ Qu'elle est très faible quand le point de polarisation augmente

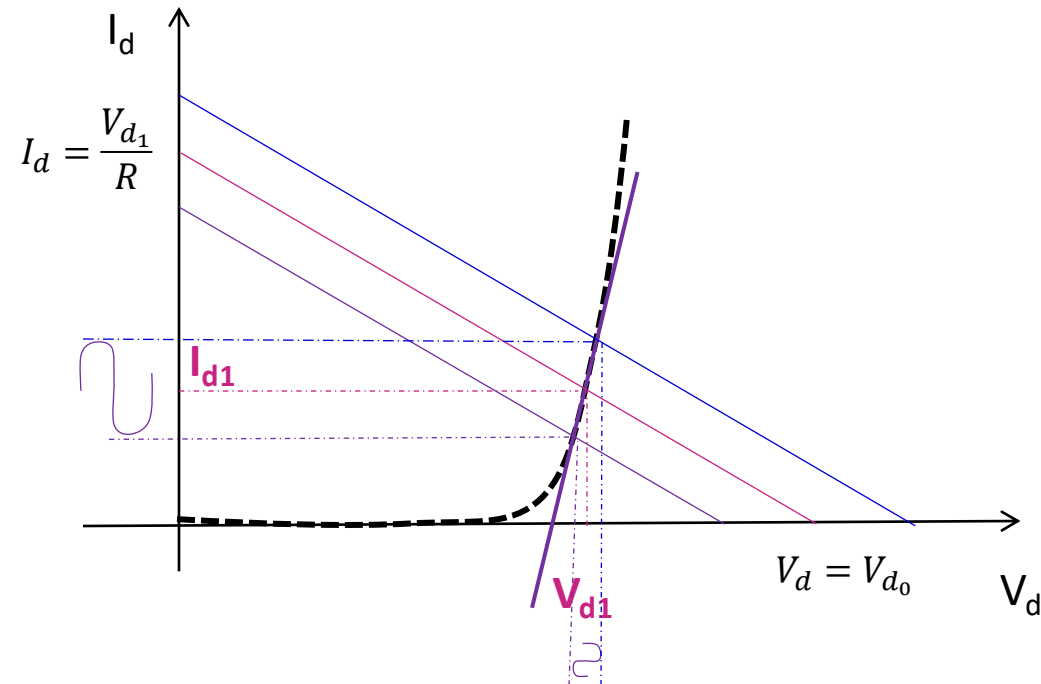
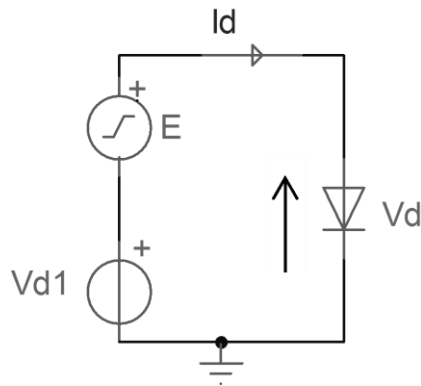


$$r_d = \frac{V_T}{I_{d1}} = \frac{26 \cdot e^{-3}}{I_{d1}}$$

2. Modèles équivalents de la diode

► Le modèle petit signal de la diode

- Le modèle petit signal fonctionne pour des amplitudes de signaux « petites
- ✓ Il faut donc faire attention à ne pas dépasser une certaine amplitude pour que le modèle reste acceptable



3. Circuits élémentaires

► Montages classiques

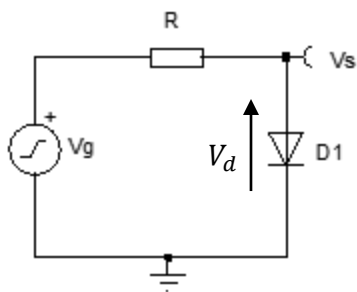
- La limitation de tension
- Le redressement mono alternance
- Le redressement double alternance
- La stabilisation de tension
- Élévation de tension

3. Circuits élémentaires

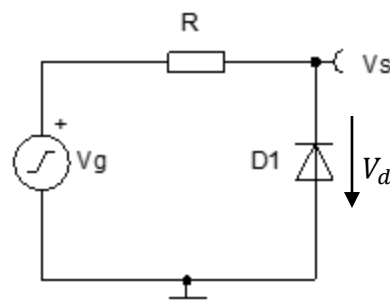
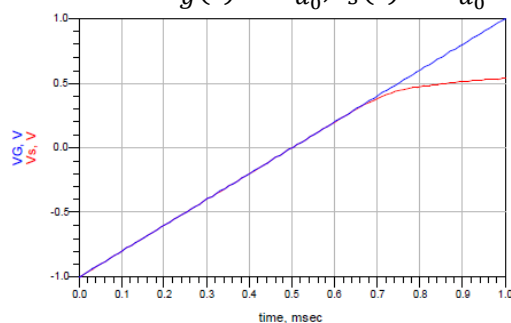
► Les circuits simples de limitation de tension

- Lorsque la diode est passante, sa tension se stabilise autour de V_{d0}

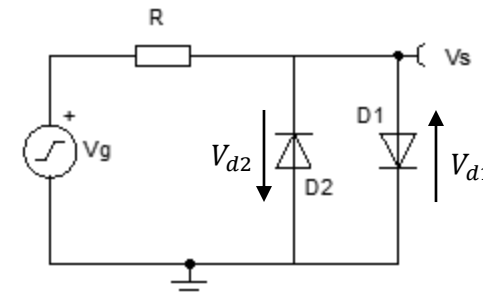
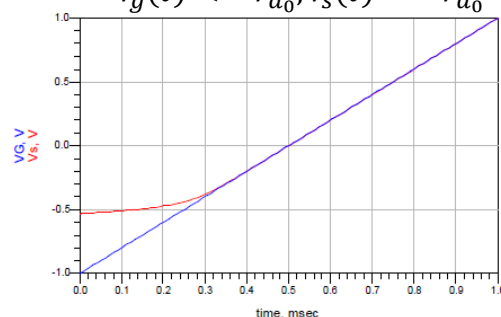
✓ La résistance R_d étant faible : $V_d(t) = V_{d0} + R_d \cdot I_d(t) \approx V_{d0}$



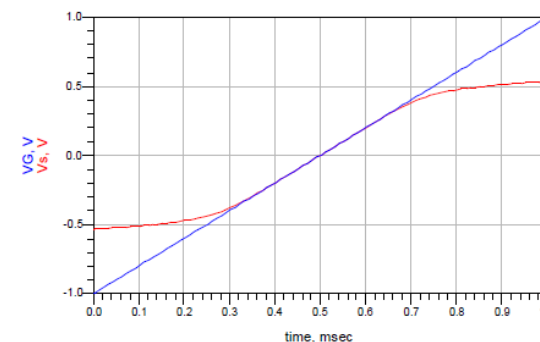
- $V_g(t) < V_{d0}, V_s(t) = V_g(t)$
- $V_g(t) \geq V_{d0}, V_s(t) \approx V_{d0}$



- $V_g(t) > -V_{d0}, V_s(t) = V_g(t)$
- $V_g(t) < -V_{d0}, V_s(t) \approx -V_{d0}$

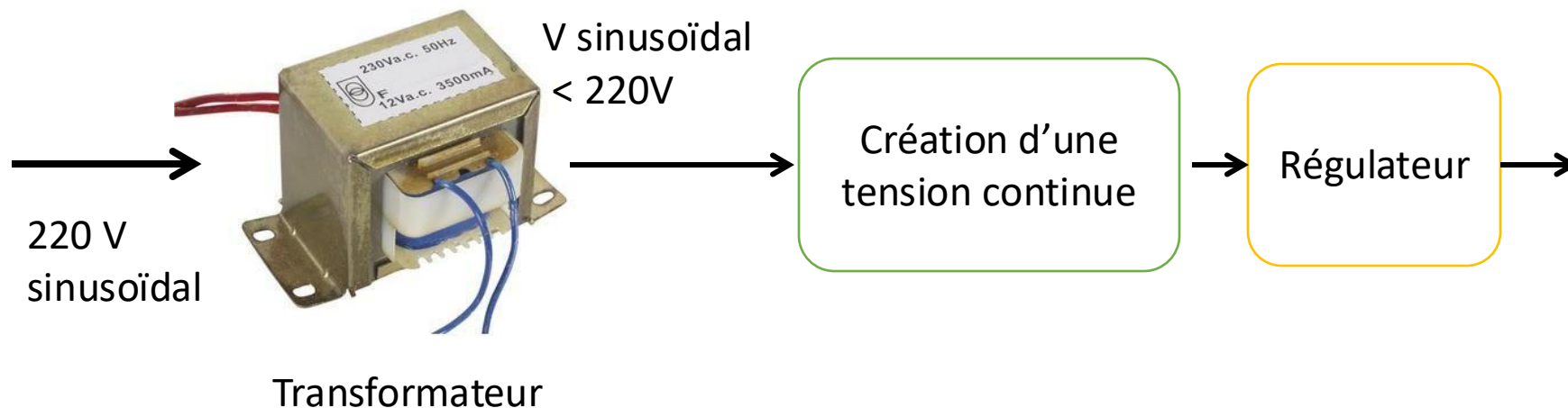


- $V_g(t) \geq V_{d0(D1)}, V_s(t) \approx V_{d0(D1)}$
- $-V_{d0(D2)} < V_g(t) < V_{d0(D1)}, V_s(t) = V_g(t)$
- $V_g(t) < -V_{d0(D2)}, V_s(t) \approx -V_{d0(D2)}$



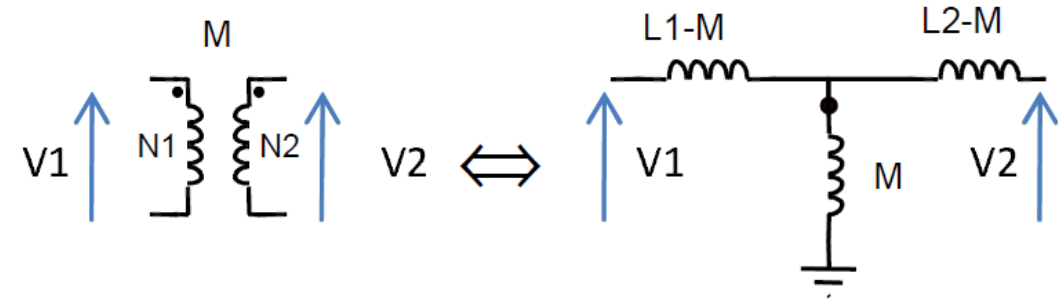
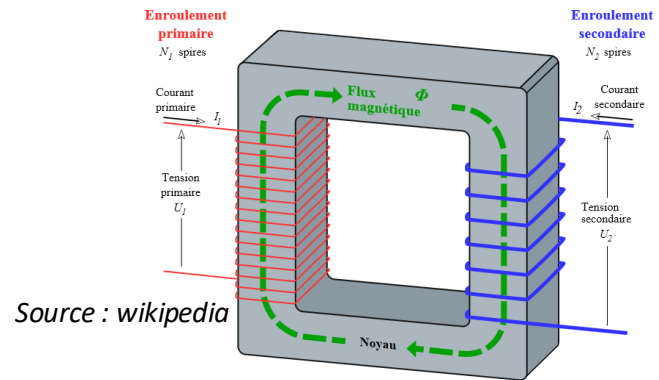
3. Circuits élémentaires

- ▶ Une des applications les plus courantes : le redressement de tension
 - Cela sert à la création d'alimentations continues à partir d'une tension alternative
 - ✓ Exemple : chargeur 12V à partir du 220V
 - Sert dans les systèmes électroniques pour la mesure de puissance



3. Circuits élémentaires

► Rappel (rapide) sur le transformateur



✓ Rapport de transformation : $n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$

✓ Inductance mutuelle : M

✓ Coefficient de couplage $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$, il vaut 1 si le couplage est parfait

- Pour la suite, on prendra un transformateur idéal parfait avec $N_1 = N_2$

✓ Ce qui nous permettra d'écrire : $V_1 = V_2$

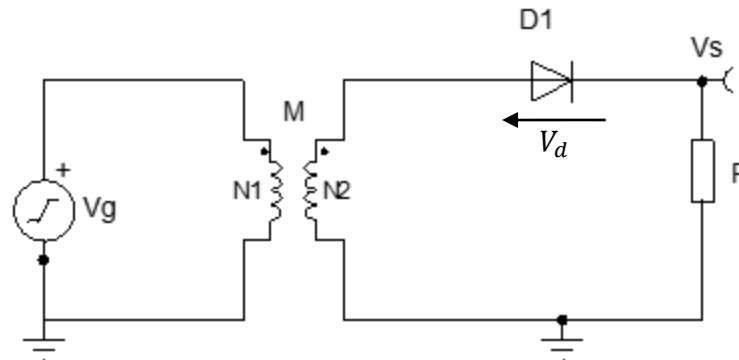
- Les transformateurs sont indiqués dans les schémas de principe

✓ Pour faire une alimentation, on prend des transformateurs pour aller du 220V à 24V , 12V....

3. Circuits élémentaires

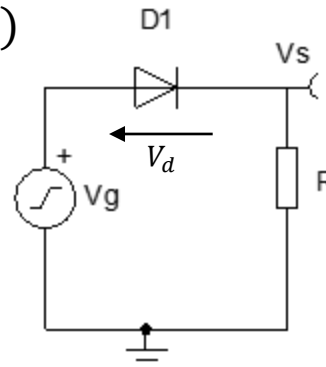
- ▶ 1^{er} circuit de redressement : le redressement monoalternance
 - Le circuit est simplement constitué d'une diode et d'une résistance

✓ Schéma de principe



✓ On simplifie le schéma en considérant le transformateur comme idéal

❖ On pose donc : $V_2(t) = V_g(t)$



3. Circuits élémentaires

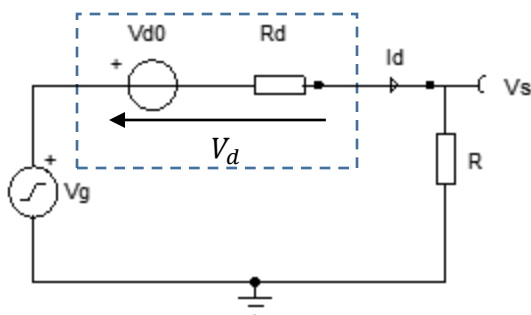
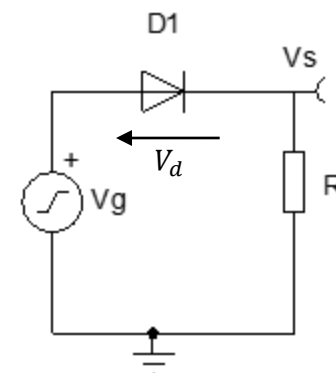
► 1^{er} circuit de redressement : le redressement monoalternance

- Le fonctionnement est le même que celui déjà étudié

✓ La diode est bloquée tant que la tension à ses bornes n'atteint pas V_{d0}

❖ Donc tant que : $V_g(t) < V_{d0}, V_s(t) = 0, I_d(t) = 0$

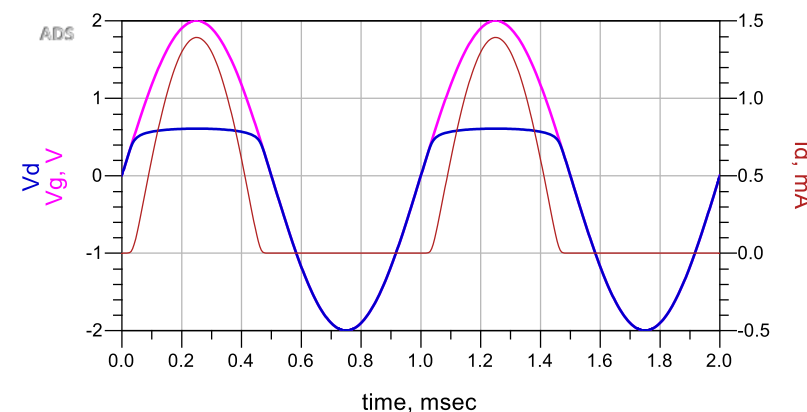
✓ Une fois la diode passante, on la remplace par son schéma équivalent



❖ Pour $V_g(t) \geq V_{d0}, I_d(t) = \frac{V_g - V_{d0}}{R + R_d}, V_s(t) = \frac{R}{R + R_d} (V_g(t) - V_{d0})$

✓ On ne récupère que les alternances positives

❖ Pour $V_g(t) \geq V_{d0}$



3. Circuits élémentaires

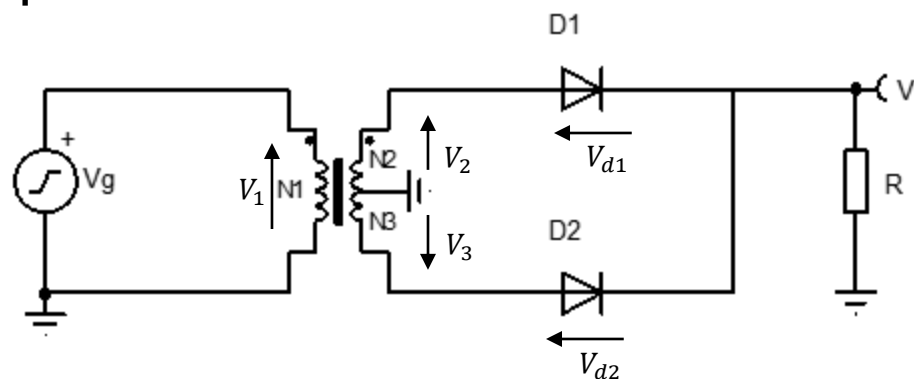
► 2nd circuit de redressement : le redressement double alternance

- Le circuit à deux diodes mises en sens opposées en sortie du transformateur

✓ Schéma de principe

❖ Avec un transformateur idéal

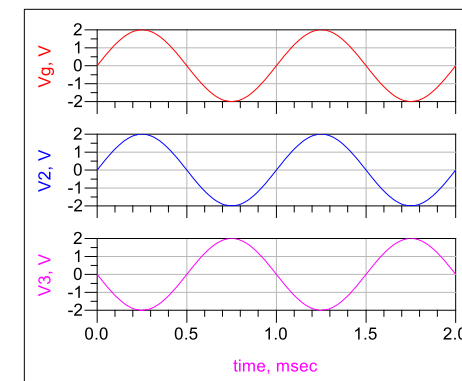
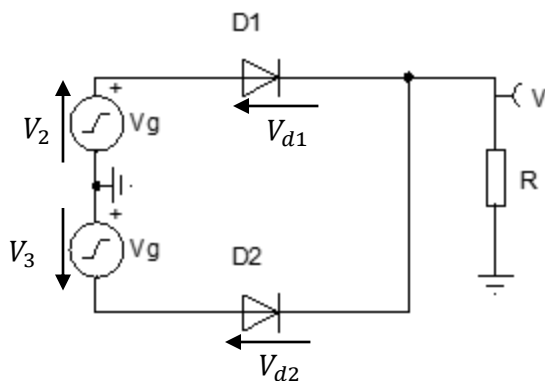
- $V_2(t) = V_1(t) = V_g(t)$
- $V_3(t) = -V_1(t) = -V_g(t)$
 - Attention au sens de V_3



- On simplifie le schéma en remplaçant le transformateur par deux générateurs

✓ La diode D_2 voit le générateur $-V_g(t)$

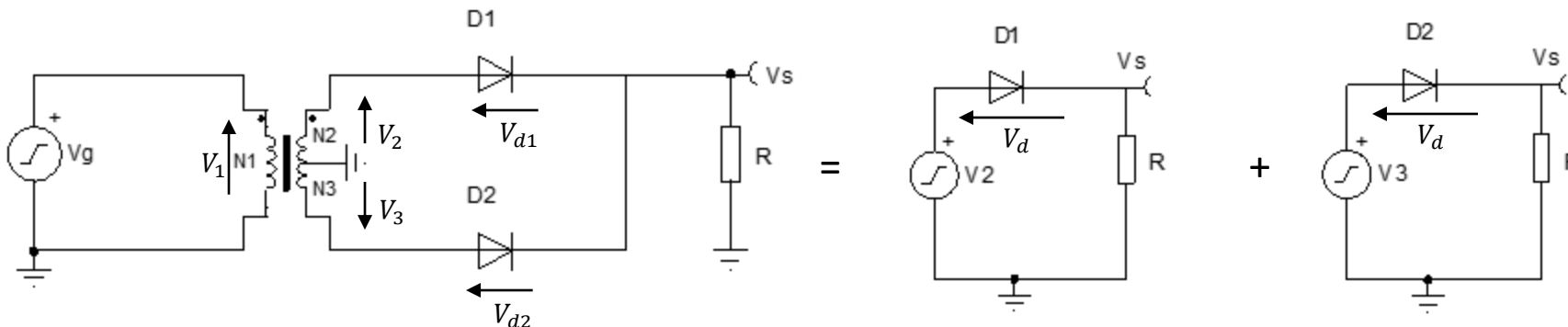
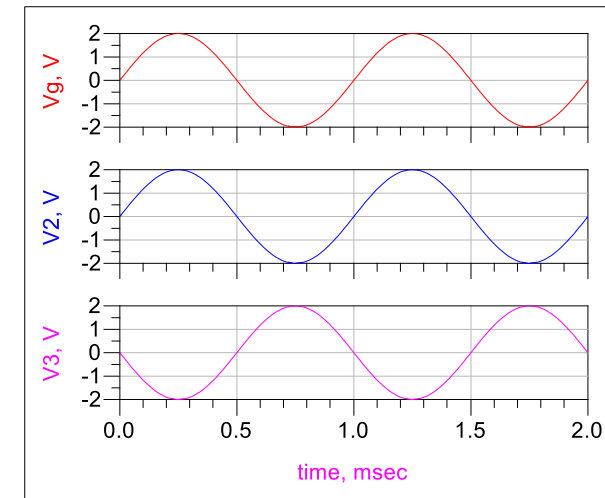
✓ Les diodes ne sont pas passantes en même temps



3. Circuits élémentaires

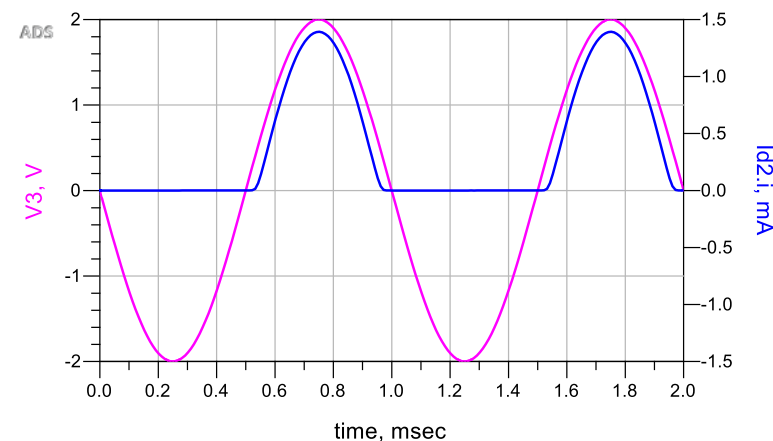
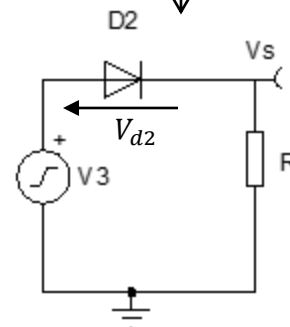
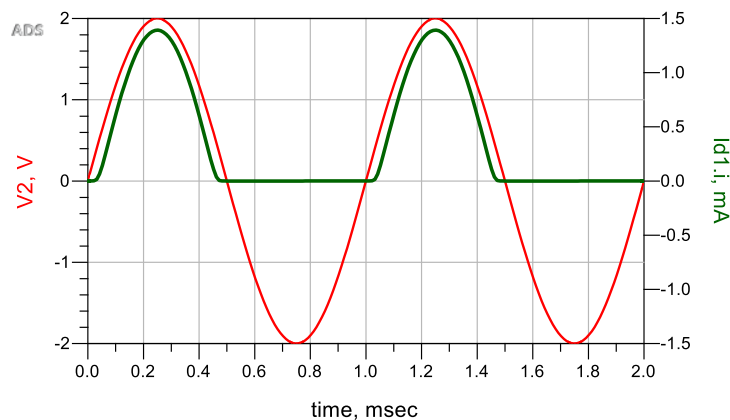
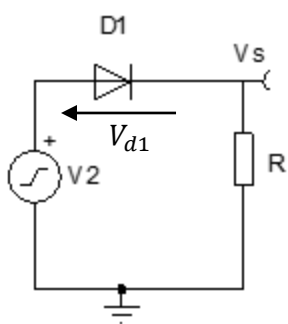
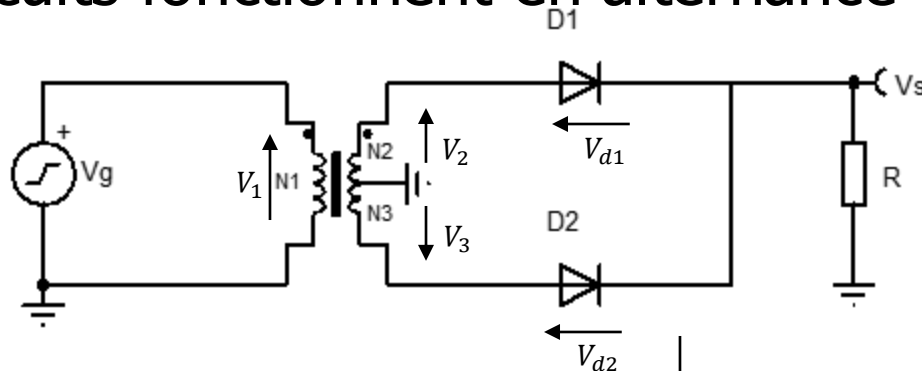
► 2nd circuit de redressement : le redressement double alternance

- Les diodes ne vont pas être passante en même temps
- On reconnaît alors deux circuits simples alternances
 - ✓ D1 conduit sur l'alternance positive de $V_2(t) = V_g(t)$
 - ✓ D2 conduit sur l'alternance positive de $V_3(t) = -V_g(t)$



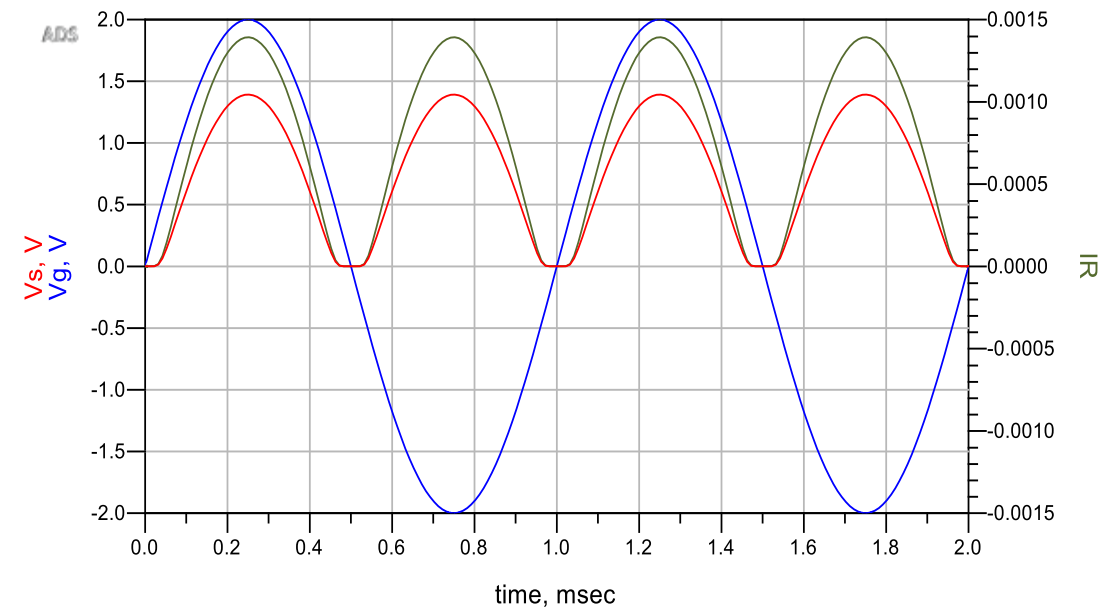
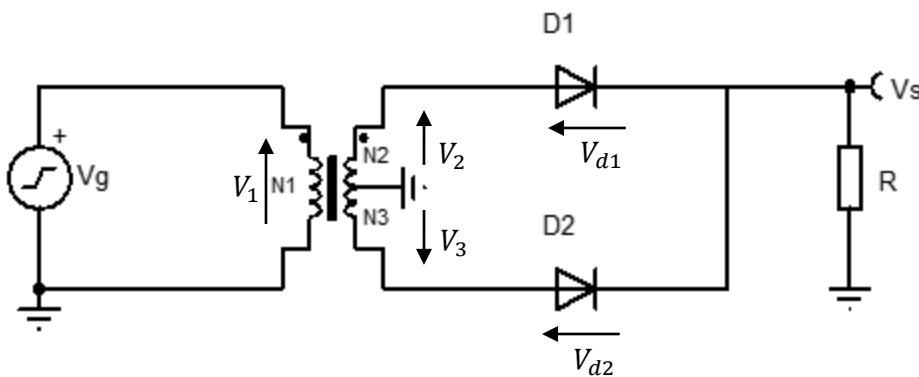
3. Circuits élémentaires

- 2nd circuit de redressement : le redressement double alternance
 - Les deux sous-circuits fonctionnent en alternance



3. Circuits élémentaires

- ▶ 2nd circuit de redressement : le redressement double alternance
 - Le fonctionnement final du montage est donc le suivant
 - ✓ En vert, le courant dans la résistance
 - ✓ En rouge, la tension $V_s(t)$



3. Circuits élémentaires

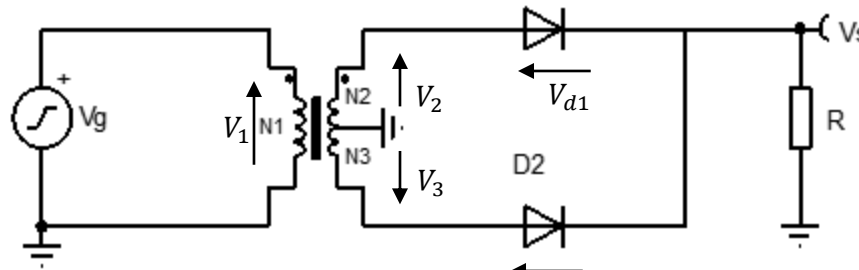
► 2nd circuit de redressement : le redressement double alternance

■ Le circuit fonctionne mais....

- ✓ Il a une limitation importante : la tension inverse appliquée aux diodes peut les amener à partir en avalanche

❖ Risque de destruction des diodes !!!

■ Reprenons le montage en considérant $V_g(t_0) = V_{gmax}$

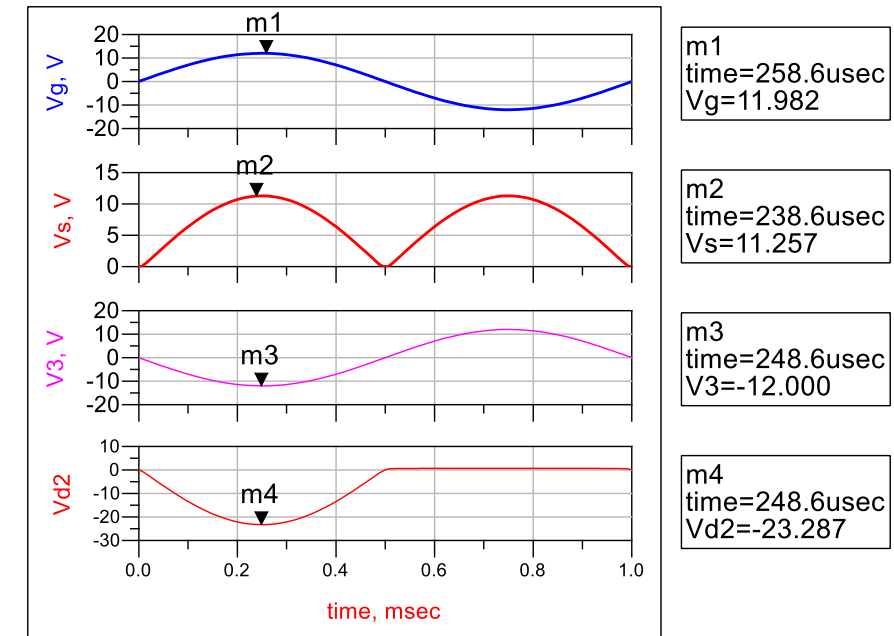


❖ Dans ce cas, $V_s(t_0) \approx V_{gmax} - V_{d0}$

- ✓ La tension aux bornes de D_2 vaut :

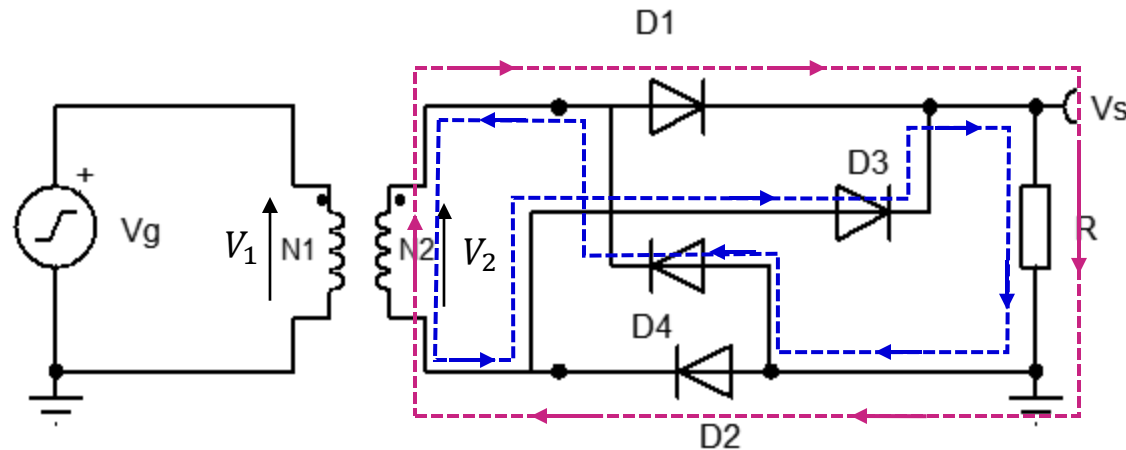
$$\text{❖ } V_{d2}(t_0) = V_3(t_0) - V_s(t_0) = -V_{gmax} - (V_{gmax} - V_{d0}) = -2V_{gmax} + V_{d0}$$

- Pour $V_{gmax} = 12V \Rightarrow V_{d2}(t_0) \approx -24V$!!!!



3. Circuits élémentaires

- ▶ 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode
 - C'est un circuit de redressement double alternance qui règle l'inconvénient du précédent
 - Il est composé de quatre diodes
 - ✓ **Le transformateur est indispensable**

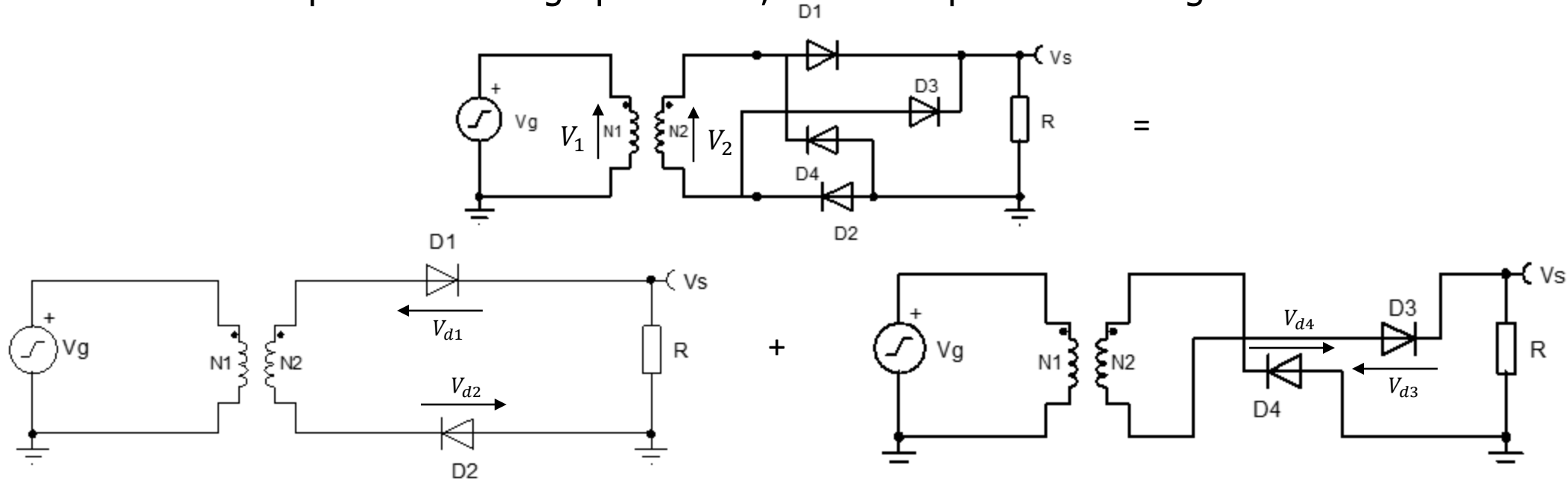


- Comme pour le montage précédent, on peut décomposer le montage en deux sous montage
 - ✓ D1 et D2 vont être passantes lorsque la tension du générateur est « positive »
 - ✓ D3 et D4 vont être passantes lorsque la tension du générateur est « négative »

3. Circuits élémentaires

► 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode

- On considère le transformateur comme idéal (pour simplifier)
- ✓ Comme pour le montage précédent, on décompose le montage en deux sous circuits

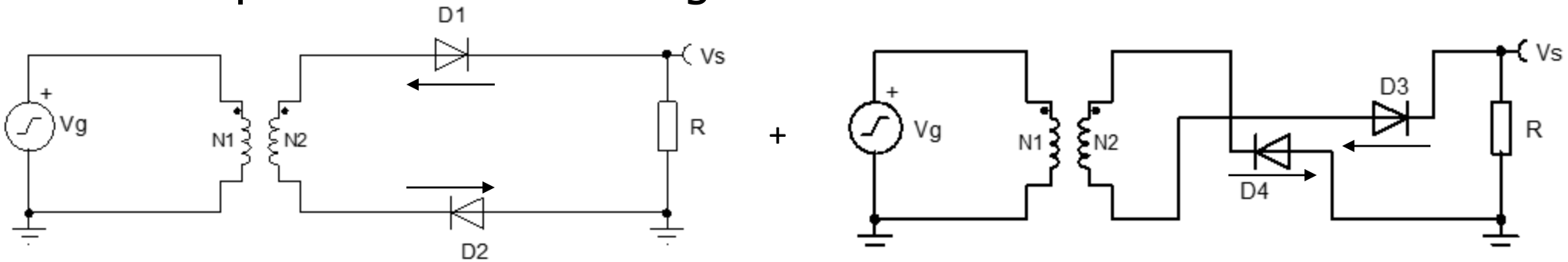


- On déplie le second montage en retournant le générateur et le transformateur

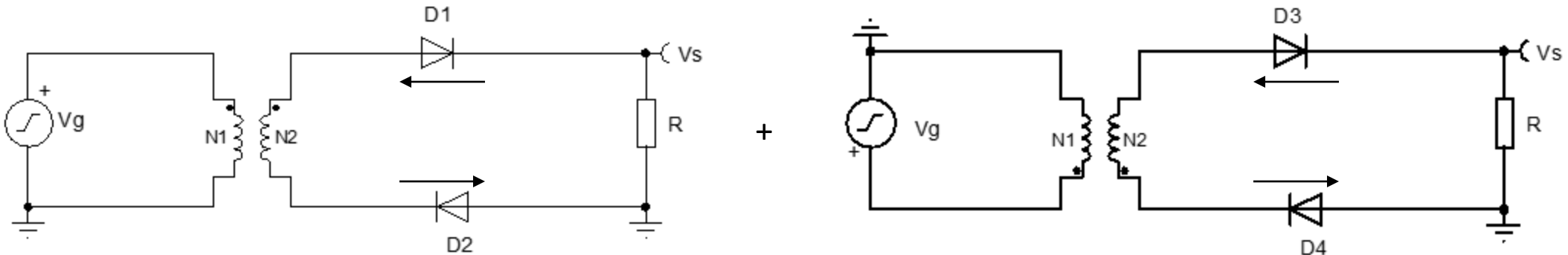
3. Circuits élémentaires

► 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode

- On déplie le second montage



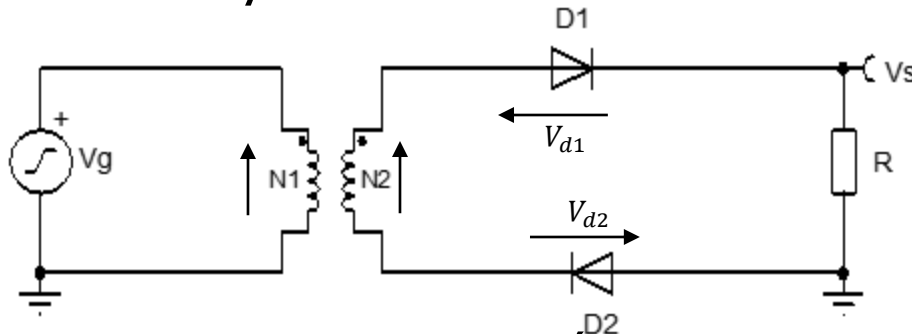
- Le montage est alors équivalent à :



3. Circuits élémentaires

► 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode

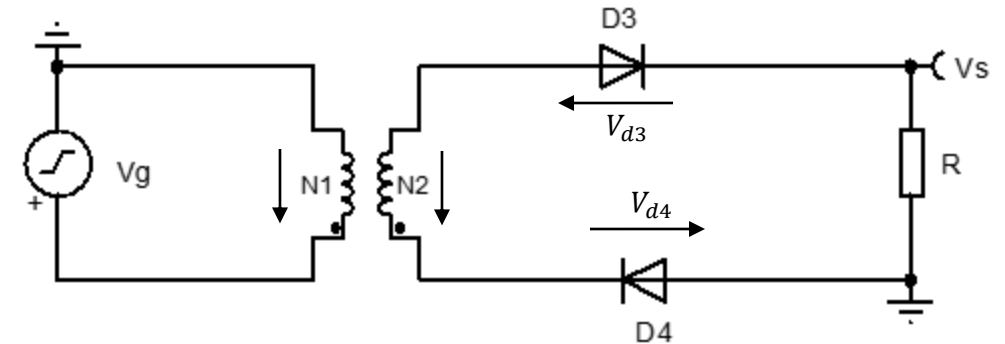
- On analyse maintenant le fonctionnement des deux sous-circuits



✓ Les lois des mailles s'écrivent :

$$V_g(t) = V_{d1}(t) + V_s(t) + V_{d2}(t)$$

+



$$-V_g(t) = V_{d3}(t) + V_s(t) + V_{d4}(t)$$

- ✓ Les diodes ne deviennent passante que si elles voient au moins une tension V_{d0} à leur borne

- ❖ Pour le premier sous circuit, il faut que : $V_{d1}(t) + V_{d2}(t) \geq 2V_{d0} \Rightarrow V_g(t) \geq 2V_{d0}$
 - Elles sont bien passante sur l'alternance positive de $V_g(t)$
- ❖ Pour le second sous circuit il faut que : $V_{d3}(t) + V_{d4}(t) \geq 2V_{d0} \Rightarrow V_g(t) \leq -2V_{d0}$
 - Elles sont bien passante sur l'alternance négative de $V_g(t)$

3. Circuits élémentaires

► 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode

■ On analyse le fonctionnement des deux sous circuits

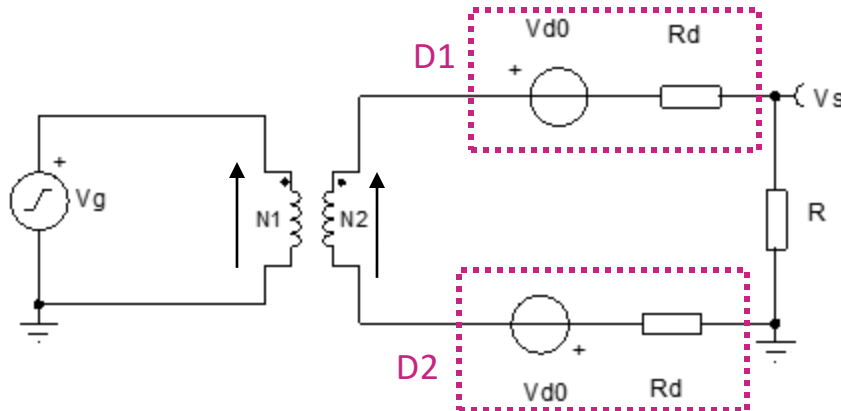
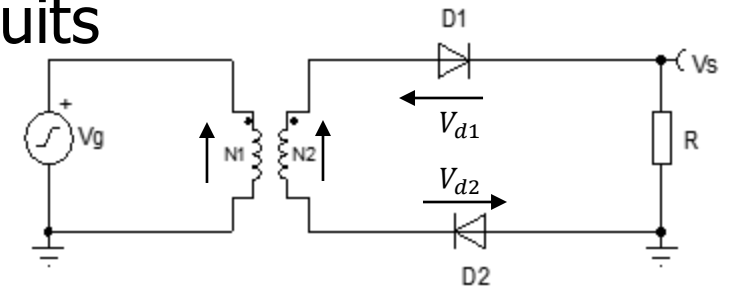
✓ Premier sous circuit composé de D1 et D2

✓ Quand V_g est sur l'alternance positive

❖ Si $V_g(t) < 2V_{d0}$ les deux diodes sont bloquées donc $I_d(t) = 0, V_s(t) = 0$

❖ Dès que $V_g(t) \geq 2V_{d0}$ les deux diodes deviennent passantes

○ On remplace les diodes par leur schéma équivalent et on calcule le montage



$$V_s(t) = \frac{R}{R + 2R_d} (V_g(t) - 2V_{d0}) \text{ pour } V_g(t) \geq 2V_{d0}$$

$$V_s(t) = 0 \text{ autrement}$$

3. Circuits élémentaires

► 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode

■ On analyse le fonctionnement des deux sous circuits

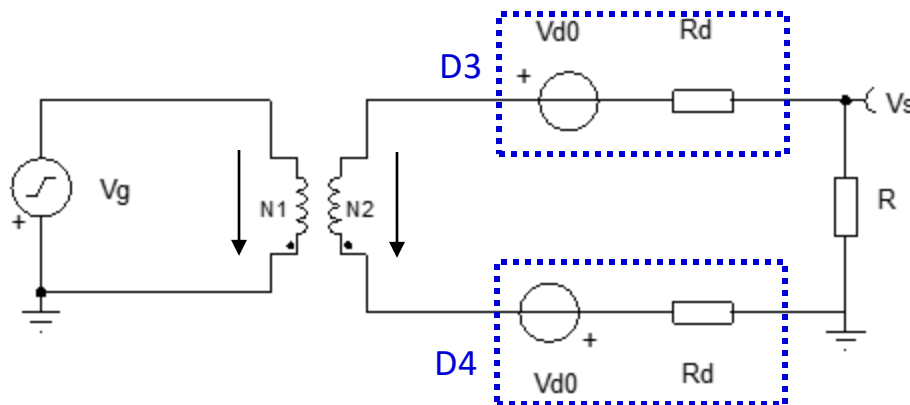
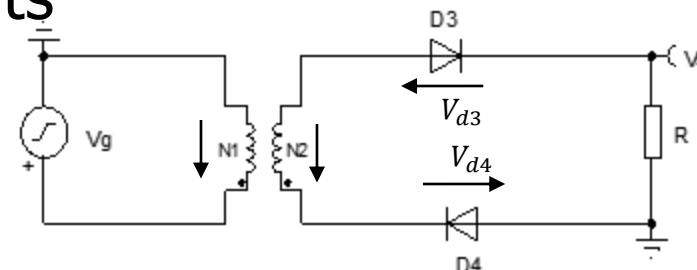
✓ deuxième sous circuit composé de D3 et D4

✓ Quand V_g est sur l'alternance positive

❖ Si $-V_g(t) < 2V_{d0}$, $V_g(t) > 2V_{d0}$ donc les deux diodes sont bloquées donc $I_d = 0, V_s = 0$

❖ Dès que $-V_g(t) \geq 2V_{d0}$, donc $V_g(t) \leq -2V_{d0}$ les deux diodes deviennent passantes

○ On remplace les diodes par leur schéma équivalent et on calcule le montage

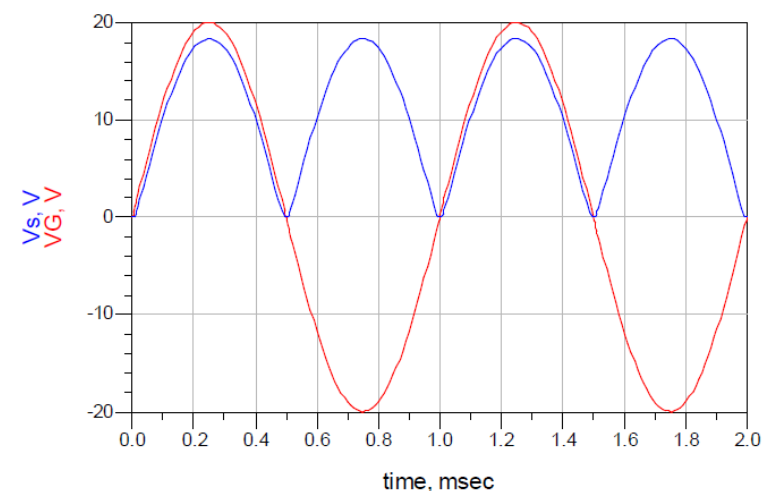
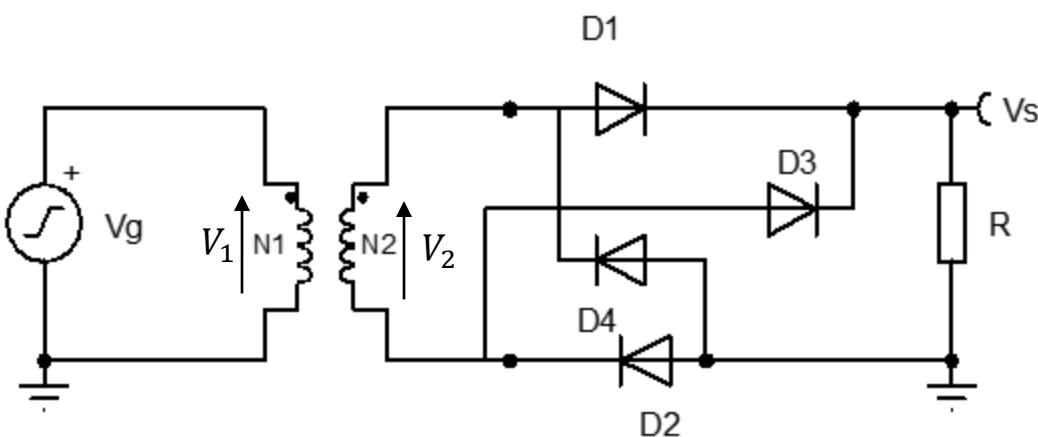


$$V_s(t) = \frac{R}{R + 2R_d} (V_g(t) - 2V_{d0}) \text{ pour } V_g(t) \leq -2V_{d0}$$

$$V_s(t) = 0 \text{ autrement}$$

3. Circuits élémentaires

- ▶ 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode
 - Au final le comportement du montage est le suivant :



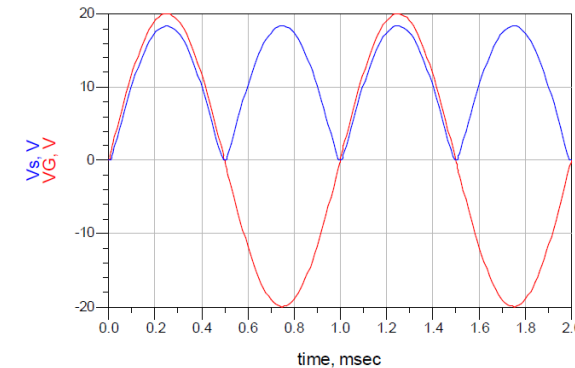
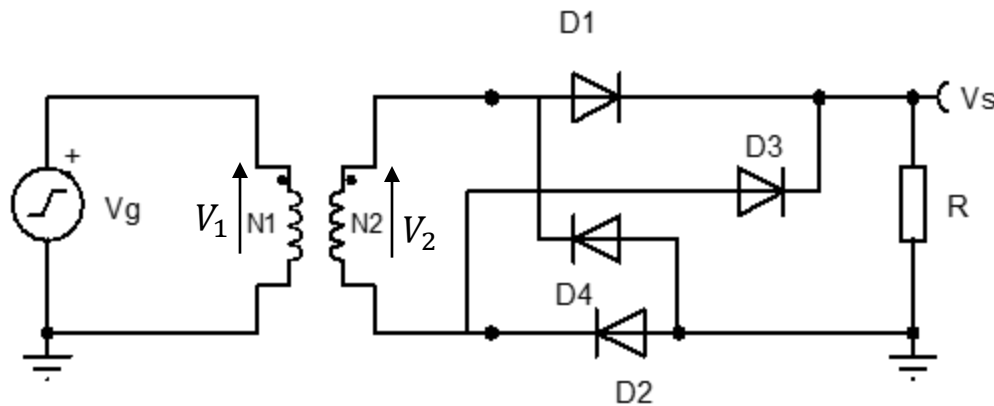
- ✓ Avec pour expression de la tension de sortie :

$$V_s(t) = \frac{R}{R + 2R_D} (|V_g(t)| - 2V_{d0}) \text{ pour } |V_g(t)| \geq 2V_{d0}, V_s(t) = 0 \text{ ailleurs}$$

3. Circuits élémentaires

► 3^{ème} circuit de redressement : le pont de diode

- Quel est la tension inverse appliquée sur les diodes bloquées ?



- ✓ Prenons le cas où D1 et D2 sont passantes, donc D3 et D4 bloquées

- Pour $V_g(t_0) = V_{g_{max}}$, $V_s(t_0) \approx V_{g_{max}} - 2V_{d0}$

- ❖ La tension appliquée à D3 et D4 est alors :

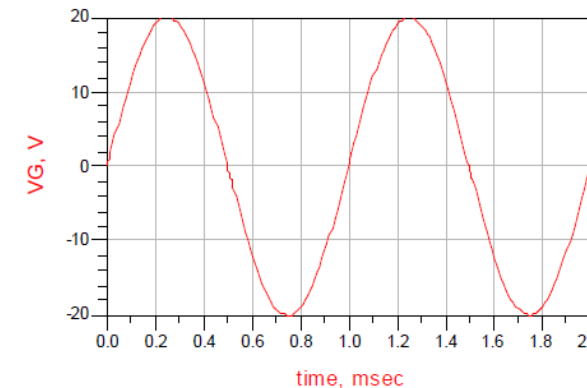
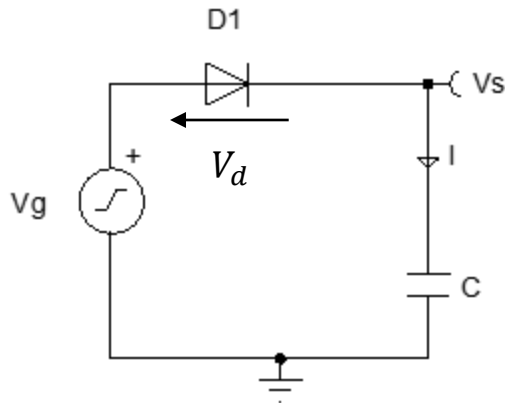
$$V_{d3}(t_0) + V_{d4}(t_0) = -V_{g_{max}} - V_{s_{max}} = -2V_{g_{max}} + 2V_{d0}$$

- ❖ Chaque diode ne voit donc que la tension : $V_{d3}(t_0) = V_{d4}(t_0) = -V_{g_{max}} + V_{d0}$

3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec un filtre capacitif

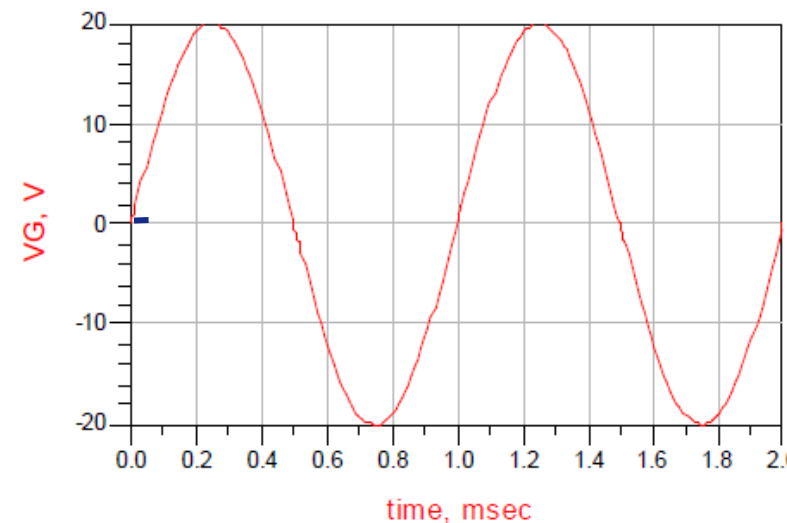
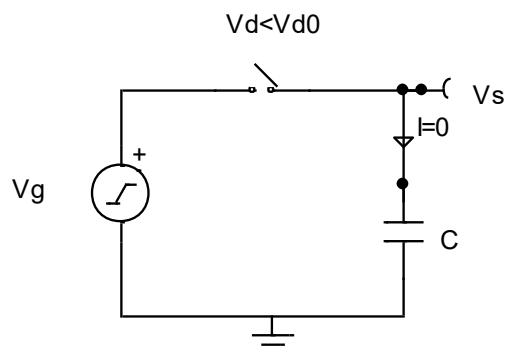
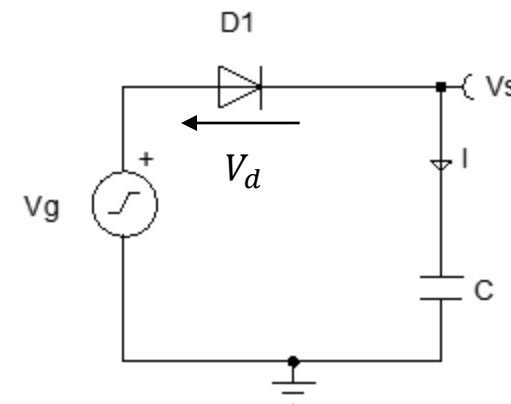
- Dans ce montage, on remplace dans le circuit de redressement monoalternante, la résistance par un condensateur
- ✓ Le générateur est un générateur sinusoïdal



- Le montage s'étudie comme auparavant en regardant pour qu'elles valeurs de V_g la diode est bloquée ou passante : $V_g(t) = V_d(t) + V_{Z_c}(t) = V_d(t) + V_s(t)$
 - ✓ On considère au début que le condensateur est déchargé : $V_s(0) = 0$
 - ✓ La diode ne devient passante que si $V_d(t) \geq V_{d_0}$, donc si $V_g(t) \geq V_{d_0}$

3. Circuits élémentaires

- Le redressement avec un filtre capacitif
 - Analyse du fonctionnement : à partir de $t=0$
 - ✓ Tant que $V_g(t) \leq V_{d0}$, la diode D1 est bloquée
 - ❖ Ce qui implique que $I(t) = 0, V_s(t) = 0$



3. Circuits élémentaires

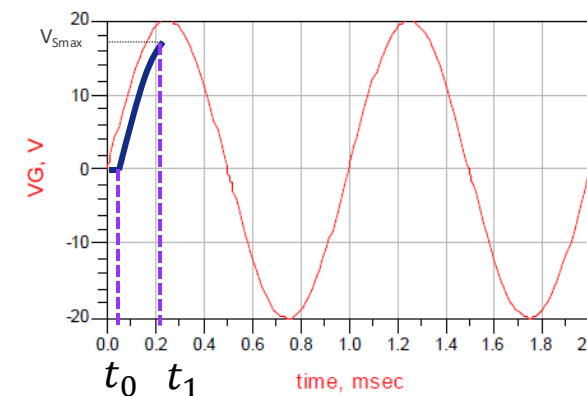
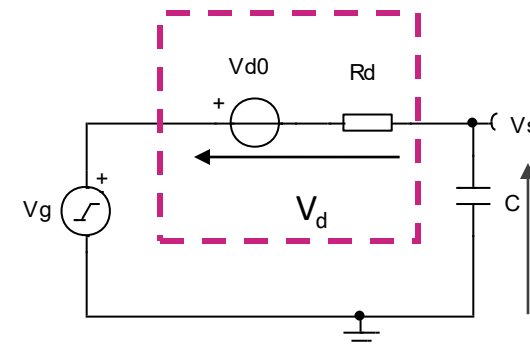
► Le redressement avec un filtre capacitif

■ Quant t augmente, V_g augmente

- ✓ Dès que $V_g(t) \geq V_{d0}$, la diode devient passante
 - ❖ on remplace la diode par son schéma équivalent
- ✓ La capacité se charge :
 - ❖ Avec une constante de temps : $\tau = R_d C$
 - ❖ Si la diode se charge rapidement, le signal de sortie suit le signal d'entrée
 - ❖ Pour $V_g(t_1) = V_{gmax}$, la sortie est à sa valeur maximale
 - $V_{Smax}(t_1) = V_{gmax} - V_{d0}$
 - ❖ Le courant dans la diode a pour expression

$$I_d(t) = C \frac{dV_s(t)}{dt} = C \frac{d(V_{Smax} \cdot \sin(\omega t))}{dt} = C \omega V_{Smax} \cos(\omega t)$$

- ❖ On a un pic de courant à l'instant t_0 où la diode devient passante : $V_g(t_0) = V_{gmax} \sin(\omega t_0) = V_{d0}$, $I_{dmax} = I_d(t_0)$



3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec un filtre capacitif

✓ Dès que le signal redescend et que $V_g(t) < V_{g_{max}}$, que se passe t'il ?

❖ La capacité est chargée avec une tension : $V_C(t_1) = V_s(t_1) = V_{g_{max}} - V_{d0}$

❖ La diode a alors une tension à ses bornes

$$V_d(t_1) = V_g(t_1) - (V_{g_{max}} - V_{d0})$$

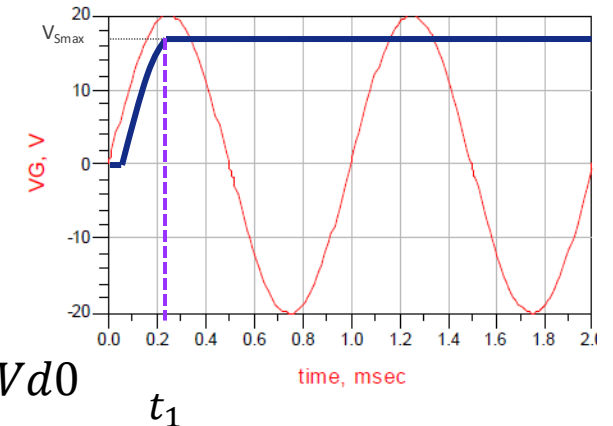
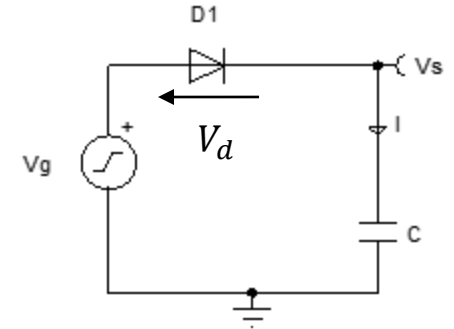
Dès que $V_g(t)$ diminue pour $t \geq t_1$, la tension devient alors :

❖ $V_d(t) = V_g(t) - (V_{g_{max}} - V_{d0}) = V_{d0} - (V_{g_{max}} - V_g(t)) < V_{d0}$

❖ La tension aux bornes de la diode devient inférieure à la tension V_{d0}

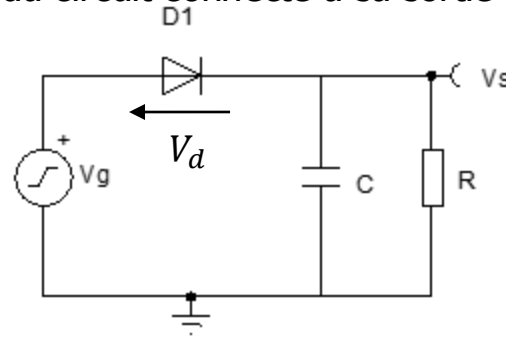
○ La diode se bloque

○ Le condensateur ne se décharge plus théoriquement



3. Circuits élémentaires

- ▶ Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge
 - On reprend le circuit précédent en rajoutant une résistance de charge R
 - ✓ C'est l'impédance d'entrée du circuit connecté à sa sortie (exemple : téléphone)

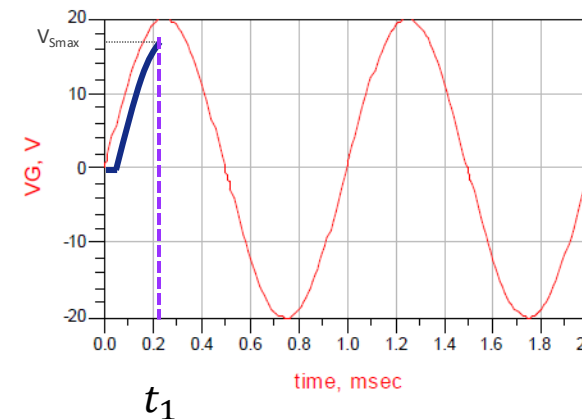
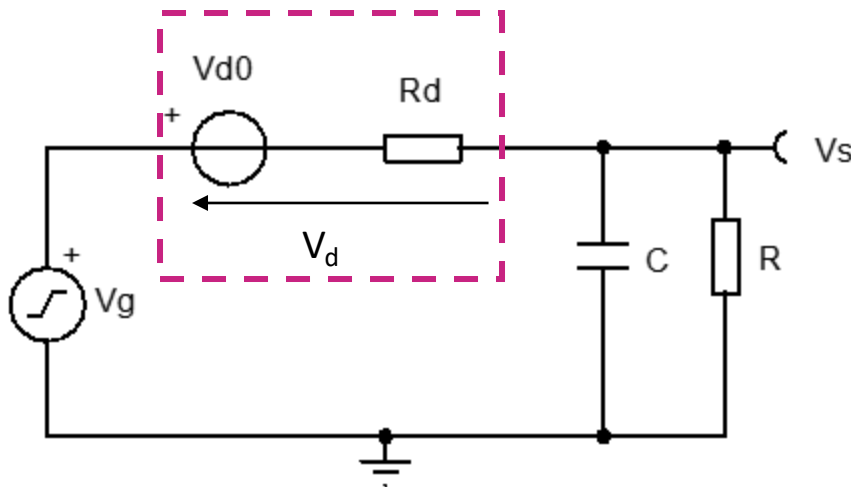


- Comme pour le montage le condensateur va se charger sur l'alternance positive de $V_g(t)$
 - ✓ Jusqu'à l'instant t_1 tel que : $V_g(t_1) = V_{g_{max}}$
 - ✓ Avec une constante de temps : $\tau = R_d \cdot C$
 - ❖ Le signal de sortie suit le signal d'entrée la charge est suffisamment rapide
- La différence par rapport au schéma précédent est lorsque la diode se bloque, quand $V_g(t) < V_{g_{max}}$
 - ✓ Le condensateur se décharge dans la résistance R en parallèle avec une constante de temps : $\tau_d = R \cdot C$

3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

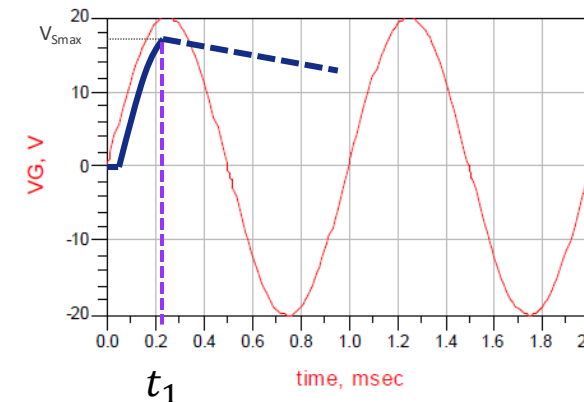
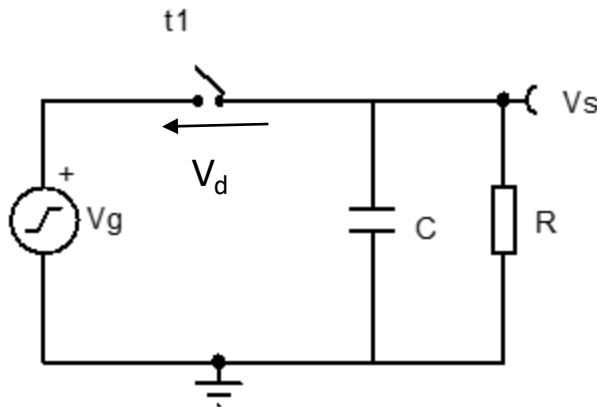
- ✓ La charge s'effectue pour $V_g(t) \geq V_{d0}$
 - ❖ La diode est passante et est remplacée par son schéma équivalent
 - ❖ La tension de sortie est maximum à l'instant t_1 tel que $V_g(t_1) = V_{g_{max}}$
 - La tension de sortie à alors pour valeur : $V_s(t_1) = V_{s_{max}} = \frac{R}{R+R_d} (V_{g_{max}} - V_{d0})$



3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

- ✓ Lorsque la tension d'entrée diminue, la diode se bloque pour $V_d(t) \leq V_{d0}$
 - ❖ La tension de la diode vaut : $V_d(t) = V_g(t) - V_s(t)$
 - ❖ Elle va se bloquer pour $t \geq t_1$
- ✓ On obtient alors en sortie du montage un circuit RC parallèle avec le condensateur chargé à la valeur $V_{S_{max}} = \frac{R}{R+R_d} (V_{g_{max}} - V_{d0})$
 - Le condensateur se décharge dans la résistance R : $\tau_d = R \cdot C$



3. Circuits élémentaires

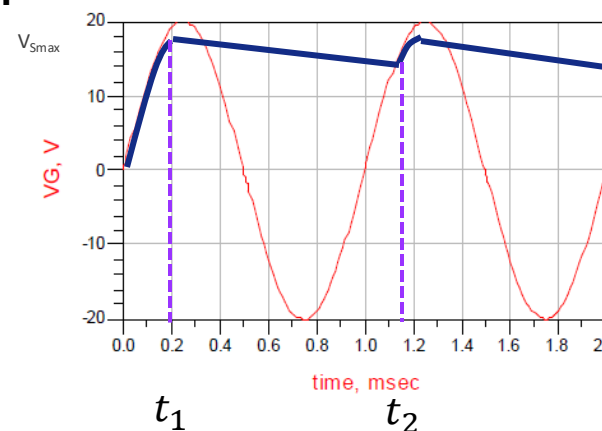
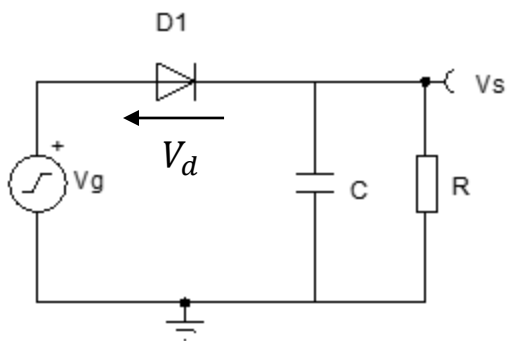
► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

- ✓ Le condensateur va se décharger jusqu'à ce que la diode redevienne passante à l'instant t_2

❖ C'est-à-dire dès que $V_d(t_2) \geq V_{d0}$ donc pour

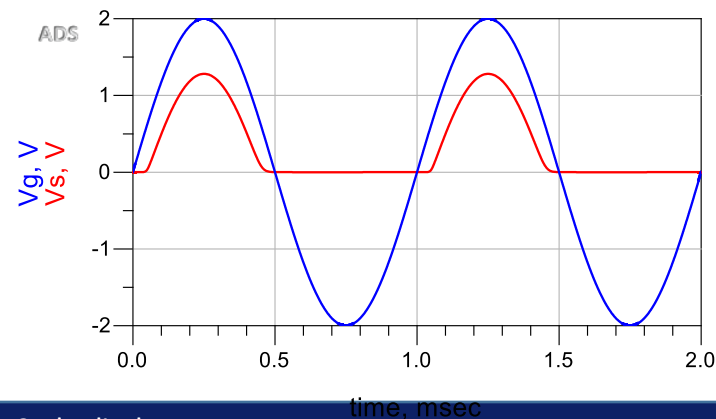
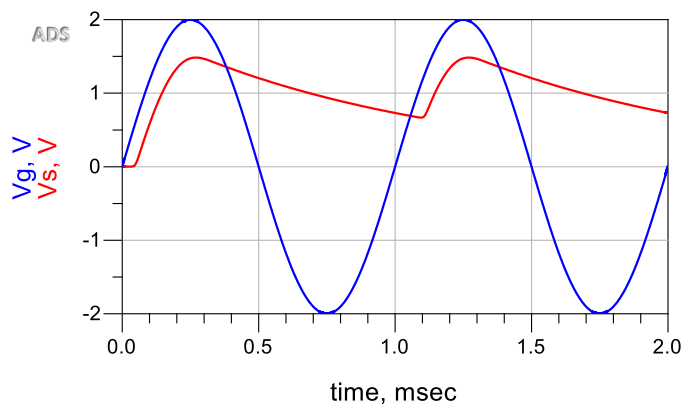
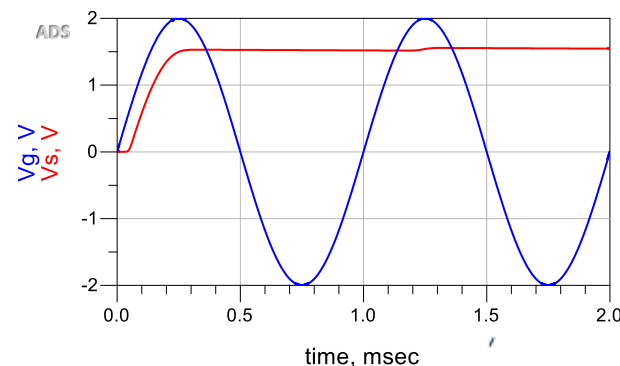
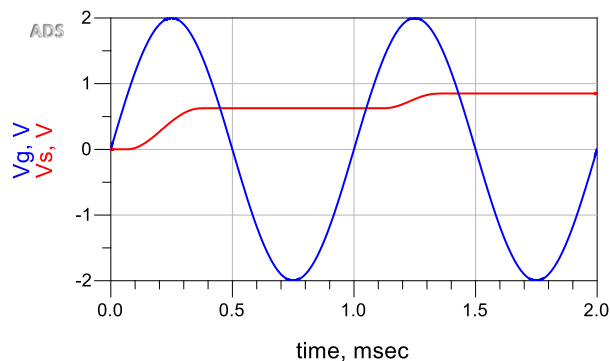
$$V_d(t_2) = V_{d0} = V_g(t_2) - V_s(t_2)$$

❖ Elle va alors se recharger, puis décharger.....



3. Circuits élémentaires

- Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge
 - ✓ Exemples pour différents temps de charge et de décharge du condensateur



3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

■ Calcul et dimensionnement du montage : ondulation du signal de sortie

- ✓ On prend l'hypothèse que le temps de charge du condensateur est négligeable par rapport à la période de $V_g(t)$: $\Delta t = t_3 - t_2 \ll T \Rightarrow t_2 - t_1 \approx T$

- Le condensateur se décharge sur une période du signal d'entrée

- ✓ L'expression du signal lors de la décharge du condensateur est :

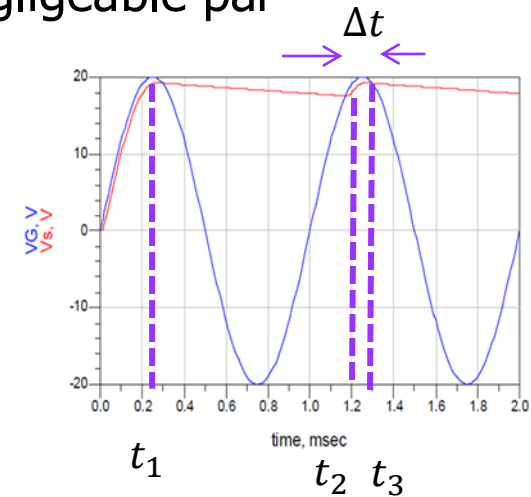
$$\diamond V_s(t') = V_{s_{max}} e^{-\frac{t'}{RC}} \text{ avec } V_{s_{max}} = \frac{R}{R+R_d} (V_{g_{max}} - V_{d0})$$

- ✓ Il se décharge sur une période du signal donc jusqu'à la valeur

$$\diamond V_{s_{min}} = V_{s_{max}} e^{-\frac{T}{RC}} \approx V_{s_{max}} \left(1 - \frac{T}{RC}\right)$$

- Il faut que la décharge soit bien plus lent que la période du signal : $RC \gg T$

- ✓ L'ondulation vaut donc : $\Delta V_s = V_{s_{max}} - V_{s_{min}} = V_{s_{max}}' \frac{T}{RC}$



3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

■ Calcul et dimensionnement du montage : angle de conduction

- ✓ L'angle de conduction correspond à la durée pendant laquelle la diode redevient passante et le condensateur se recharge : $\Delta t' = t_3 - t_2$

- ❖ Il se calcule à partir de l'expression de l'ondulation du signal puisque :

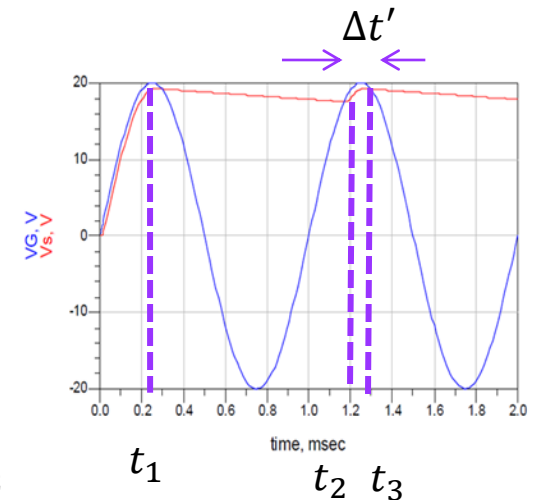
$$\Delta V_s = V_{s_{max}} - V_{s_{max}} \sin(\omega t_2) = V_{s_{max}} - V_{s_{max}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega \Delta t'\right)$$

- ❖ On peut réécrire cette équation sous la forme

$$\Delta V_s = V_{s_{max}} - V_{s_{max}} \cos(\omega \Delta t') = V_{s_{max}} (1 - \cos(\omega \Delta t'))$$

- ✓ En supposant $\Delta t'$ petit, on peut donc écrire : $\cos(\omega \Delta t') \approx 1 - \frac{(\omega \Delta t')^2}{2}$

- ❖ Donc : $\Delta V_s \approx V_{s_{max}} \frac{(\omega \Delta t')^2}{2} \Rightarrow \Delta t' = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2 \Delta V_s}{V_{s_{max}}}}$



3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

- Calcul et dimensionnement du montage : il faut calculer les courants maximums et le courant moyen pour son dimensionnement

✓ A chaque fois que la diode redevient passante, il y a pic de courant qui se crée pour charger le condensateur

- ❖ Il y a un premier pic lors que premier chargement, assez fort
- ❖ Il y a des pics ensuite à chaque rechargement du condensateur, avec des courants moins élevés

✓ Pour les calculs, on suppose que la charge du condensateur est suffisamment rapide pour que le signal de sortie suive le signal d'entrée

❖ Quand la diode est passante, le courant $I_d(t)$ est la somme du courant dans le condensateur et du courant dans la résistance :

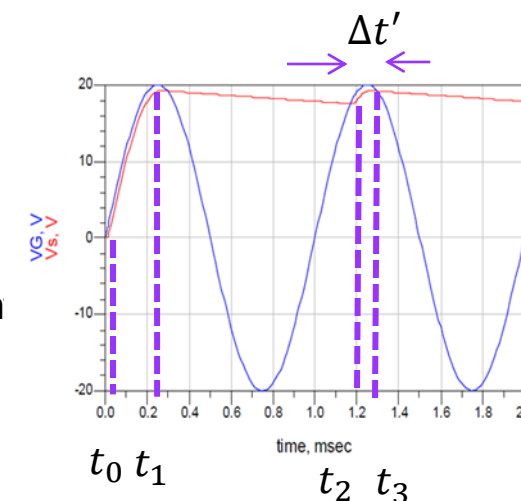
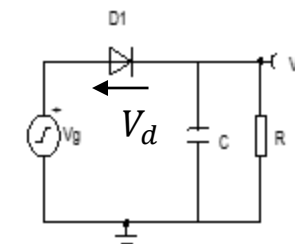
$$I_d(t) = C \frac{d(V_c(t))}{dt} + \frac{V_s(t)}{R} = C \frac{d(V_{S_{max}} \sin(\omega t))}{dt} + \frac{V_{S_{max}} \sin(\omega t)}{R}$$

$$I_d(t) = C\omega V_{S_{max}} \cos(\omega t) + \frac{V_{S_{max}}}{R} \sin(\omega t)$$

✓ Le premier pic de courant est réalisé lors du premier chargement lorsque la diode devient passan

❖ Quand $V_g(t_0) = V_{g_{max}}(\omega t_0) = V_{d0} \Rightarrow t_0 = \frac{1}{\omega} \cdot \cos^{-1}\left(\frac{V_{d0}}{V_{g_{max}}}\right)$

❖ Donc : $I_d(t_0) = C\omega V_{S_{max}} \cos(\omega t_0) + \frac{V_{S_{max}}}{R} \sin(\omega t_0)$



3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

- Calcul et dimensionnement du montage : courant maximum dans la diode à chaque rechargement

- ✓ En fonctionnement, au moment où la diode redevient passante pour charger le condensateur à l'instant t_2 , le courant est donc :

$$I_d(t) = C\omega V_{S_{max}} \cos(\omega t_2) + \frac{V_{S_{max}}}{R} \sin(\omega t_2)$$

- ✓ On peut réécrire cette expression en fonction de $\Delta t'$:

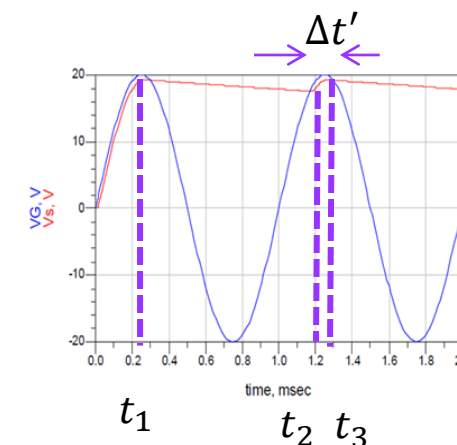
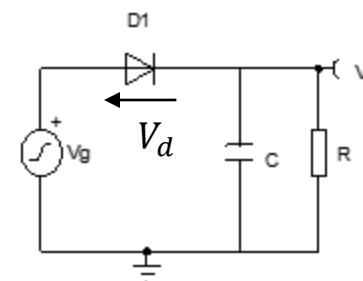
$$I_d(t_2) = C\omega V_{S_{max}} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega\Delta t'\right) + \frac{V_{S_{max}}}{R} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega\Delta t'\right) = C\omega V_{S_{max}} \sin(\omega\Delta t') + \frac{V_{S_{max}}}{R} \cos(\omega\Delta t')$$

- ✓ Sachant que $\Delta t' \ll 1$, on peut écrire en considérant : $\cos(\omega\Delta t') \approx 1$ et $\sin(\omega\Delta t') \approx \omega\Delta t'$

$$I_{d_{max}} = C\omega V_{S_{max}} \omega\Delta t' + \frac{V_{S_{max}}}{R}$$

- ✓ En reprenant $\Delta t' = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2\Delta V_S}{V_{S_{max}}}}$ et $\Delta V_S = V_{S_{max}} \frac{T}{RC} \Rightarrow C = \frac{V_{S_{max}}}{\Delta V_S} \cdot \frac{T}{R}$

$$I_{d_{max}} = \frac{V_{S_{max}}}{R} \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{2V_{S_{max}}}{\Delta V_S}} \right)$$

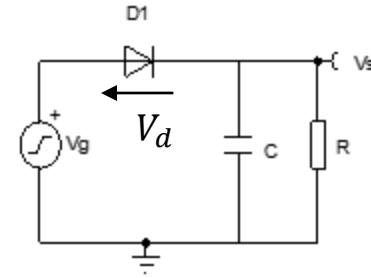


3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

■ Calcul et dimensionnement du montage : courant moyen traversant la diode

- ✓ Le courant moyen se calcule sur la durée pendant laquelle elle est passante :
 - ❖ En reprenant l'expression précédente, sachant que la diode ne conduit que durant l'angle de conduction



$$I_{dmoy} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\frac{\pi}{2} - \omega \Delta t'}^{\frac{\pi}{2}} \left(C \frac{dV_s(t)}{dt} + \frac{V_s(t)}{R} \right)$$

- ✓ On peut approcher sa valeur en considérant que le courant dans la résistance est constant : $\Delta V_s \ll V_{Smax}$

$$I_{dmoy} = C \frac{\Delta V_s}{\Delta t'} + \frac{V_{Smax}}{R}$$

- ✓ Sachant que : $C = \frac{V_{Smax}}{\Delta V_s} \cdot \frac{T}{R}$ et que $\Delta t' = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2\Delta V_s}{V_{Smax}}}$, on en déduit que :

$$I_{dmoy} = \frac{V_{Smax}}{R} \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_{Smax}}{\Delta V_s}} \right)$$

3. Circuits élémentaires

► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

■ Calcul et dimensionnement du montage : Calcul de C et de R

- ❖ On considère que le courant dans la résistance est constante, et égal à I_{max} , lors de la décharge du condensateur sur une période du signal d'entrée

$$I_{max} = C \frac{\Delta V_S}{\Delta t} = C \frac{\Delta V_S}{T}$$

- ❖ On peut donc en déduire la valeur du condensateur :

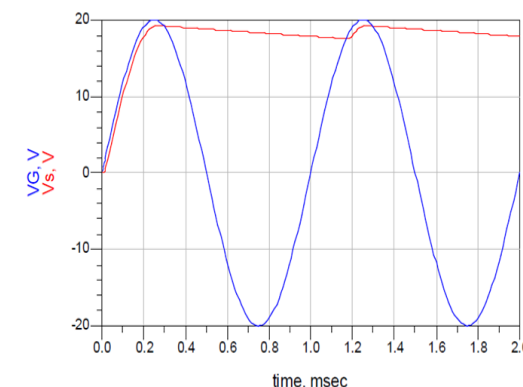
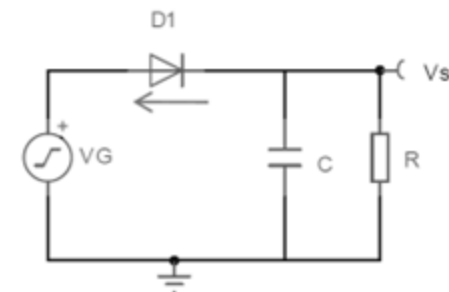
$$C = \frac{T \cdot I_{max}}{\Delta V_S}$$

- En sortie du montage, on retrouve : $V_{S_{max}} = R \cdot I_{max}$

■ Pour un montage en double alternance

- ✓ Les équations sont les même mais il faut remplacer T par $T' = \frac{T}{2}$

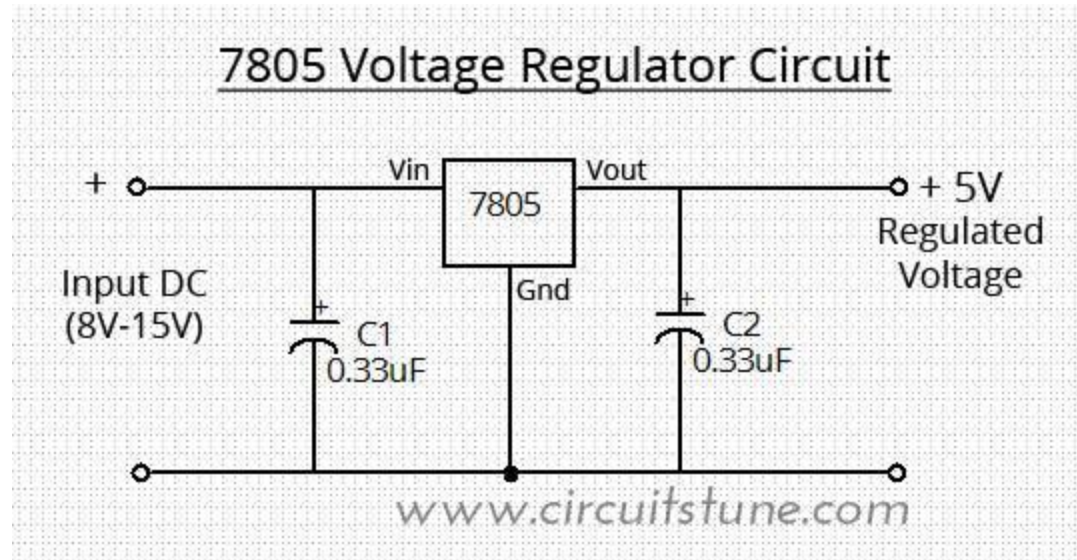
- ❖ La diode est passante pour deux alternances par période au lieu de une



3. Circuits élémentaires

► Le régulateur de tension à diode Zener

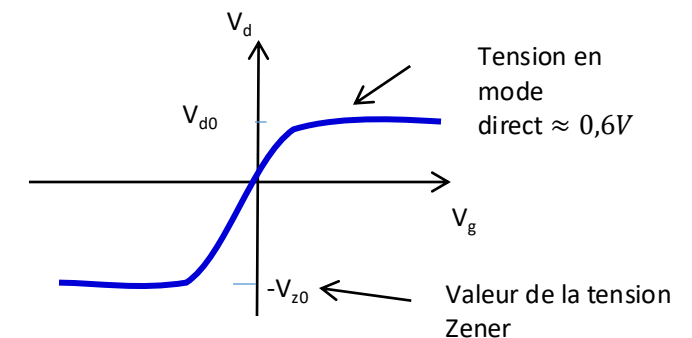
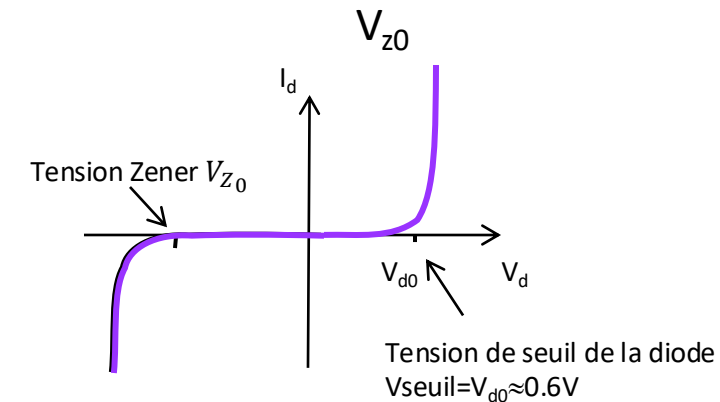
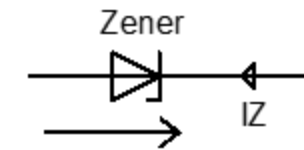
- ✓ Pour faire une alimentation, en sortie d'un redresseur de tension, on place un régulateur de tension qui va amortir les ondulations
 - ❖ On peut faire des régulateurs avec des diodes Zener
 - ❖ Il existe des composants (plus performants)



3. Circuits élémentaires

► Le régulateur de tension : la diode Zener

- La diode Zener est une diode qui est conçue pour fonctionner en zone de claquage
 - ✓ La tension qu'on lui applique est donc inverse
 - ✓ La tension à ses bornes est alors fixe, V_{Z0} , le claquage est non destructif
 - ✓ La tension à une valeur connue et choisie
 - ✓ Sur le symbole, on indique la tension Zener et le courant Zener en sens inverse des tensions et des courants dans une diode PN classique
- Si on lui applique une tension directe, elle se comporte comme une diode normale
 - ✓ Sa tension de seuil est proche de 0,6V



3. Circuits élémentaires

► Le régulateur de tension : la diode Zener

- La diode fonctionne en régulation à condition qu'un courant minimum puisse la traverser : I_{Zmin}
- Elle a également une puissance maximale admissible au-delà de laquelle l'effet de claquage de la jonction devient destructif

✓ En première approximation, on peut écrire : $P_{max} = V_{Z0} \cdot I_{Zmax}$

✓ On peut donc définir une zone de fonctionnement en courant de la diode tel que :

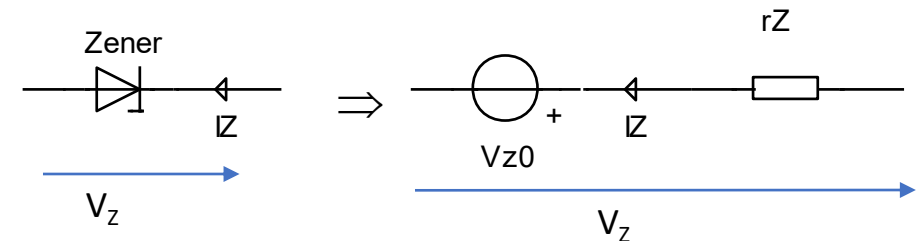
$$I_{Zmin} \leq I_Z \leq I_{Zmax}$$

- Lorsque la diode Zener est passante en inverse, son modèle équivalent est similaire à celui en mode passant direct

✓ On peut écrire que la tension V_Z à ses bornes est de la forme : $V_Z = r_Z \cdot I_Z + V_{Z0}$

✓ La puissance maximum qu'elle peut admettre s'écrit alors :

$$P_{max} = (V_{Z0} + r_Z \cdot I_{Zmax}) \cdot I_{Zmax}$$



3. Circuits élémentaires

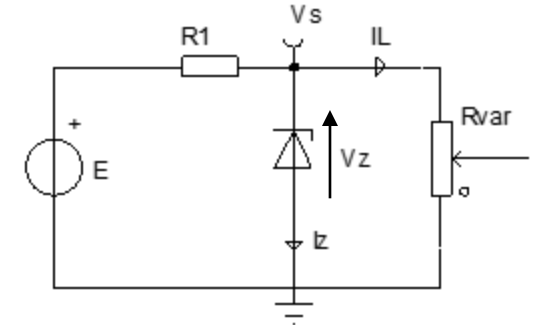
► Le régulateur de tension avec une diode Zener

- Le régulateur est simplement constitué de la diode Zener et d'une résistance R_1
- La charge de sortie R_{var} représente le circuit branché en sortie du régulateur
 - ✓ Par exemple une batterie que l'on va charger avec un courant I_L
- Quelles sont les performances demandées au régulateur ?
 - ✓ Que sa tension de sortie soit constante pour les ondulations du signal d'entrée :

$$V_s = cte \quad \forall E \in [E_{min}, E_{max}]$$

- ✓ Que sa tension de sortie soit constante pour les variations du courant délivrée à la charge

$$V_s = cte \quad \forall I_L \in [I_{Lmin}, I_{Lmax}]$$



3. Circuits élémentaires

► Le régulateur de tension avec une diode Zener

■ Calcul de la résistance R_1

- ✓ La résistance R_1 est là pour « protéger » la diode Zener et éviter que le courant I_Z dépasse le courant maximum admissible I_{Zmax}
- ✓ Il faut répondre à la question : pour quelles valeurs de E , de I_L et de R_1 le courant I_Z est-il maximum ?
 - ❖ La loi des nœuds montre qu'il est maximum quand $I_L = 0$ puisque $I_g = I_L + I_Z$
 - ❖ La loi des mailles montre qu'il est alors maximum pour E_{max} et R_{1min} puisque

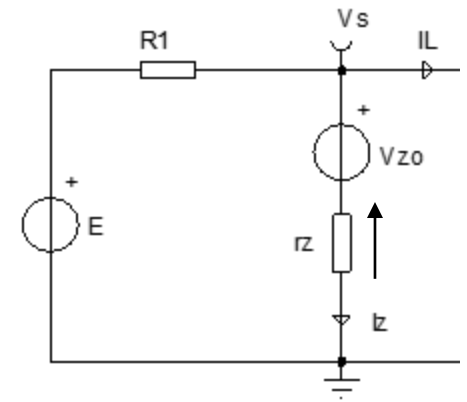
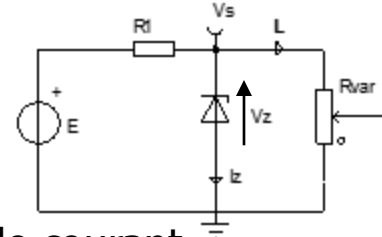
$$E = R_1 \cdot I_g + V_Z$$

- ✓ La diode Zener étant passante, on la remplace par son schéma équivalent

❖ On peut alors écrire : $E = R_1 \cdot I_Z + V_{Z0} + r_Z \cdot I_Z \Rightarrow I_Z = \frac{E_{max} - V_{Z0}}{R_1 + r_Z}$

- ✓ On déduit de cette expression la valeur minimale de la résistance R_1 telle que :

$$I_{Zmax} = \frac{E_{max} - V_{Z0}}{R_{1min} + r_Z} \Rightarrow R_{1min} = \frac{E_{max} - V_{Z0}}{I_{Zmax}} - r_Z$$



3. Circuits élémentaires

► Le régulateur de tension avec une diode Zener

■ Calcul de la résistance R_1

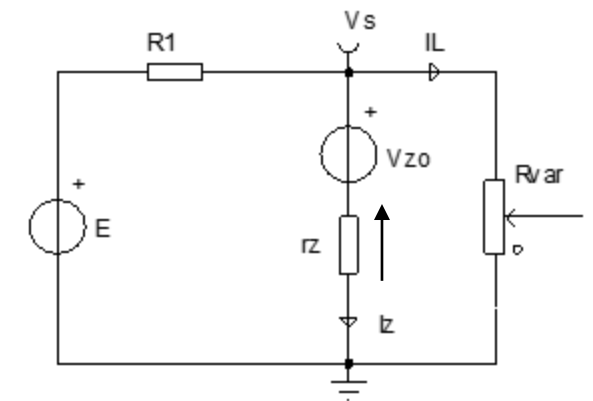
- ✓ il reste à trouver la valeur maximale de R_1 pour que le régulateur fonctionne
- ✓ La diode doit devenir passante et avoir un courant I_{Zmin} qui la traverse
- ✓ Il faut répondre à la question : pour quelles valeurs de E , de I_L et de R_1 le courant I_Z est-il maximum ?
 - ❖ La loi des nœuds montre qu'il est minimum quand $I_L = I_{Lmax}$ puisque $I_g = I_Z + I_L$
 - ❖ La loi des mailles montre qu'il est aussi minimum pour E_{min} et R_{1max} puisque

$$E = R_1 \cdot I_g + V_{Z0} + r_Z \cdot I_Z$$
- ✓ On peut écrire les équations suivantes pour le circuit

$$E = R_1 \cdot (I_L + I_Z) + V_{Z0} + r_Z \cdot I_Z \Rightarrow I_Z = \frac{E - V_{Z0} - R_1 \cdot I_L}{R_1 + r_Z}$$

- ✓ On en déduit de cette expression la valeur maximale de R_1

$$R_{1max} = \frac{E_{min} - V_{Z0} - r_Z \cdot I_{Zmin}}{I_{Lmax} + I_{Zmin}}$$



3. Circuits élémentaires

► Le régulateur de tension avec une diode Zener

- Les performances d'un régulateur sont évaluées avec deux facteurs de régulation : amont et aval
 - ✓ On souhaite que la tension de sortie ne varie pas lorsque le générateur en entrée présente des ondulations
 - ❖ On calcule alors le facteur de régulation dit amont qui correspond à la variation de V_s en fonction de E quand le courant I_L est constant.

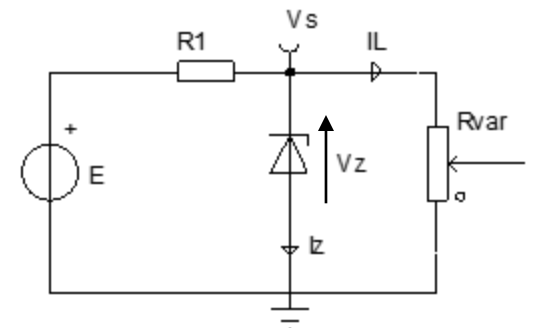
$$K = \left. \frac{dV_s}{dE} \right|_{I_L = cte}$$

- ✓ On souhaite que la tension de sortie ne varie pas lorsque le courant fourni I_L varie
 - ❖ On calcule alors le facteur de régulation dit aval qui correspond à la variation de V_s en fonction de I_L quand la tension d'entrée E est constante

$$r_i = - \left. \frac{dV_s}{dI_L} \right|_{E = cte}$$

- ✓ On peut exprimer la variation de la tension de sortie comme :

$$\Delta V_s = K \Delta E + r_i \Delta I_L$$

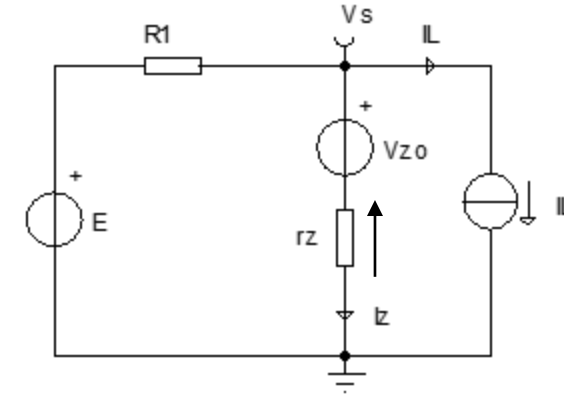


3. Circuits élémentaires

- ▶ Le régulateur de tension avec une diode Zener
 - Calculons les facteurs de régulation amont et aval du régulateur

✓ Le théorème de Millman sur le montage s'écrit :

$$V_s = \frac{\frac{E}{R_1} + \frac{V_{z0}}{r_z} - I_L}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_z}}$$



✓ A partir de cette équation, on peut donc calculer les deux facteurs de régulation

$$\begin{aligned} \diamond K &= \left. \frac{dV_s}{dE} \right|_{I_L=cte} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_z}} = \frac{r_z}{R_1 + r_z} \\ \diamond r_i &= - \left. \frac{dV_s}{dI_L} \right|_{E=cte} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_z}} = \frac{R_1 r_z}{R_1 + r_z} \end{aligned}$$

✓ Le générateur de Thévenin équivalent du montage est alors :

$$\diamond U_{th} = \frac{\frac{E}{R_1} + \frac{V_{z0}}{r_z}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_z}} = K \cdot E + \frac{R_1}{R_1 + r_z} \cdot V_{z0} \text{ et } R_{TH} = r_i$$