

# Traitement de l'information analogique

Chapitre 3 : La diode  
Corinne Berland

Une école de

CCI PARIS ILE-DE-FRANCE  
EDUCATION



Université  
Gustave Eiffel

# Introduction

- ▶ 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

# Introduction

## ► La diode est une élément fondamental en électronique

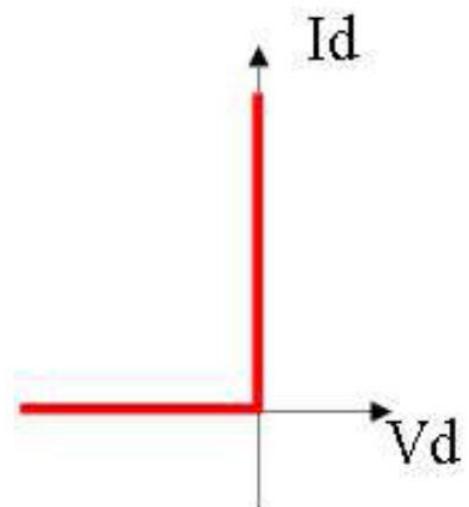
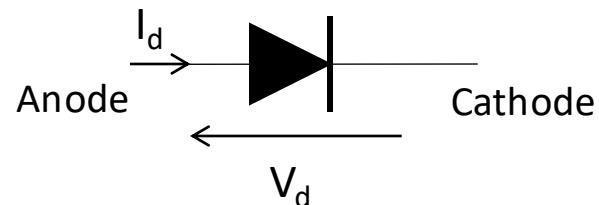
- Elle est un composant essentiel pour réaliser des alimentations continues
  - ✓ Passer du 200 Volt au 12 volt continu
  - ✓ Régulateur de tension : diode Zener
- Elle permet le mesurer la puissance d'un signal
  - ✓ Elle récupère l'amplitude d'un signal
    - ❖ Dans tous les téléphones portables
- 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

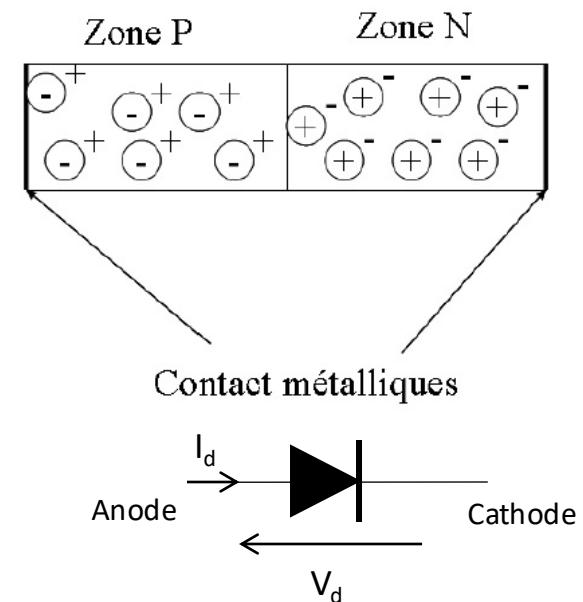


- $I_d$  est le courant qui traverse la diode,  $V_d$  est la tension à ses bornes
- Son fonctionnement théorique est le suivant :
  - ✓ Pour  $V_d < 0$ ,  $I_d = 0$ , la diode est un circuit ouvert : le courant ne passe pas
  - ✓ Pour  $V_d > 0$ , la diode est un court circuit, le courant passe à travers 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 :

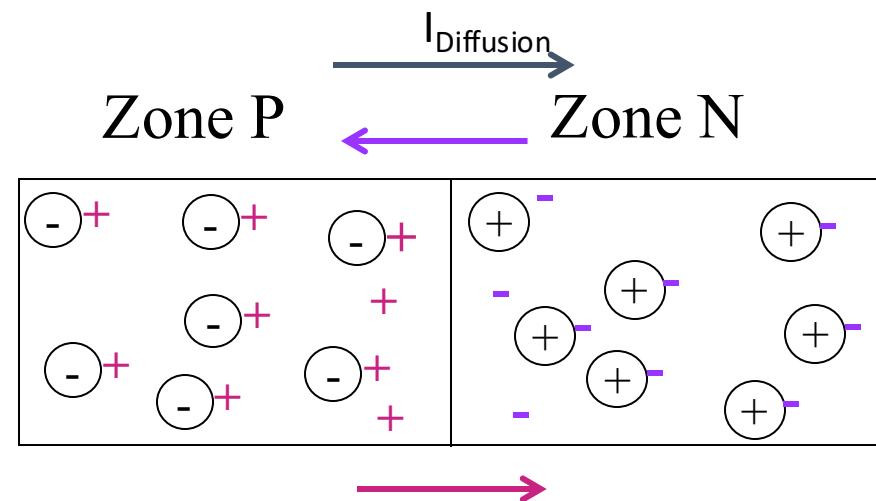
- D'un semiconducteur dopé P, avec des ions négatifs, électriquement neutre
- D'un semiconducteur dopé N, avec des ions positifs, électriquement neutre
- Les deux semiconducteurs sont accolés



# 1. Le fonctionnement de la diode PN

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

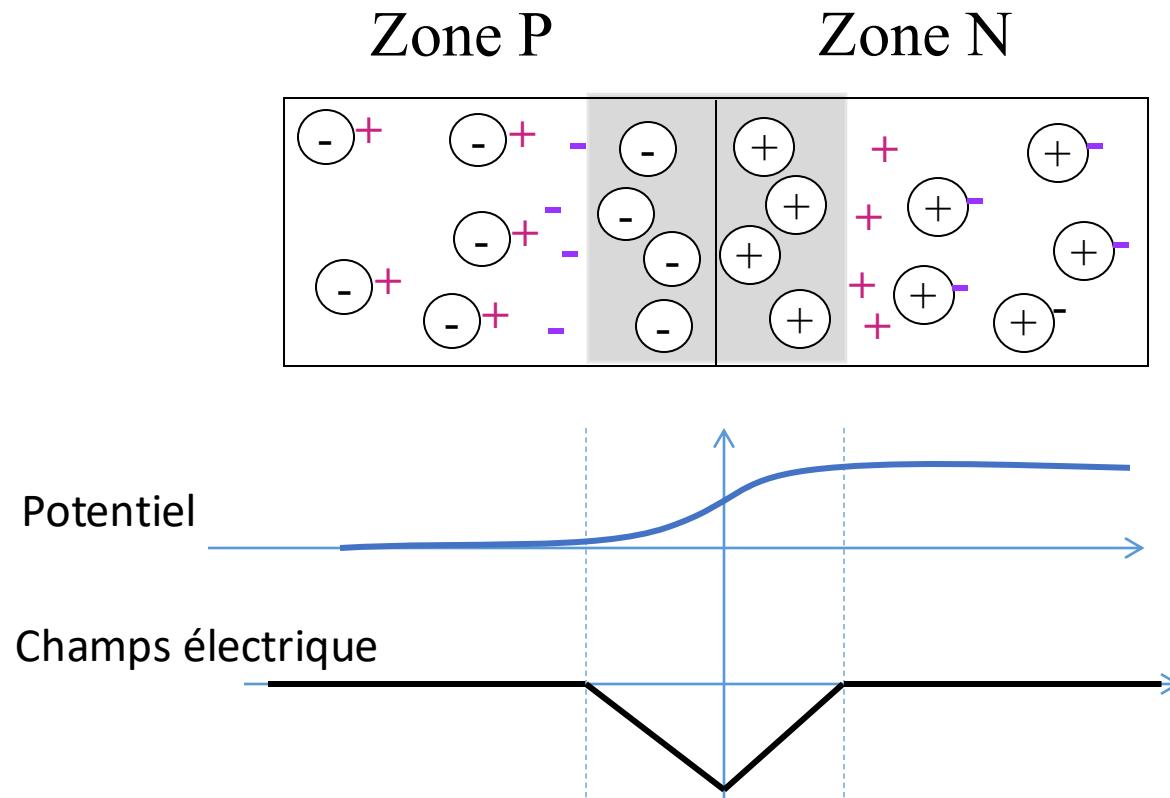
- La diode est à l'équilibre : il n'y a pas de tension appliquée à ses bornes
- Il se crée un courant de diffusion



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

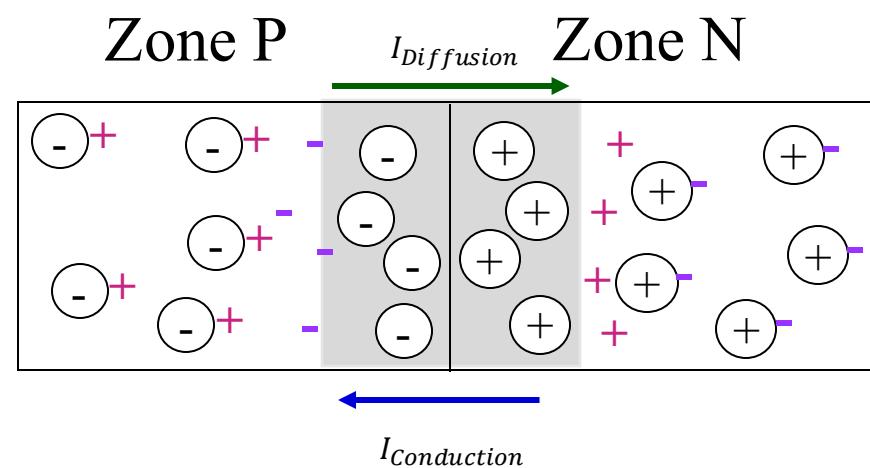
# 1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ Que se passe t'il lorsque l'on accolé 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 accolé 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



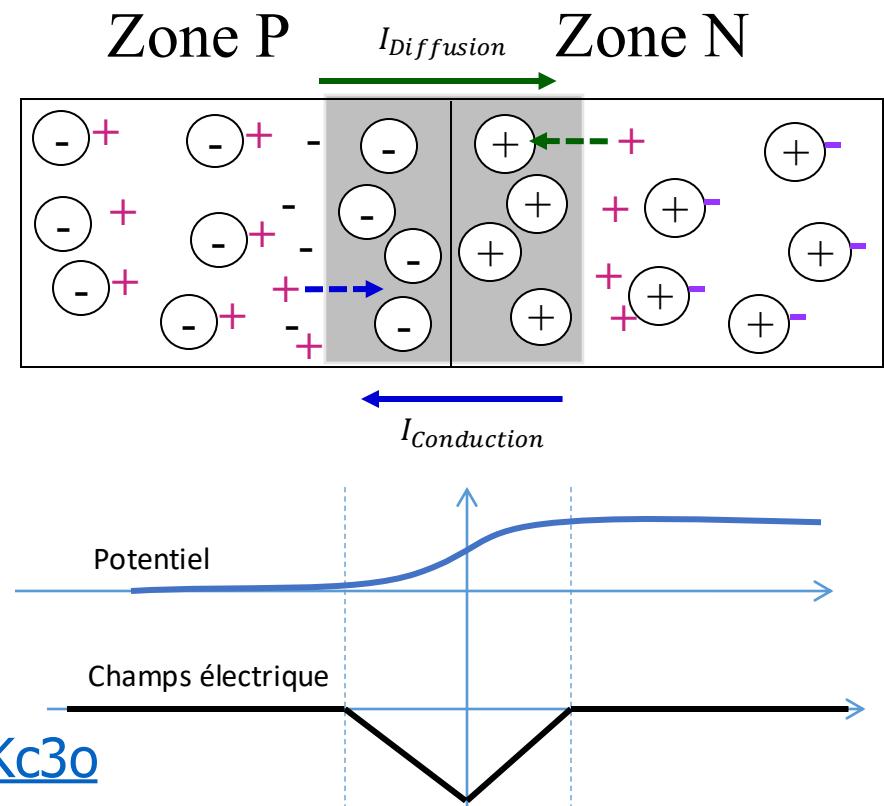
# 1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ Que se passe t'il lorsque l'on accolé 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](https://www.youtube.com/watch?v=ll313_OKc3o)

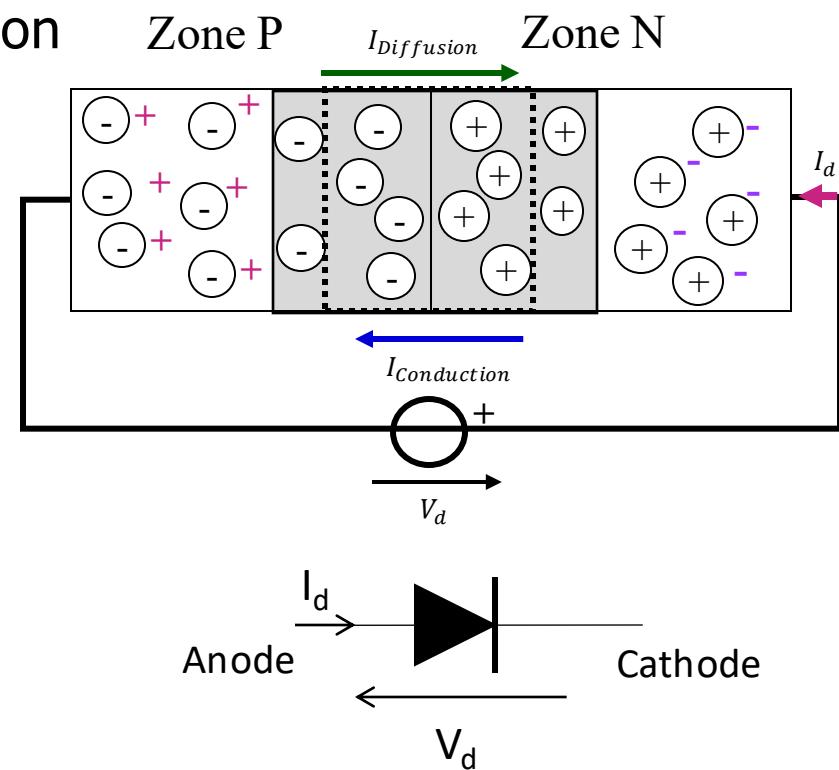
# 1. Le fonctionnement de la diode PN

## ► 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

$$\diamond C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{\left(1 + \frac{V_D}{\varphi_0}\right)^m}}$$

- $m=1/2$  ou  $1/3$

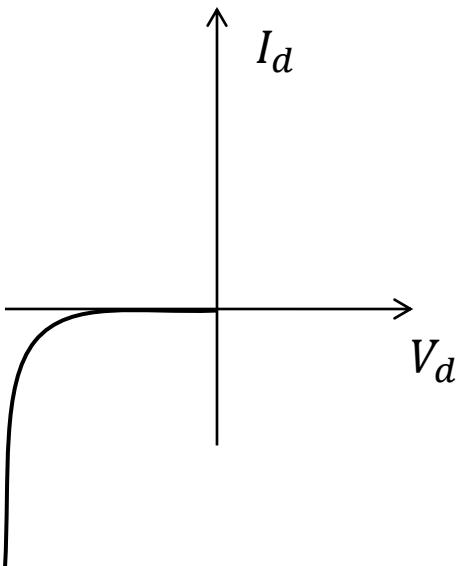


# 1. Le fonctionnement de la diode PN

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

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

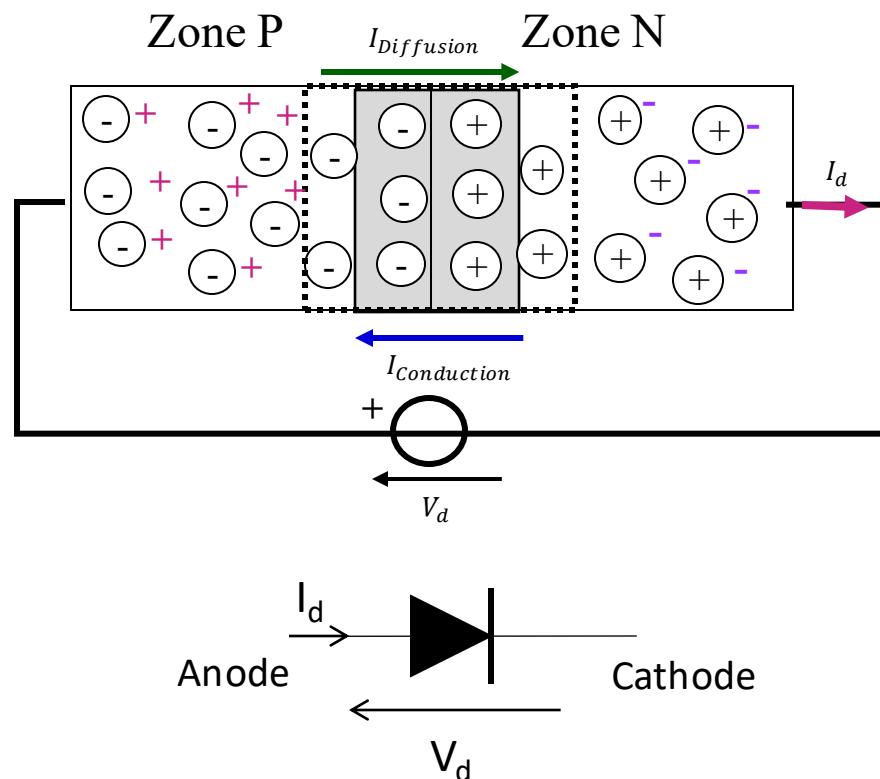
- ✓ Il se passe un phénomène de claquage de la jonction
    - ❖ Le champs électrique augmente dans la zone déplétée
    - ❖ Un fort courant  $I_D$  inverse se crée
  - ✓ Il y a deux effets qui génèrent ce courant: l'un est destructif, l'autre non
    - ❖ Effet Zener : pour une diode courte
      - Le champs 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 champs 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 passe des porteurs
  - ✓ Au-delà d'un certain seuil, le courant se met à circuler
    - ❖  $V_d > V_{seuil} \approx 0.6V$
    - ❖  $I_d > 0$



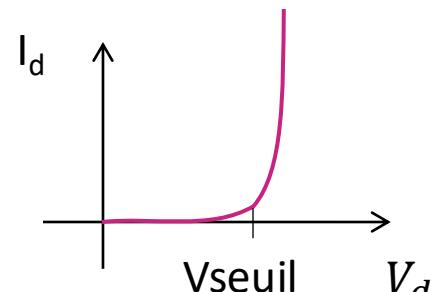
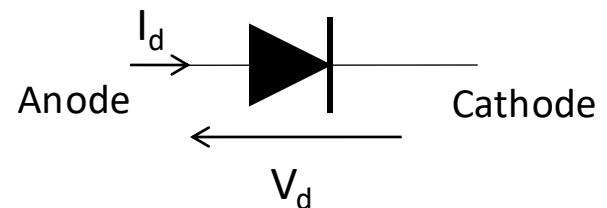
# 1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ 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

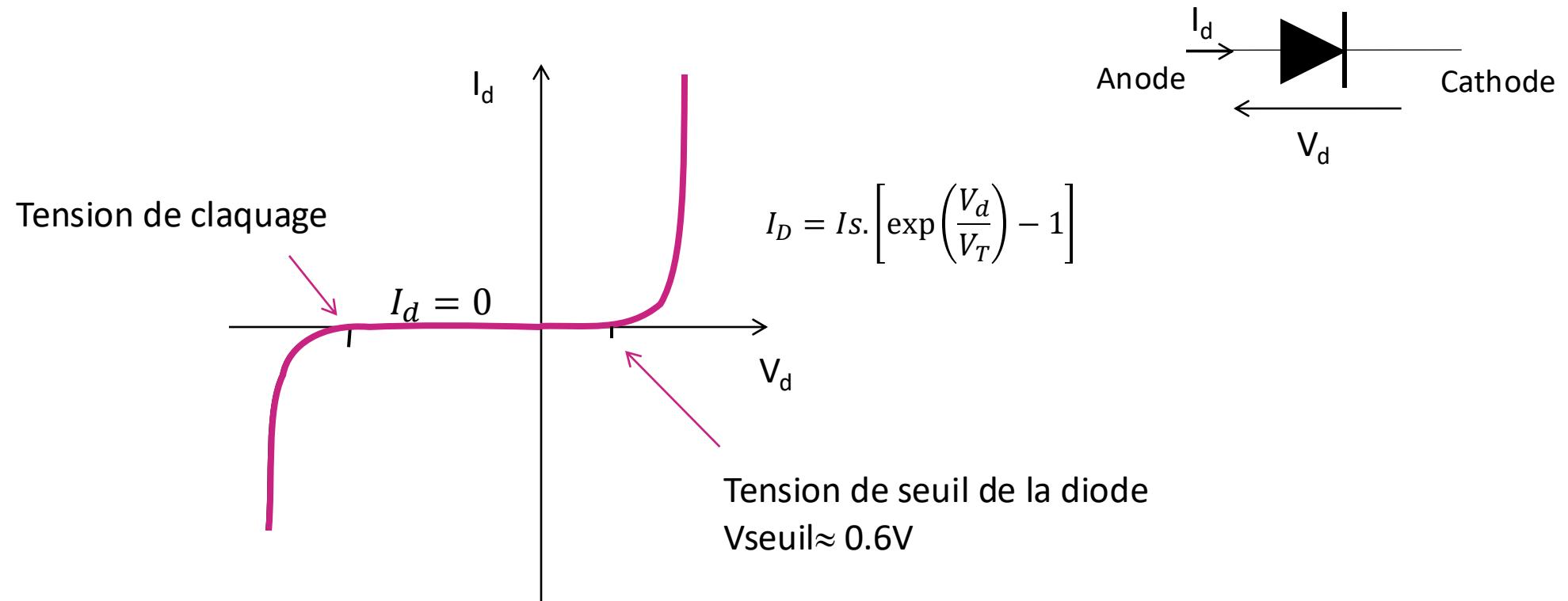
$$I_D = I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right]$$

- ✓ 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
      - $T = 290K$  : 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 :  $I_D = f(V_D)$

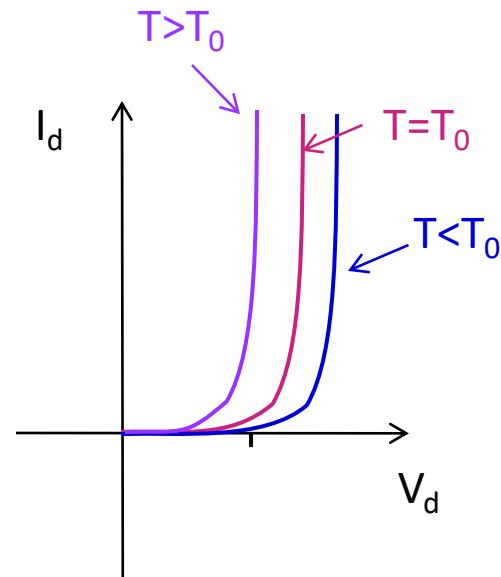


# 1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ Attention : la caractéristique de la diode varie en fonction de la température

- Cette variation est très stable et connue

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

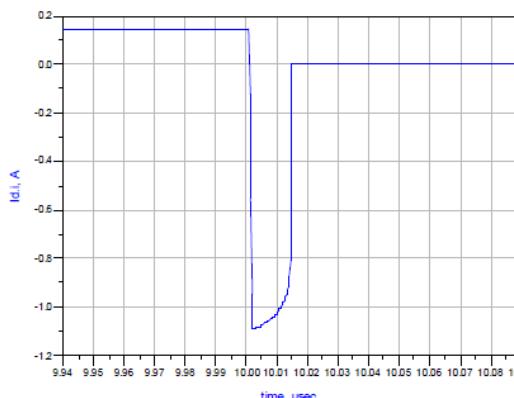
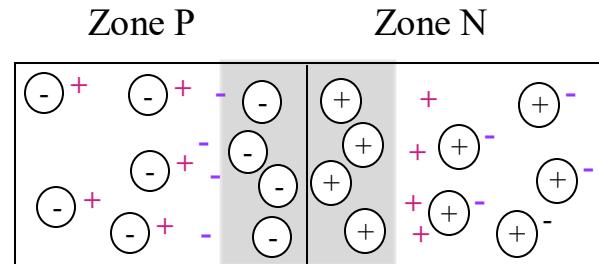


- On utilise la diode pour faire des mesures de température

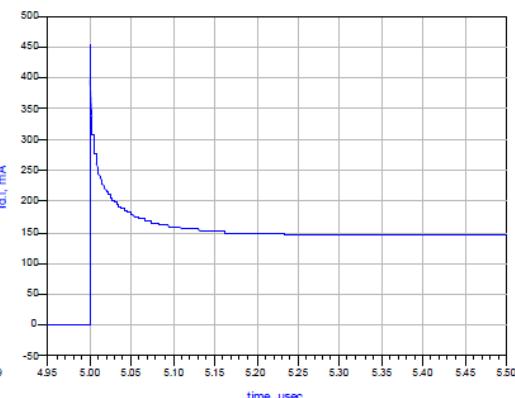
# 1. Le fonctionnement de la diode PN

- ▶ 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 de 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 :  $I_{d1} = I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_{d1}}{V_T}\right) - 1 \right]$

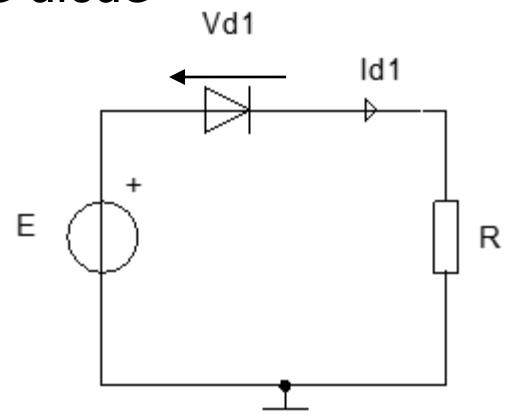
- Si on remet la seconde équation dans la première , nous obtenons :

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

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

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

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

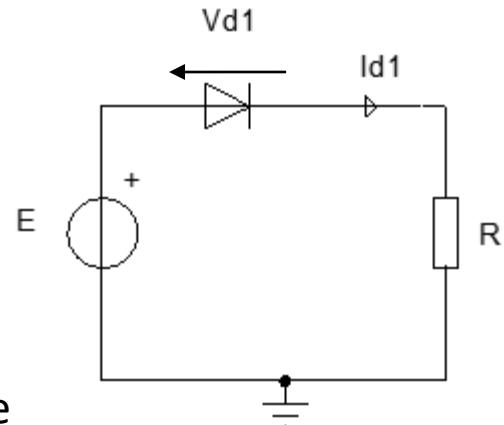
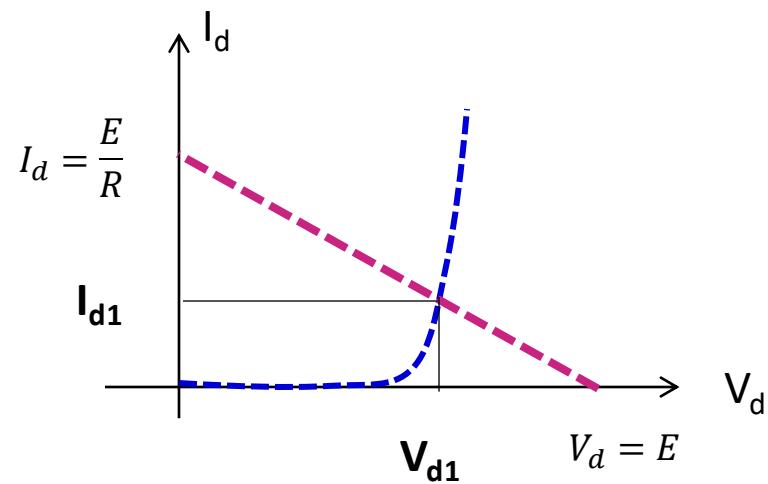


# 2. Modèles équivalents de la diode

## ▶ 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

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

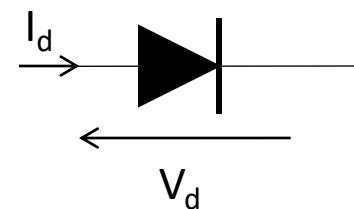


# 2. Modèles équivalents de la diode

## ▶ Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

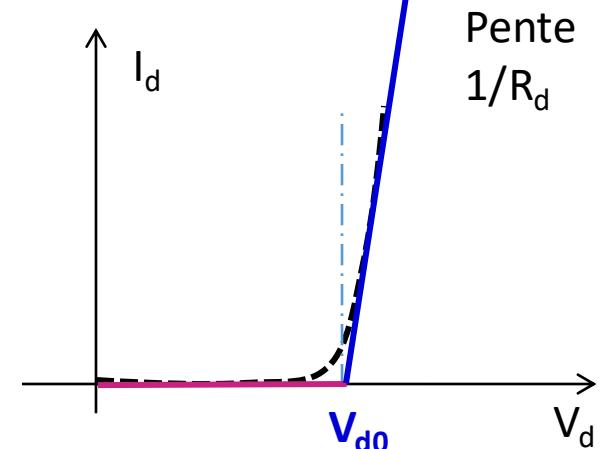
- Troisième solution : on utilise un modèle équivalent par approximation de sa caractéristique
- On identifie deux parties sur la caractéristique

- ✓ En dessous de la tension  $V_{d_0}$ , il n'y a pas de courant
  - ❖ La diode est un circuit ouvert

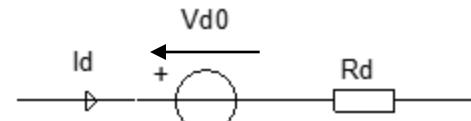


- ✓ Au dessus de la tension  $V_{d_0}$ , la caractéristique est une droite
  - ❖ Elle passe par le point ( $V_d = V_{d_0}, I_d = 0$ )
  - ❖ Sa pente est homogène à l'inverse d'une résistance :  $\frac{\Delta I_d}{\Delta V_d} = \frac{1}{R_d}$
  - ❖ La relation entre le courant  $I_d$  et  $V_d$  pour  $V_d \geq V_{d_0}$  s'écrit:

$$I_d = \frac{V_d - V_{d_0}}{R_d} \Leftrightarrow V_d = V_{d_0} + R_d \cdot I_d$$



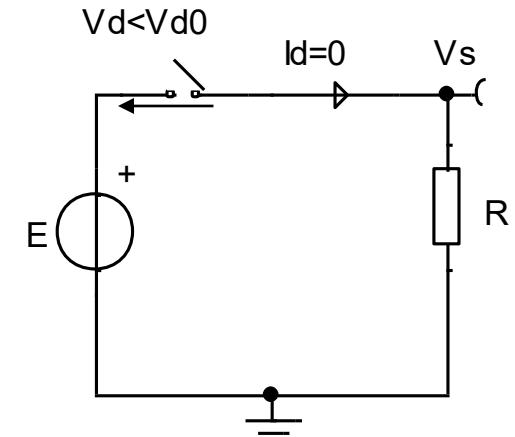
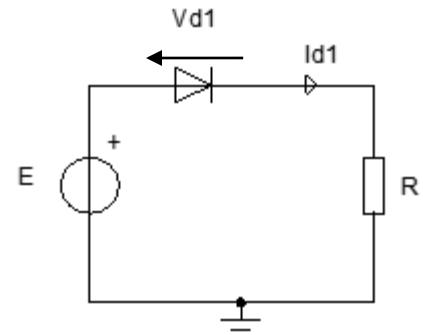
- ✓ On peut ainsi en déduire un modèle équivalent de la diode pour  $V_d \geq V_{d_0}$
- C'est le modèle Grand Signal de la diode



# 2. Modèles équivalents de la diode

## ▶ Comment calcule t'on un circuit comprenant une diode ?

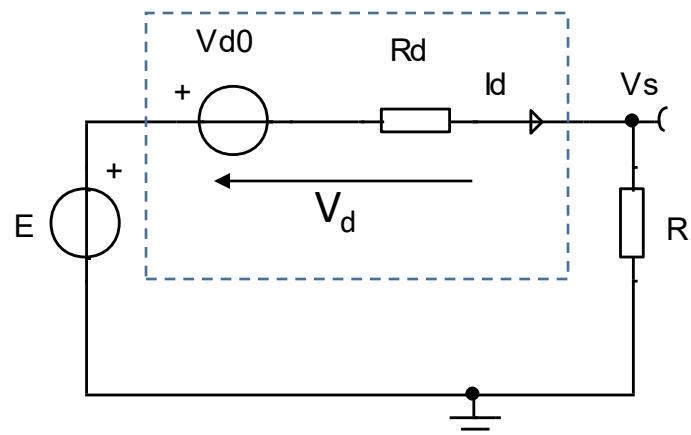
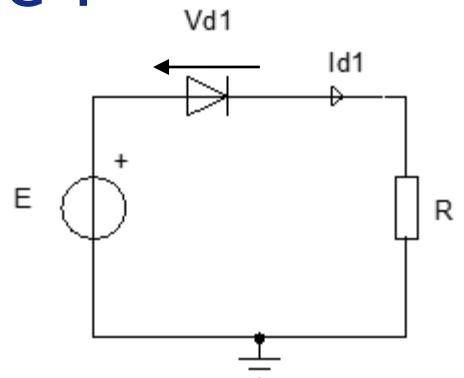
- On utilise le modèle grand signal pour calculer le montage
  - ✓ Comme la diode à deux modes de fonctionnement différents
    - ❖ il faut donc faire deux sous-circuits : diode bloquée ou diode passante
  - ✓ Il faut donc savoir quand elle est bloquée ou quand elle est passante
    - ❖ La loi des mailles 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  $V_d \geq V_{d_0}$
  - ✓ Donc tant que  $E < V_{d_0}$ , 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  $E \geq V_{d_0}$ 
  - ❖ On remplace alors la diode par son schéma équivalent
  - ❖ on fait le calcul du montage
    - Il suffit d'appliquer une loi des mailles



$$E = V_{d_0} + R_d \cdot I_d + R \cdot I_d$$

$$\Rightarrow I_d = \frac{E - V_{d_0}}{R_d + R}$$

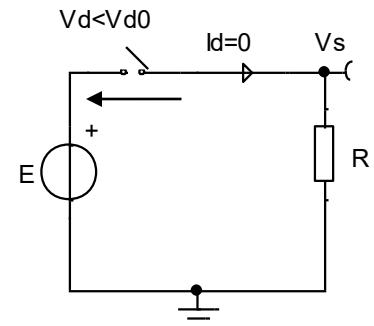
$$\Rightarrow V_S = R I_d = R \frac{E - V_{d_0}}{R_d + R}$$

# 2. Modèles équivalents de la diode

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

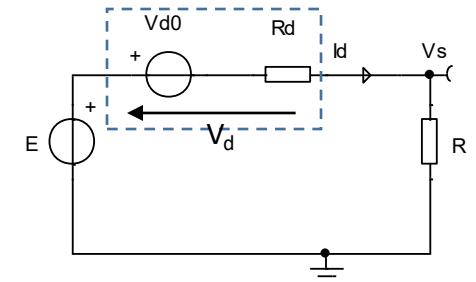
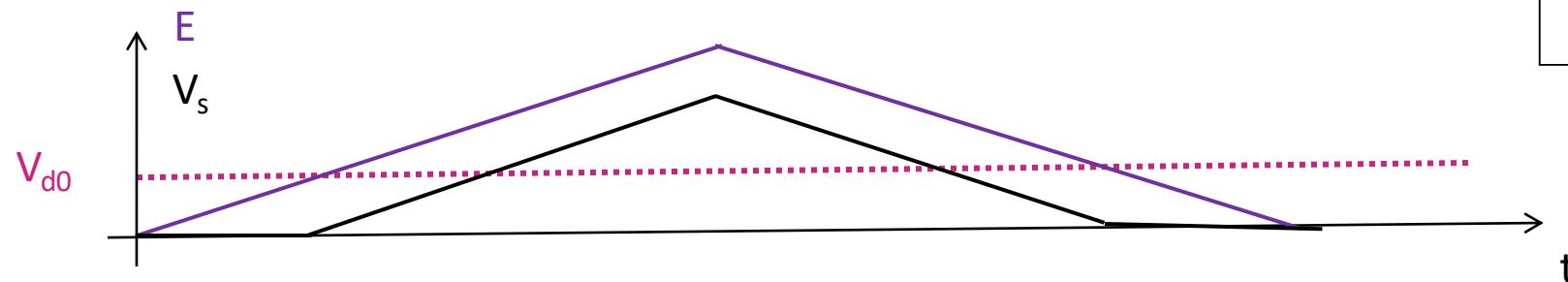
- On obtient deux modes de fonctionnement du montage

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



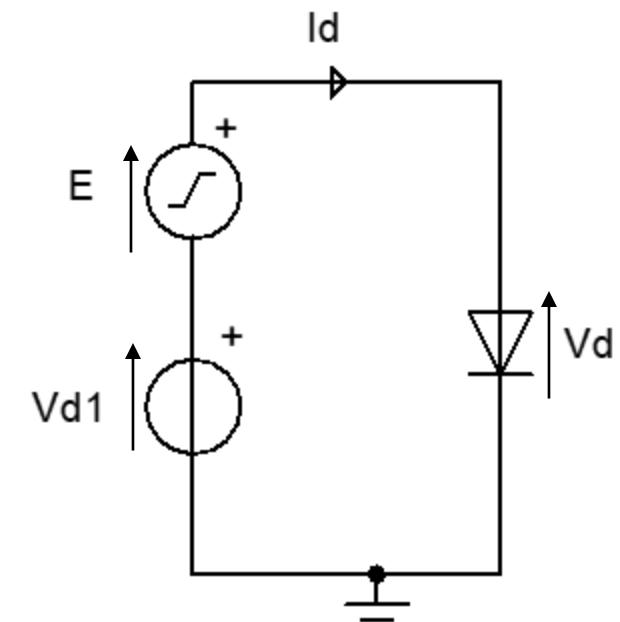
✓ Pour  $E \geq V_{d0}$ , le courant circule dans le montage et l'équation devient :

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



# 2. Modèles équivalents de la diode

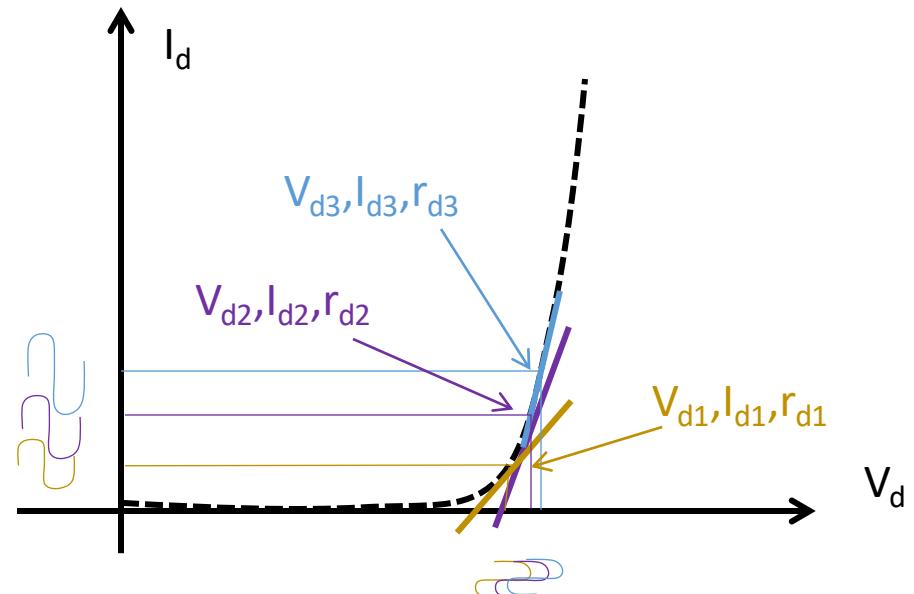
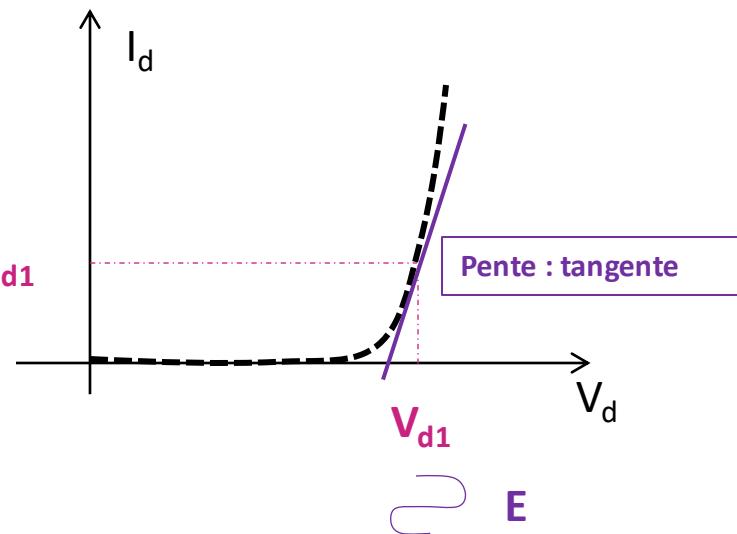
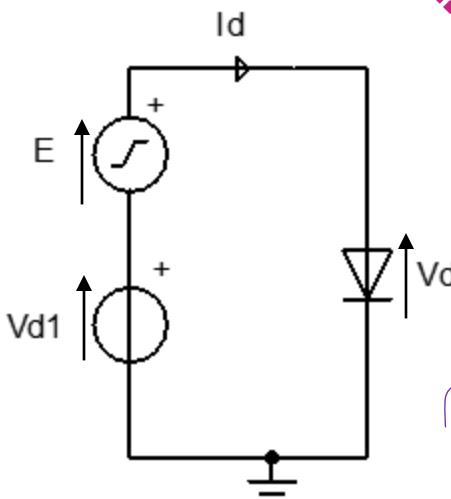
- ▶ Il existe un autre modèle pour la diode quand l'amplitude du signal sur  $V_d$  est de petite amplitude
  - ✓ L'approximation du fonctionnement sur la grande caractéristique n'a plus de sens
  - ✓ **C'est un modèle dit petit signal** (amplitude petite)
- Le signal ici varie autour d'une valeur continue  $V_{d_1}$ 
  - ✓ 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 :  $\exp\left(\frac{V_{d1}}{V_T}\right) \gg 1$

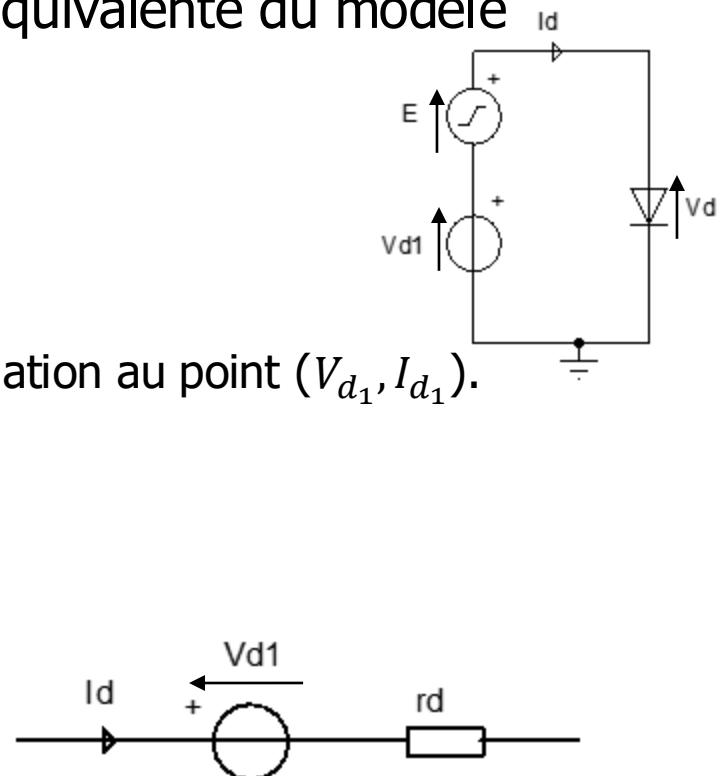
$$I_d = I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \approx I_s \cdot \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right)$$

✓ 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

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

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

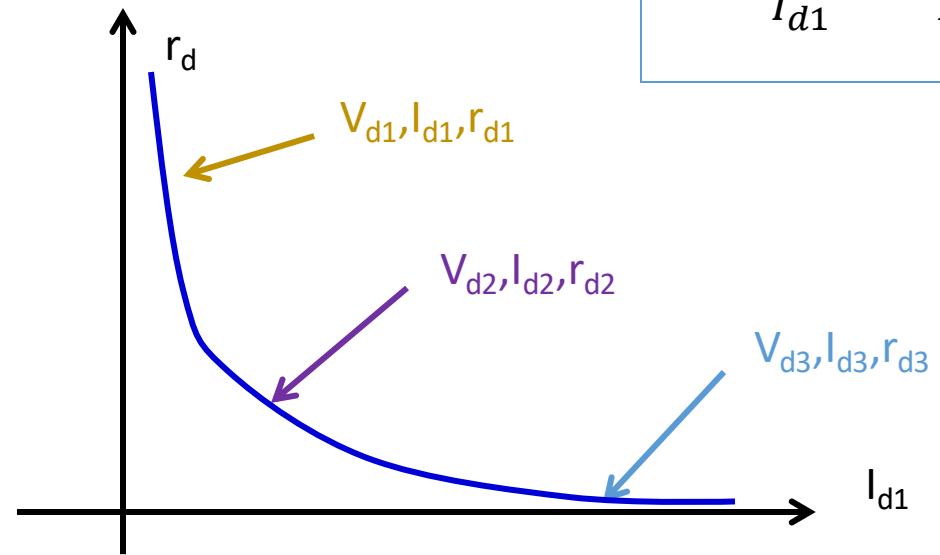
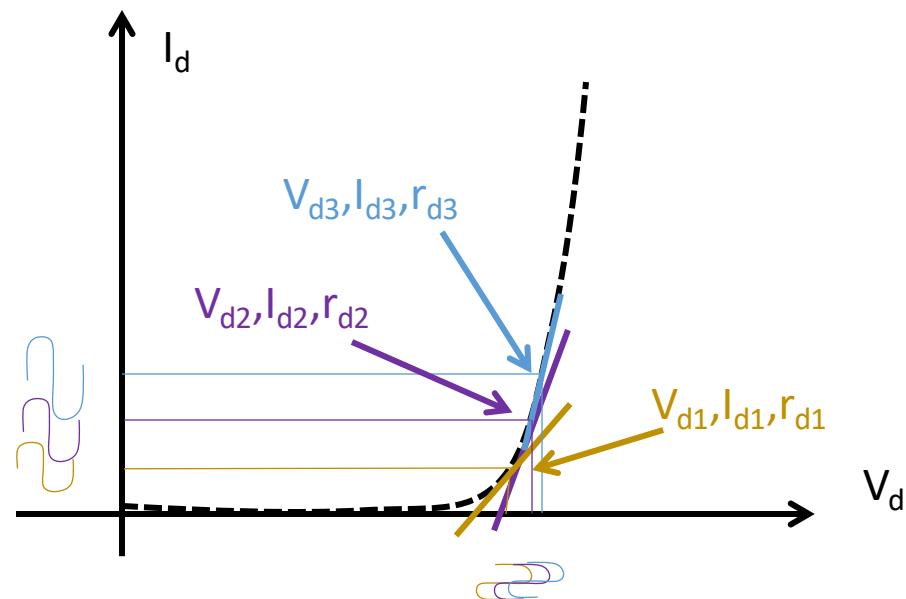
$$V_d = V_{d1} + r_d \cdot I_d$$



# 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  $V_{d_0}$
  - ✓ Qu'elle est très faible quand le point de polarisation augmente

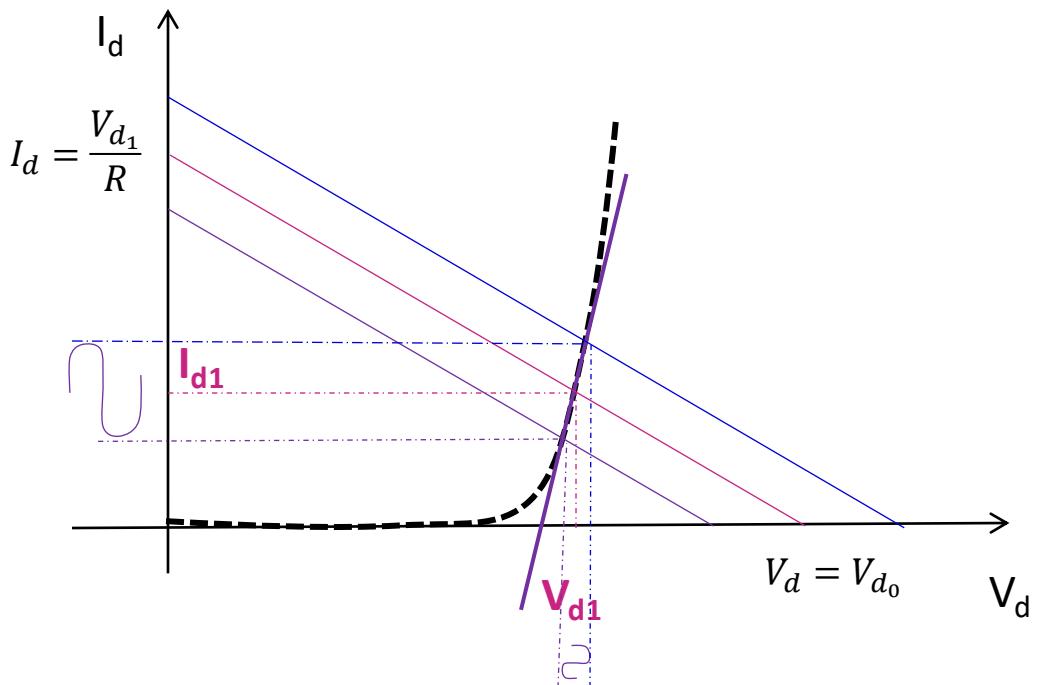
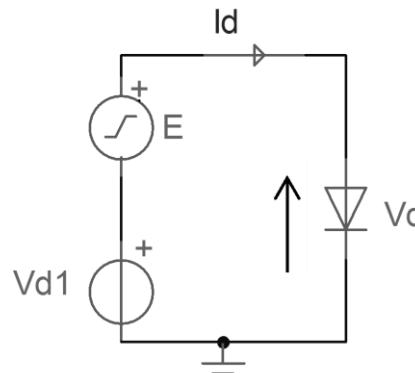


$$r_d = \frac{V_T}{I_{d1}} = \frac{26 \cdot e^{-3}}{I_{d1}}$$

# 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

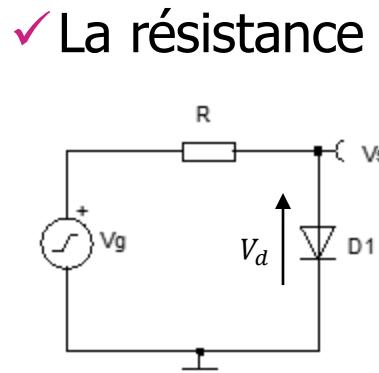
## ▶ Montages classiques

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

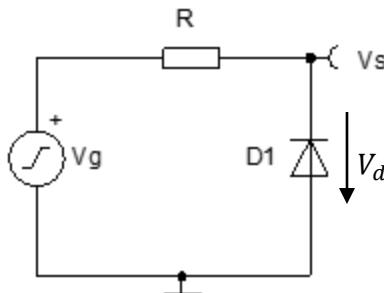
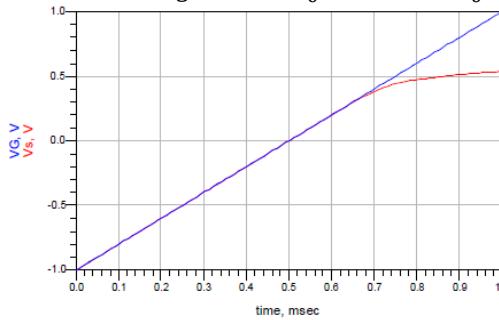
# 3. Circuits élémentaires

## ► Les circuits simples de limitation de tension

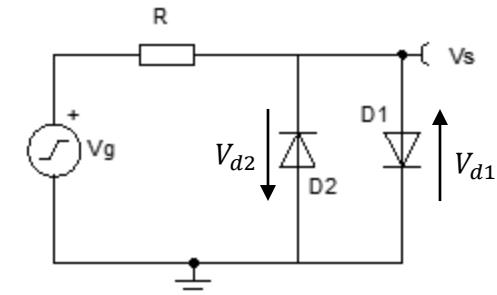
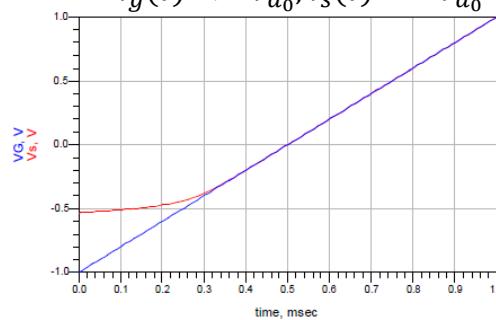
- Lorsque la diode est passante, sa tension se stabilise autour de  $V_{d_0}$



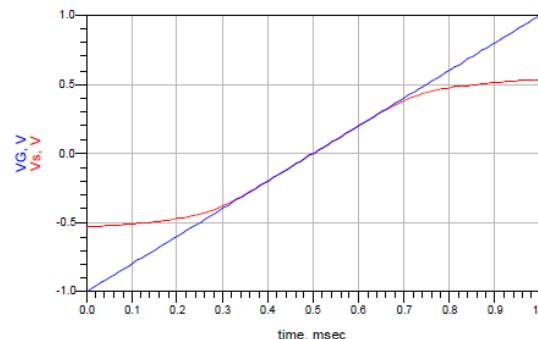
- $V_g(t) < V_{d_0}, V_s(t) = V_g(t)$
- $V_g(t) \geq V_{d_0}, V_s(t) \approx V_{d_0}$



- $V_g(t) > -V_{d_0}, V_s(t) = V_g(t)$
- $V_g(t) < -V_{d_0}, V_s(t) \approx -V_{d_0}$

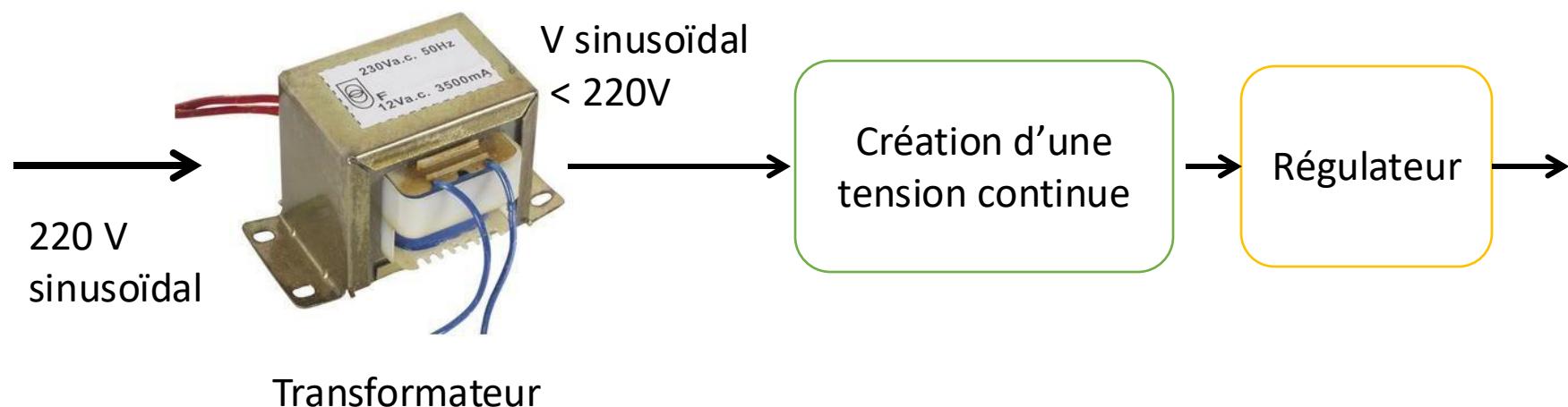


- $V_g(t) \geq V_{d_0(D1)}, V_s(t) \approx V_{d_0(D1)}$
- $-V_{d_0(D2)} < V_g(t) < V_{d_0(D1)}, V_s(t) = V_g(t)$
- $V_g(t) < -V_{d_0(D2)}, V_s(t) \approx -V_{d_0(D2)}$



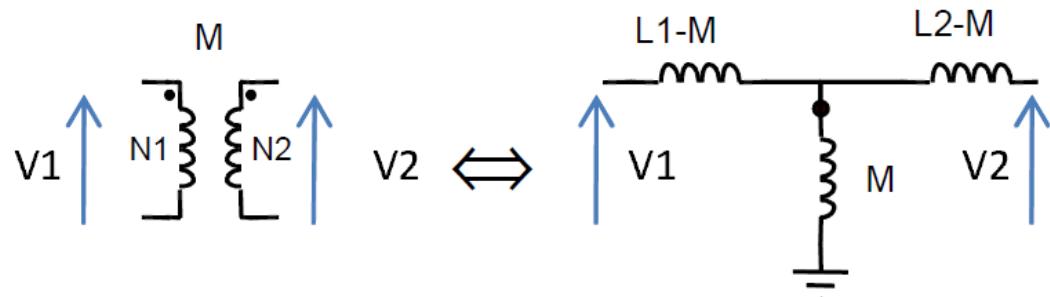
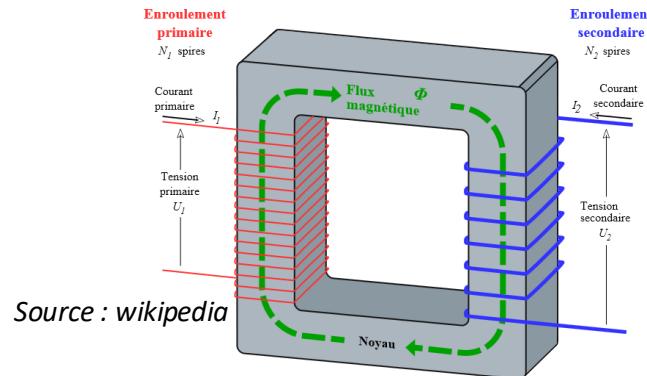
# 3. Circuits élémentaires

- ▶ 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

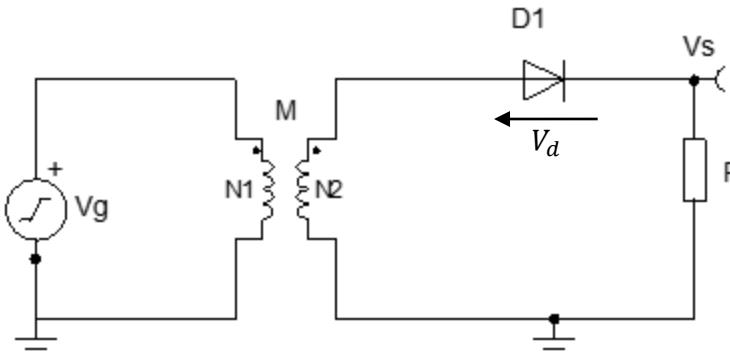


- ✓ Rapport de transformation :  $n = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$
- ✓ Inductance mutuelle :  $M$
- ✓ Coefficient de couplage  $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$ , il vaut 1 si le couplage est parfait
- Pour la suite, on prendra un transformateur idéal parfait avec  $N_1 = N_2$ 
  - ✓ 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

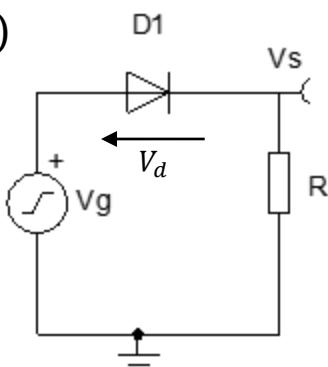
- ▶ 1<sup>er</sup> circuit de redressement : le redressement monoalternance
  - Le circuit est simplement constitué d'une diode et d'une résistance

✓ Schéma de principe



✓ On simplifie le schéma en considérant le transformateur comme idéal

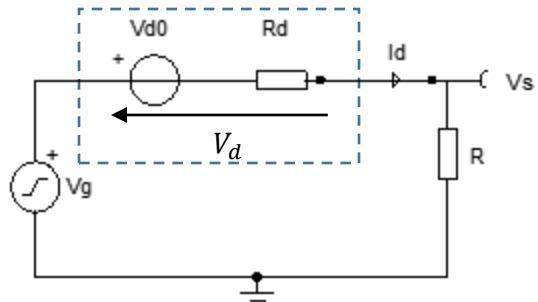
❖ On pose donc :  $V_2(t) = V_g(t)$



# 3. Circuits élémentaires

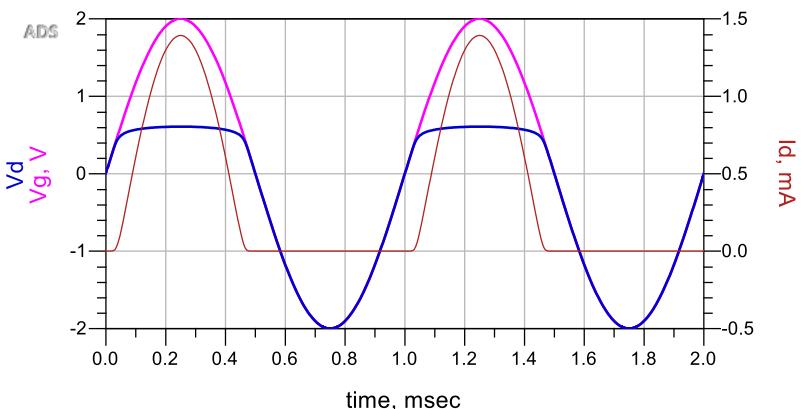
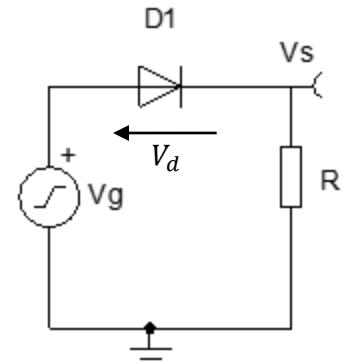
## ► 1<sup>er</sup> circuit de redressement : le redressement monoalternance

- Le fonctionnement est le même que celui déjà étudié
  - ✓ La diode est bloquée tant que la tension à ses bornes n'atteint pas  $V_{d_0}$ 
    - ❖ Donc tant que :  $V_g(t) < V_{d_0}, V_s(t) = 0, I_d(t) = 0$
  - ✓ Une fois la diode passante, on la remplace par son schéma équivalent



❖ Pour  $V_g(t) \geq V_{d_0}, I_d(t) = \frac{V_g - V_{d_0}}{R + R_d}, V_s(t) = \frac{R}{R + R_d} (V_g(t) - V_{d_0})$

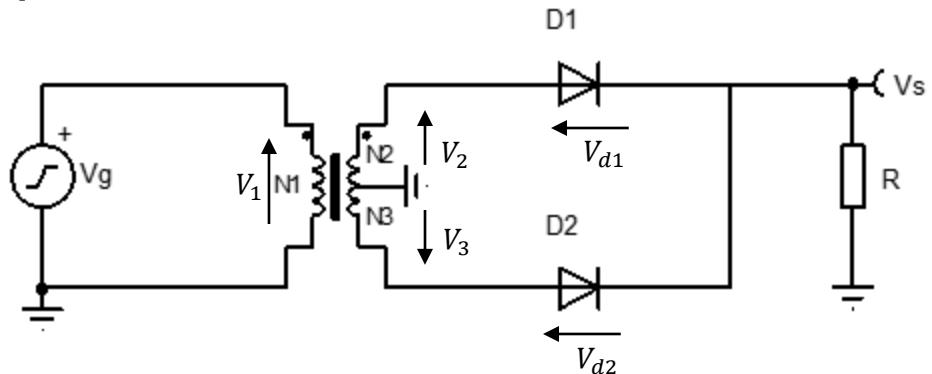
- ✓ On ne récupère que les alternances positives
  - ❖ Pour  $V_g(t) \geq V_{d_0}$



# 3. Circuits élémentaires

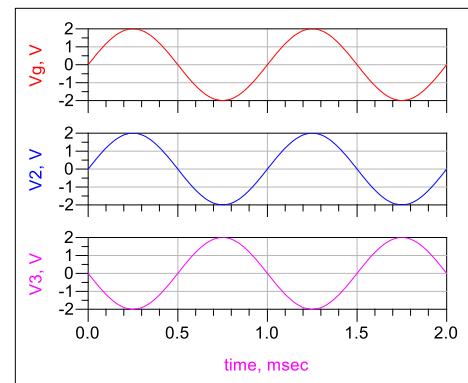
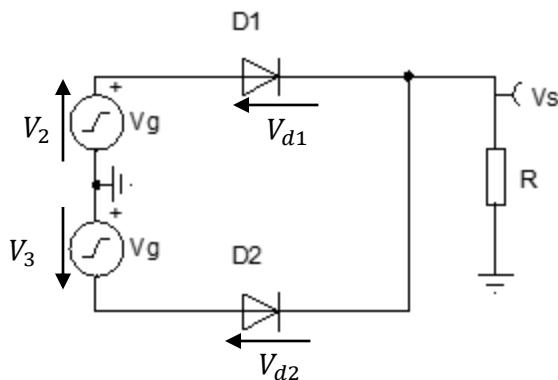
## ► 2<sup>nd</sup> circuit de redressement : le redressement double alternance

- 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

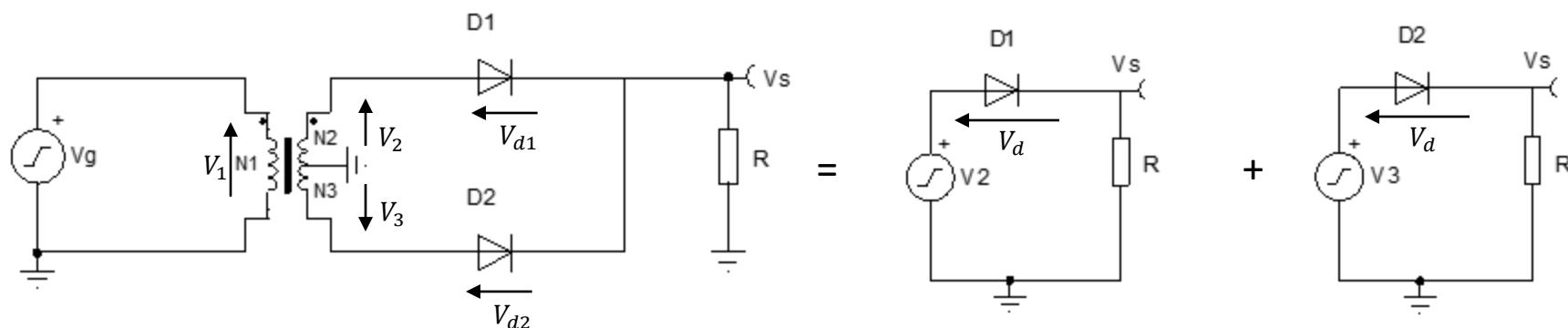
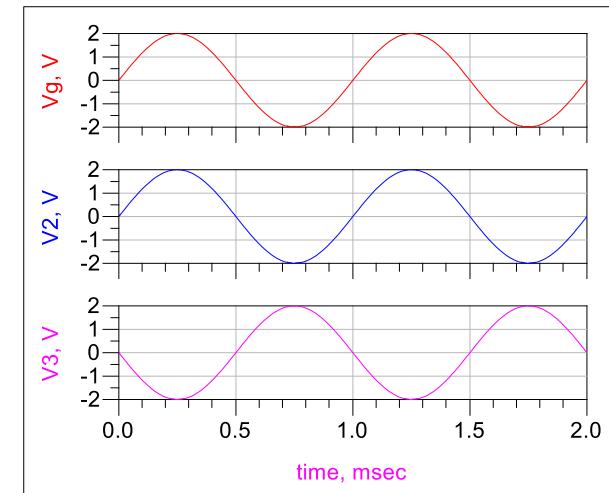
- ✓ La diode  $D_2$  voit le générateur  $-V_g(t)$
- ✓ Les diodes ne sont pas passantes en même temps



# 3. Circuits élémentaires

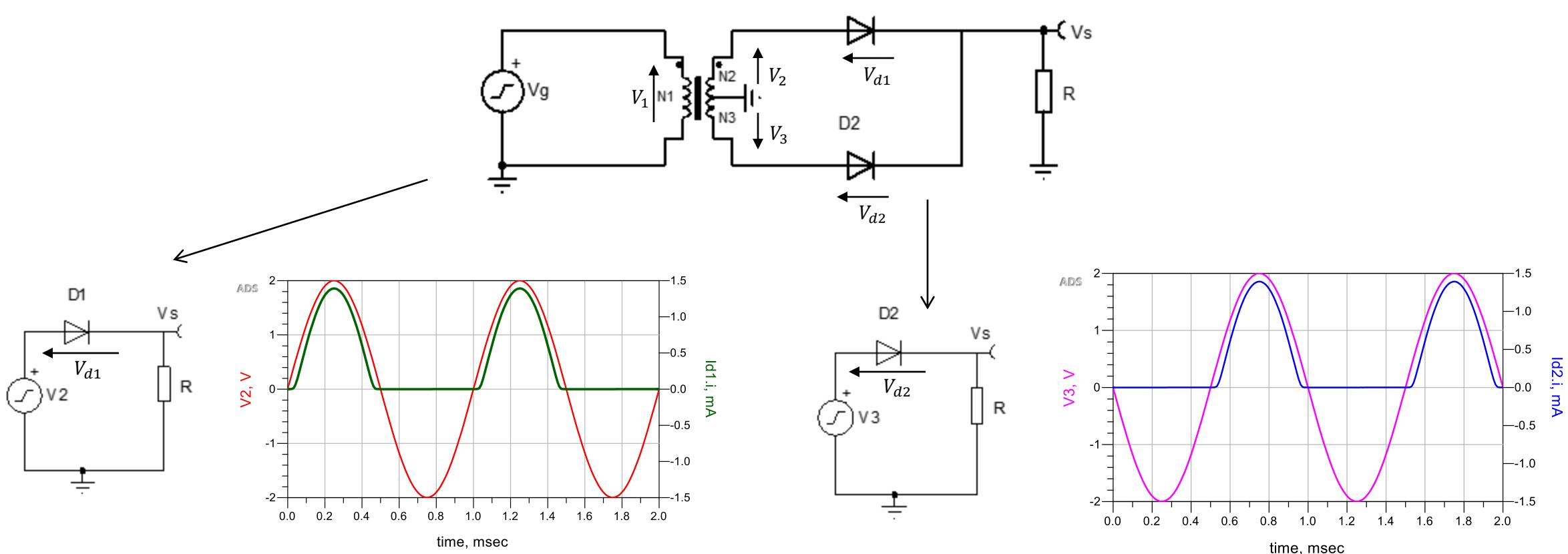
## ► 2<sup>nd</sup> circuit de redressement : le redressement double alternance

- 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

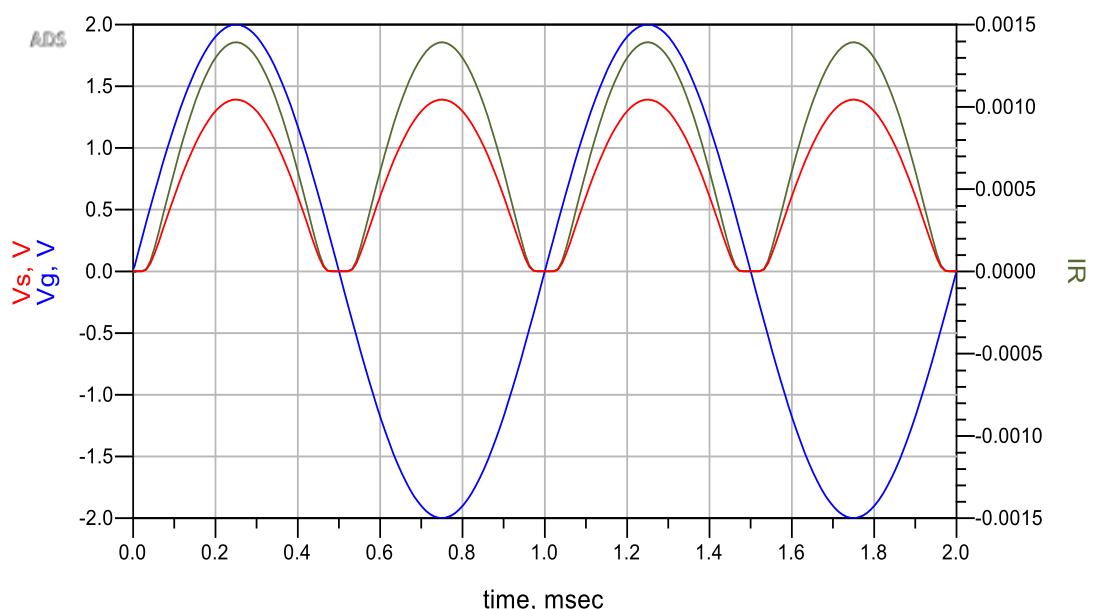
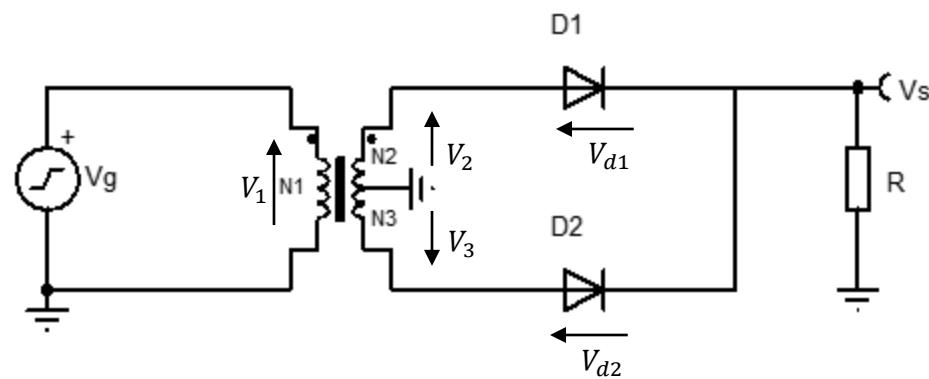
- ▶ 2<sup>nd</sup> circuit de redressement : le redressement double alternance
  - Les deux sous-circuits fonctionnent en alternance



# 3. Circuits élémentaires

## ► 2<sup>nd</sup> circuit de redressement : le redressement double alternance

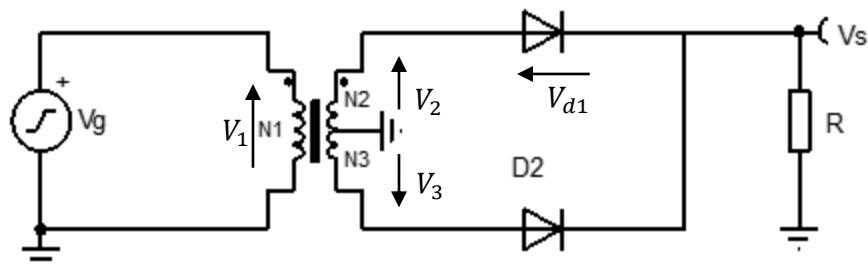
- Le fonctionnement final du montage est donc le suivant
  - ✓ En vert, le courant dans la résistance
  - ✓ En rouge, la tension  $V_s(t)$



# 3. Circuits élémentaires

## ► 2<sup>nd</sup> 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  $V_g(t_0) = V_{g_{max}}$

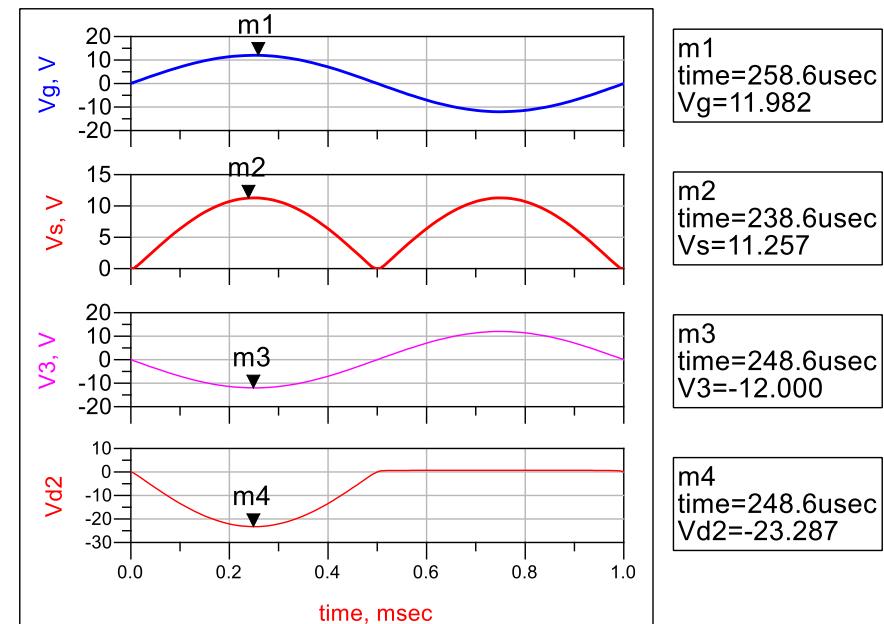


❖ Dans ce cas,  $V_s(t_0) \approx V_{g_{max}} - V_{d_0}$

✓ La tension aux bornes de  $D_2$  vaut :

$$\text{❖ } V_{d2}(t_0) = V_3(t_0) - V_s(t_0) = -V_{g_{max}} - (V_{g_{max}} - V_{d_0}) = -2V_{g_{max}} + V_{d_0}$$

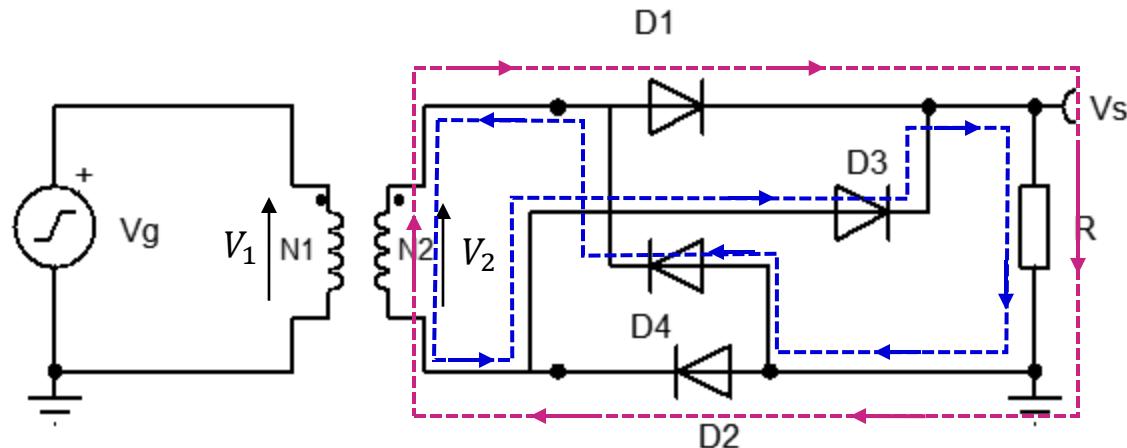
○ Pour  $V_{g_{max}} = 12V \Rightarrow V_{d2}(t_0) \approx -24V$  !!!



# 3. Circuits élémentaires

## ► 3ème 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**

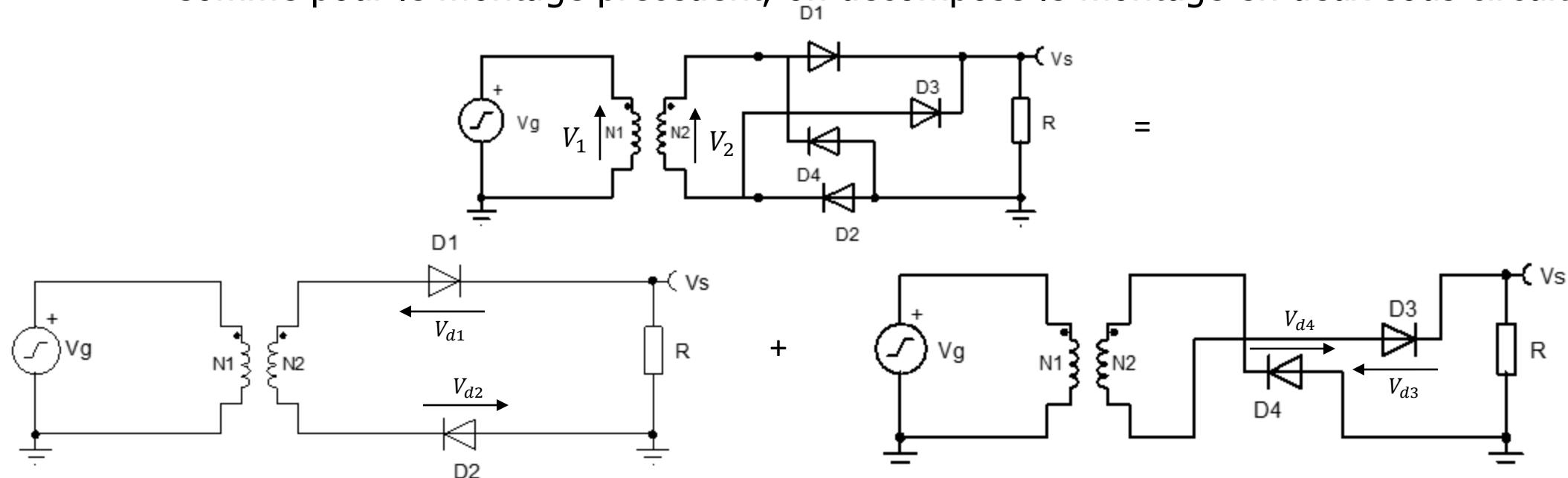


- Comme pour le montage précédent, on peut décomposer le montage en deux sous montage
  - ✓ D1 et D2 vont être passantes lorsque la tension du générateur est « positive »
  - ✓ D3 et D4 vont être passantes lorsque la tension du générateur est « négative »

# 3. Circuits élémentaires

## ► 3ème 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

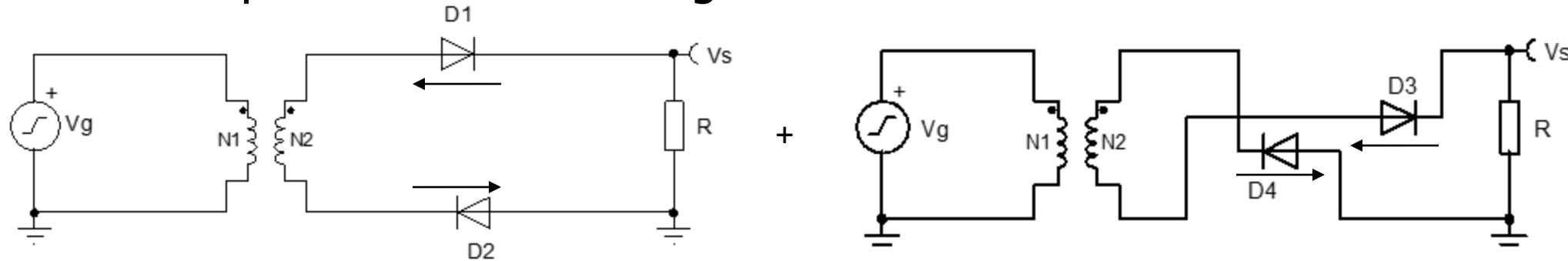


- On déplie le second montage en retournant le générateur et le transformateur

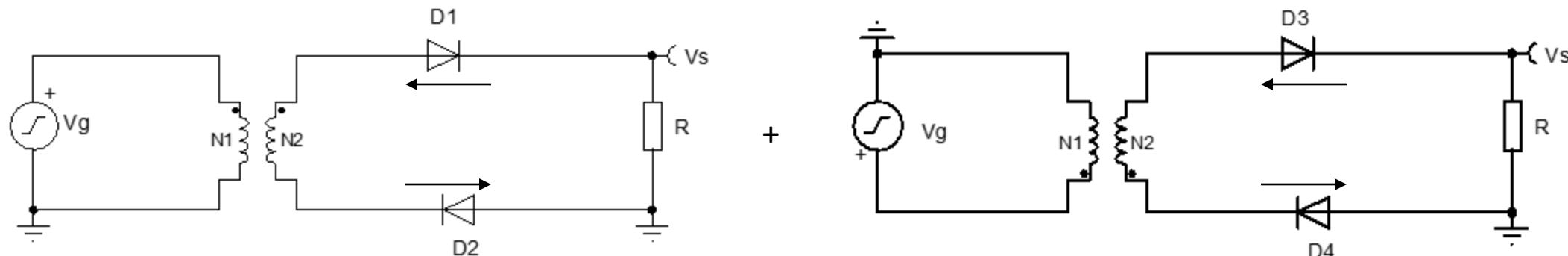
# 3. Circuits élémentaires

## ► 3<sup>ème</sup> circuit de redressement : le pont de diode

- On déplie le second montage



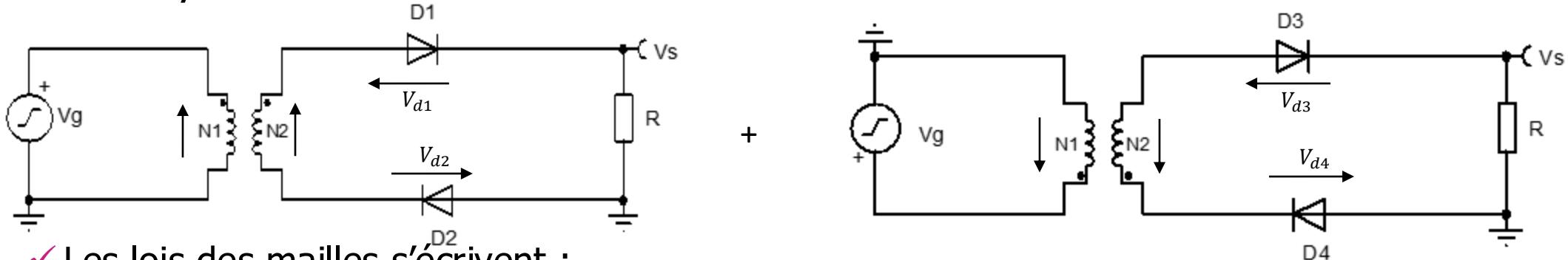
- Le montage est alors équivalent à :



# 3. Circuits élémentaires

## ► 3ème 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  $V_{d_0}$  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<sup>ème</sup> circuit de redressement : le pont de diode

- On analyse le fonctionnement des deux sous circuits

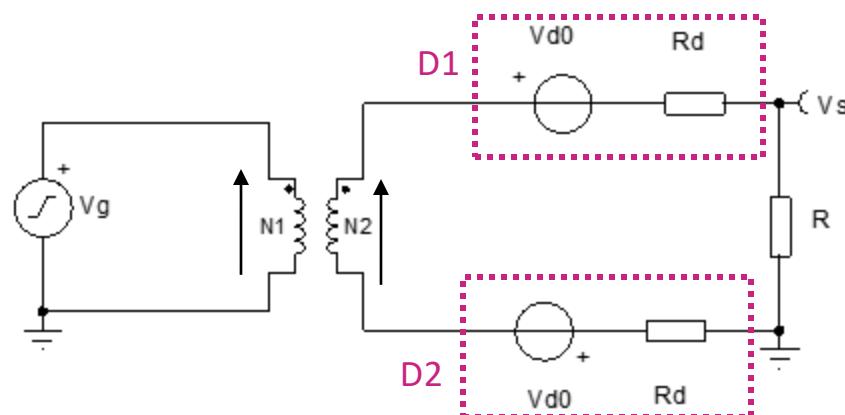
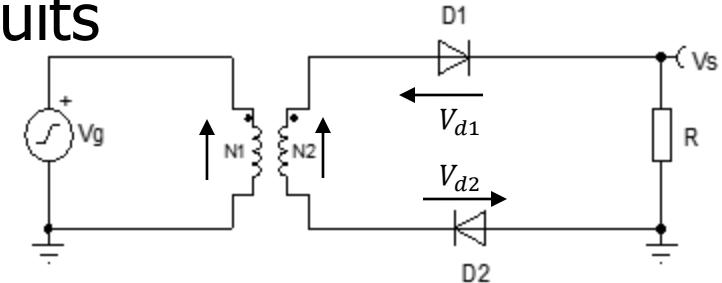
✓ Premier sous circuit composé de D1 et D2

✓ Quand  $V_g$  est sur l'alternance positive

❖ Si  $V_g(t) < 2V_{d_0}$  les deux diodes sont bloquées donc  $I_d(t) = 0, V_s(t) = 0$

❖ Dès que  $V_g(t) \geq 2V_{d_0}$  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<sup>ème</sup> circuit de redressement : le pont de diode

- On analyse le fonctionnement des deux sous circuits

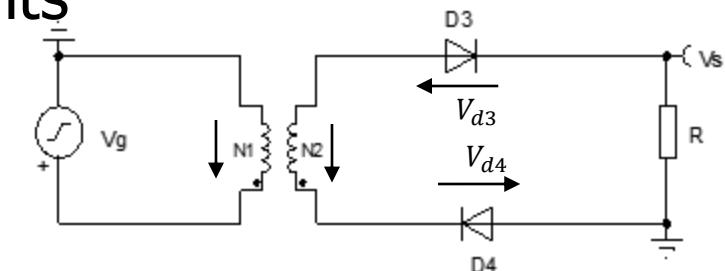
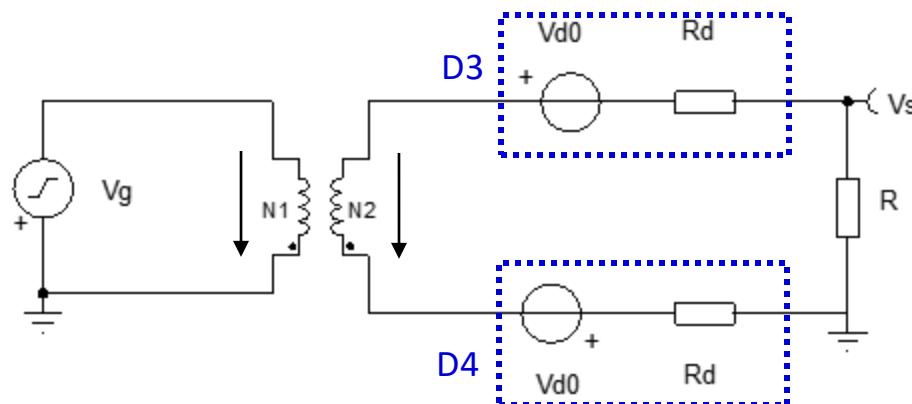
✓ deuxième sous circuit composé de D3 et D4

✓ Quand  $V_g$  est sur l'alternance positive

❖ Si  $-V_g(t) < 2V_{d_0}$ ,  $V_g(t) > 2V_{d_0}$  donc les deux diodes sont bloquées donc  $I_d = 0, V_s = 0$

❖ Dès que  $-V_g(t) \geq 2V_{d_0}$ , donc  $V_g(t) \leq -2V_{d_0}$  les deux diodes deviennent passantes

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

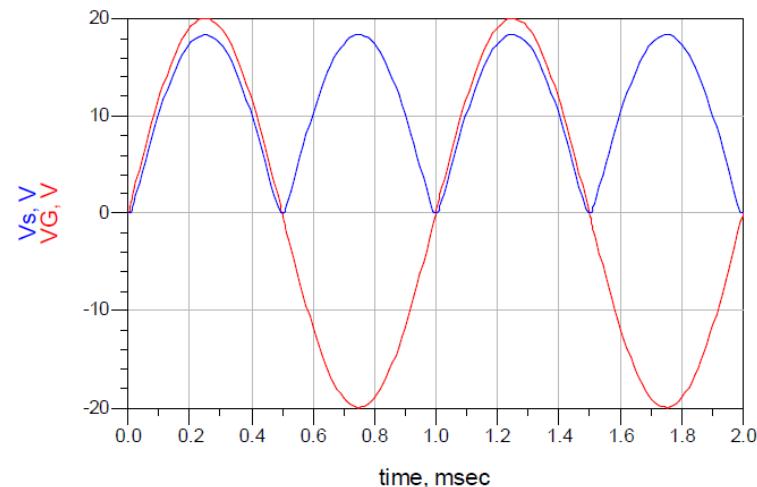
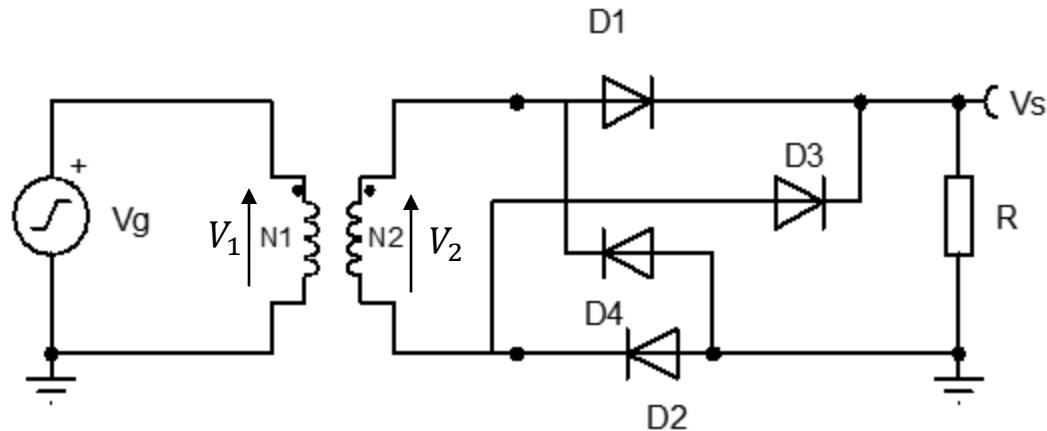


$$V_s(t) = \frac{R}{R + 2R_d} (V_g(t) - 2V_{d_0}) \text{ pour } V_g(t) \leq -2V_{d_0}$$

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

# 3. Circuits élémentaires

- ▶ 3<sup>ème</sup> circuit de redressement : le pont de diode
  - Au final le comportement du montage est le suivant :

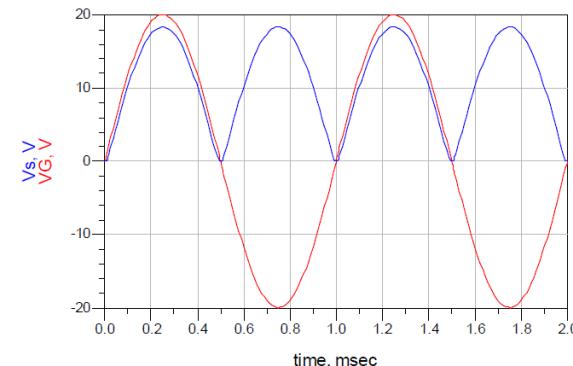
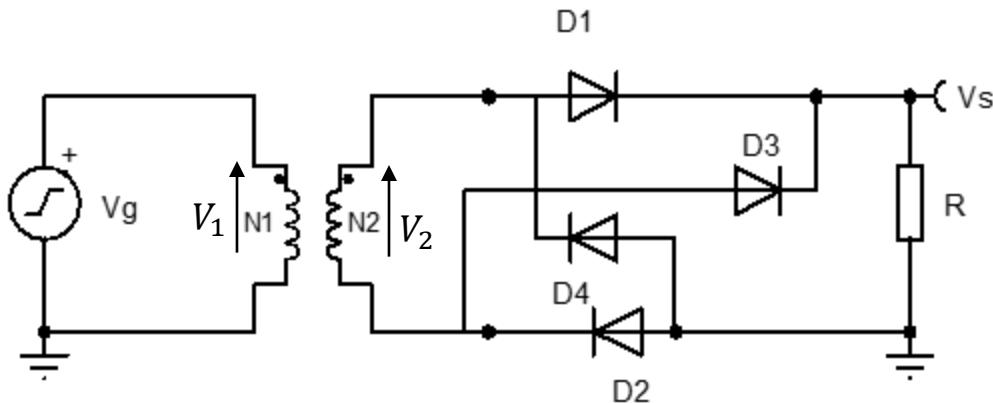


- ✓ Avec pour expression de la tension de sortie :

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

# 3. Circuits élémentaires

- ▶ 3<sup>ème</sup> 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  $V_g(t_0) = V_{g_{max}}$ ,  $V_s(t_0) \approx V_{g_{max}} - 2V_{d_0}$

❖ La tension appliquée à D3 et D4 est alors :

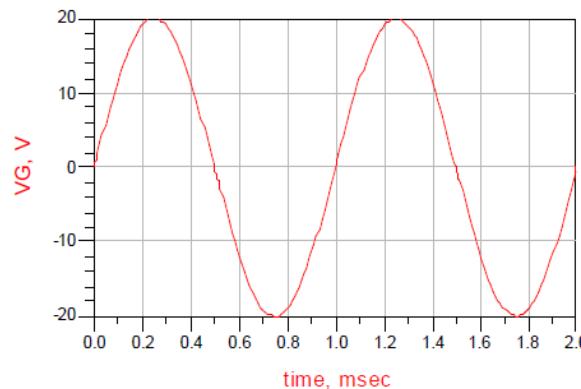
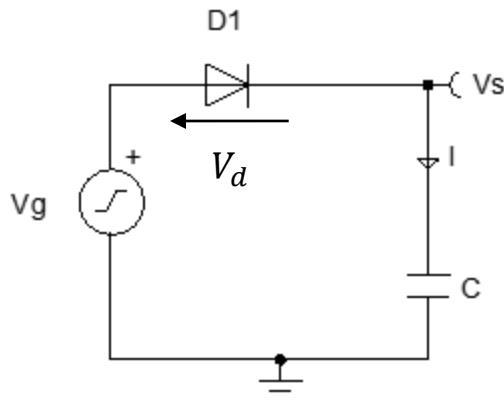
$$V_{d3}(t_0) + V_{d4}(t_0) = -V_{g_{max}} - V_{s_{max}} = -2V_{g_{max}} + 2V_{d_0}$$

❖ Chaque diode ne voit donc que la tension :  $V_{d3}(t_0) = V_{d4}(t_0) = -V_{g_{max}} + V_{d_0}$

# 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  $V_g(t) \geq V_{d_0}$

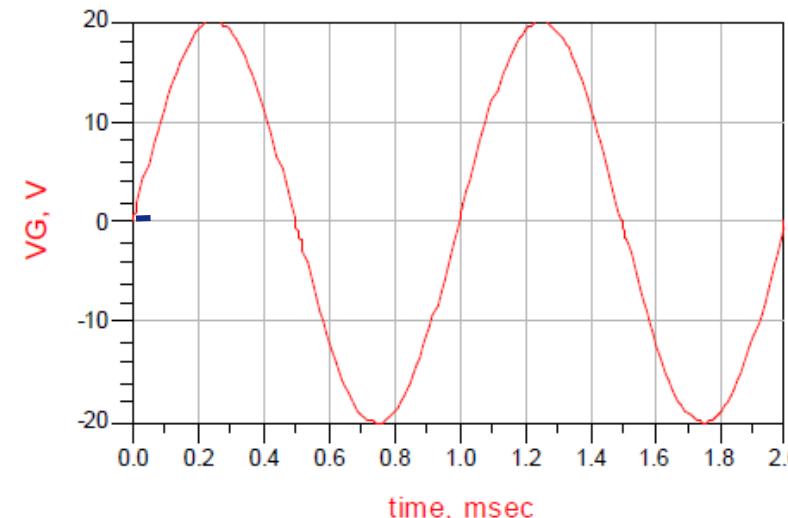
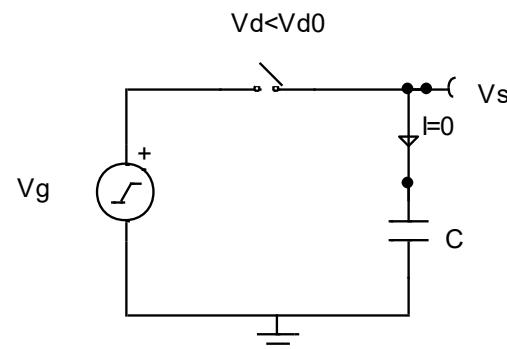
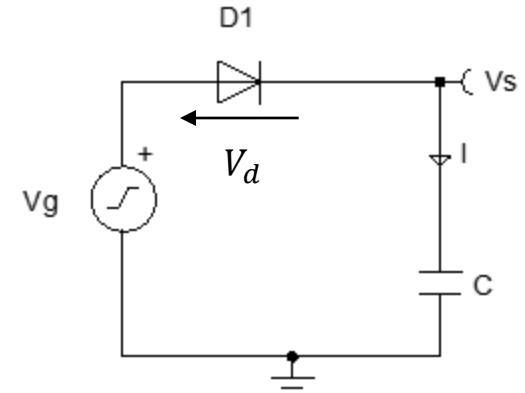
# 3. Circuits élémentaires

## ► 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

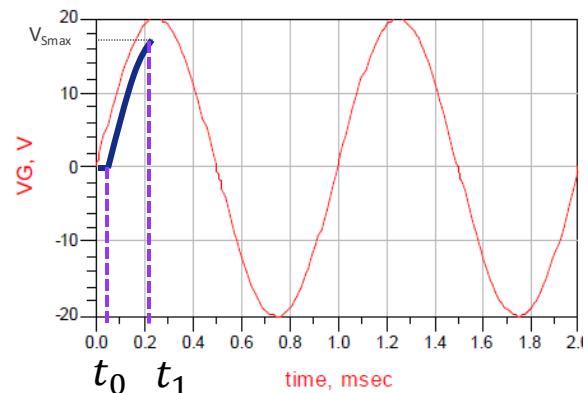
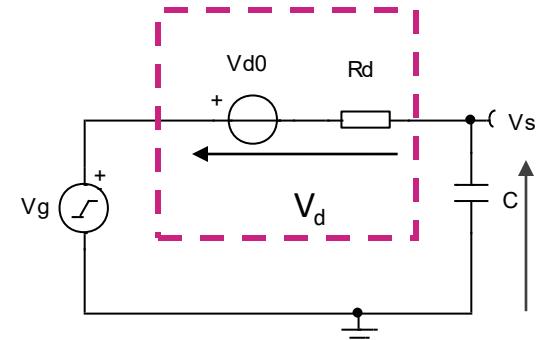
- Quant  $t$  augmente,  $V_g$  augmente

- ✓ 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

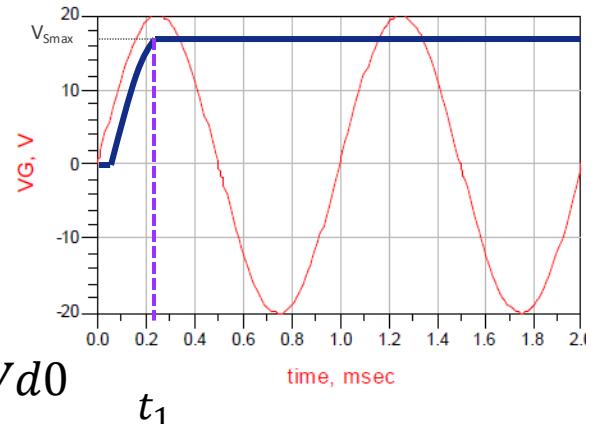
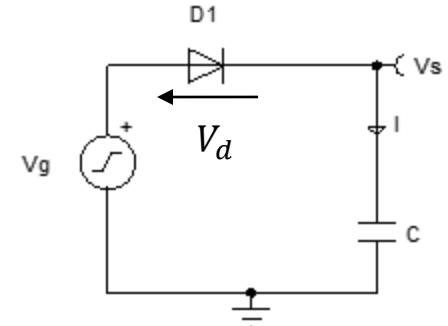
## ► Le redressement avec un filtre capacitif

- ✓ 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 à 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 :

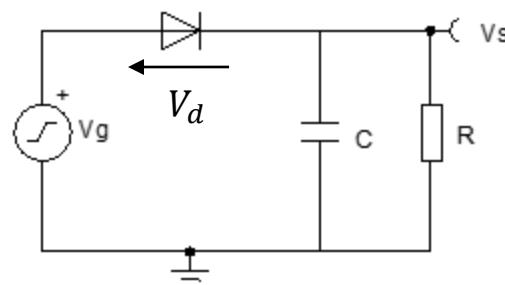
- ❖  $V_d(t) = V_g(t) - (V_{g_{max}} - V_{d0}) = V_{d0} - (V_{g_{max}} - V_g(t)) < V_{d0}$
- ❖ La tension aux bornes de la diode devient inférieure à la tension  $V_{d0}$ 
  - La diode se bloque
  - Le condensateur ne se décharge plus théoriquement



# 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)

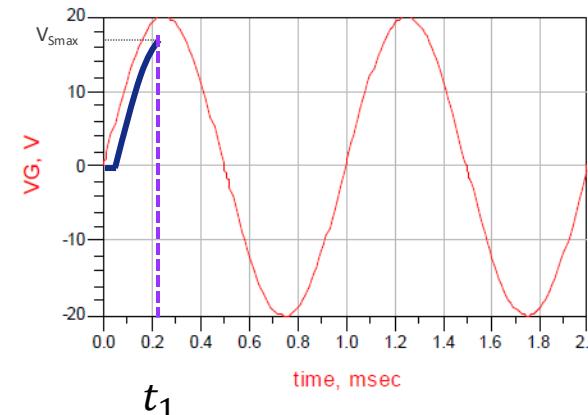
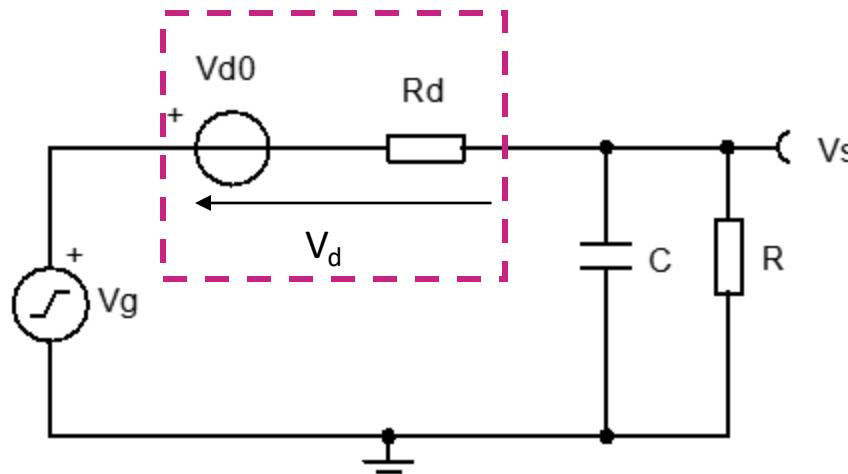


- Comme pour le montage le condensateur va se charger sur l'alternance positive de  $V_g(t)$ 
  - ✓ Jusqu'à l'instant  $t_1$  tel que :  $V_g(t_1) = V_{g_{max}}$
  - ✓ Avec une constante de temps :  $\tau = R_d \cdot C$ 
    - ❖ Le signal de sortie suit le signal d'entrée la charge est suffisamment rapide
- 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

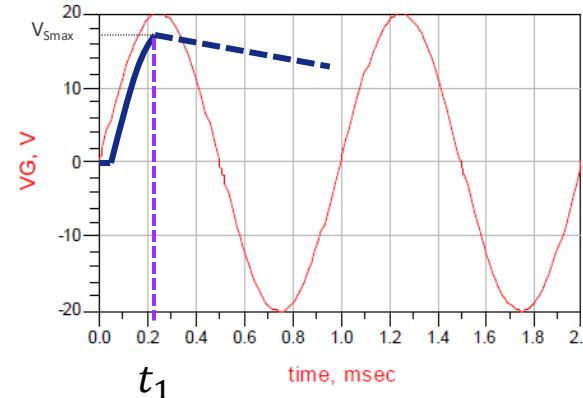
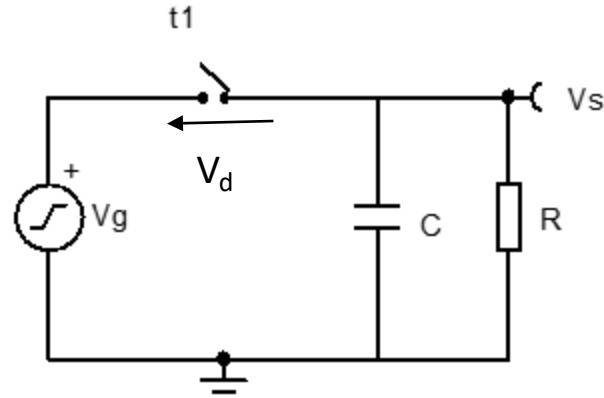
- ✓ La charge s'effectue pour  $V_g(t) \geq V_{d0}$ 
  - ❖ La diode est passante et est remplacée par son schéma équivalent
  - ❖ La tension de sortie est maximum à l'instant  $t_1$  tel que  $V_g(t_1) = V_{gmax}$ 
    - La tension de sortie à alors pour valeur :  $V_s(t_1) = V_{Smax} = \frac{R}{R+R_d}(V_{gmax}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



# 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  $V_{Smax} = \frac{R}{R+R_d} (V_{gmax} - V_{d0})$ 
  - Le condensateur se décharge dans la résistance R :  $\tau_d = R \cdot C$



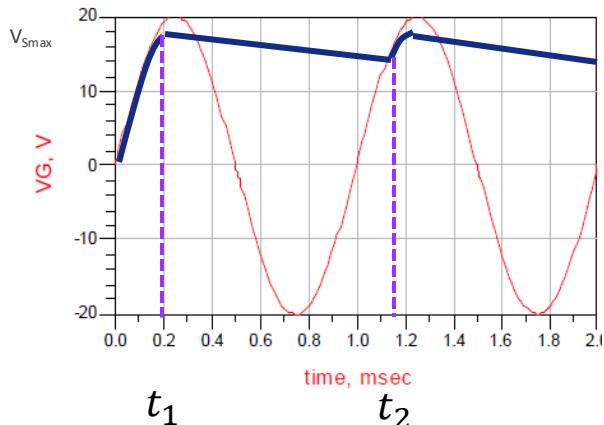
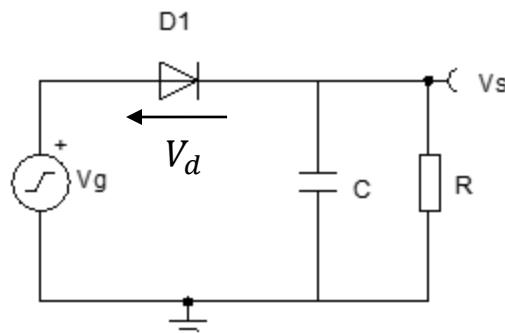
# 3. Circuits élémentaires

## ► 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

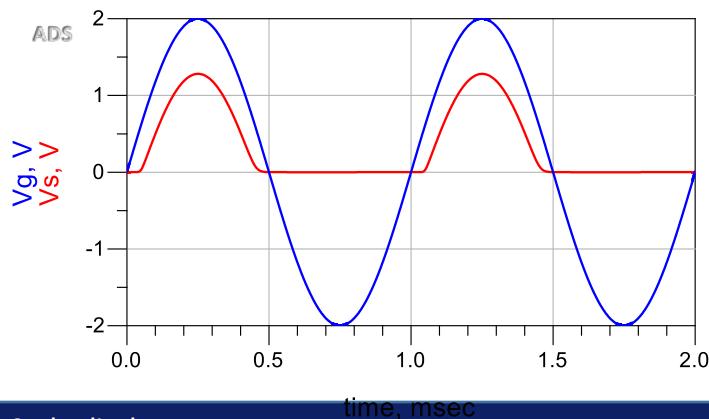
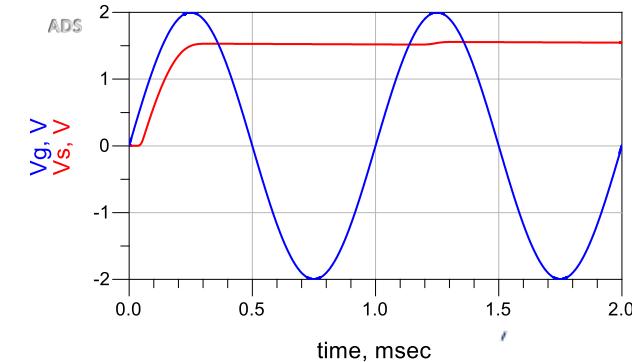
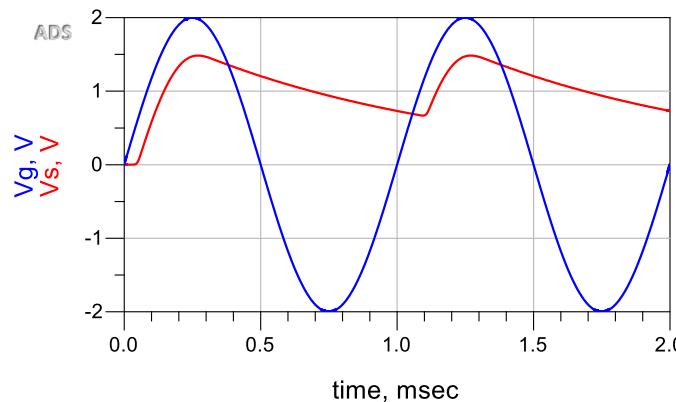
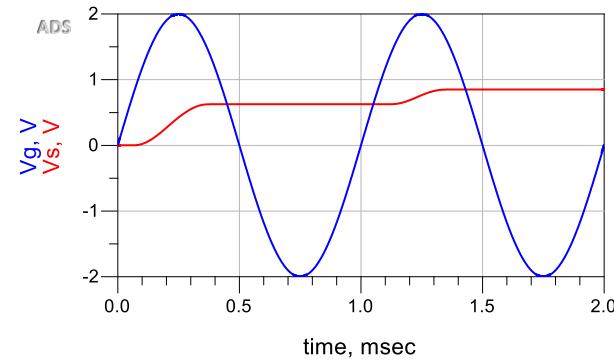
$$V_d(t_2) = V_{d0} = V_g(t_2) - V_s(t_2)$$

- ❖ 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 :

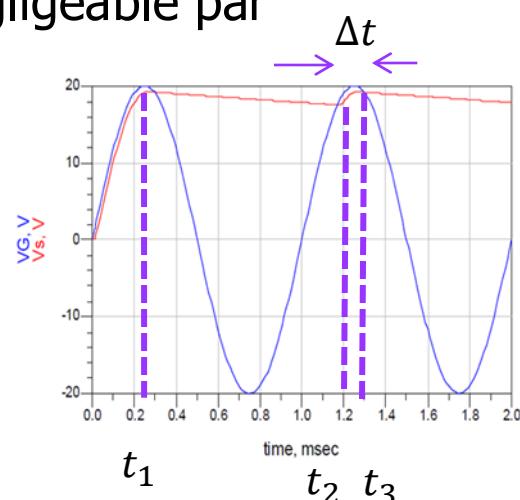
$$\diamond V_s(t') = V_{smax} e^{-\frac{t'}{RC}} \text{ avec } V_{smax} = \frac{R}{R+R_d} (V_{gmax} - V_{d0})$$

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

$$\diamond V_{smin} = V_{smax} e^{-\frac{T}{RC}} \approx V_{smax} \left(1 - \frac{T}{RC}\right)$$

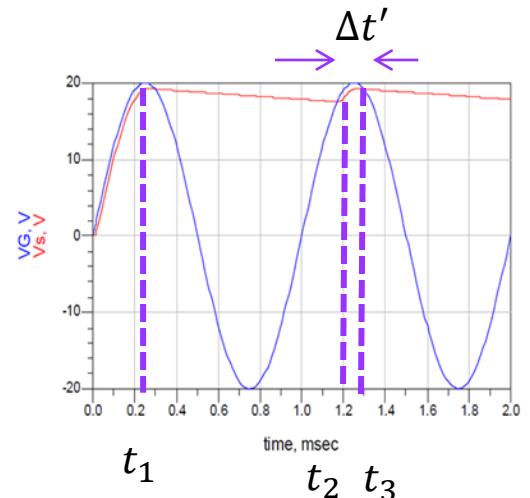
- Il faut que la décharge soit bien plus lent que la période du signal :  $RC \gg T$

✓ L'ondulation vaut donc :  $\Delta V_s = V_{smax} - V_{smin} = V_{smax} \cdot \frac{T}{RC}$



# 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 :
$$\Delta V_s = V_{smax} - V_{smax} \sin(\omega t_2) = V_{smax} - V_{smax} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega \Delta t'\right)$$
      - ❖ On peut réécrire cette équation sous la forme
$$\Delta V_s = V_{smax} - V_{smax} \cos(\omega \Delta t') = V_{smax}(1 - \cos(\omega \Delta t'))$$
    - ✓ En supposant  $\Delta t'$  petit, on peut donc écrire :  $\cos(\omega \Delta t') \approx 1 - \frac{(\omega \Delta t')^2}{2}$ 
      - ❖ Donc :  $\Delta V_s \approx V_{smax} \frac{(\omega \Delta t')^2}{2} \Rightarrow \Delta t' = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2 \Delta V_s}{V_{smax}}}$

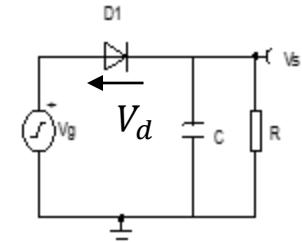


# 3. Circuits élémentaires

## ► 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 :

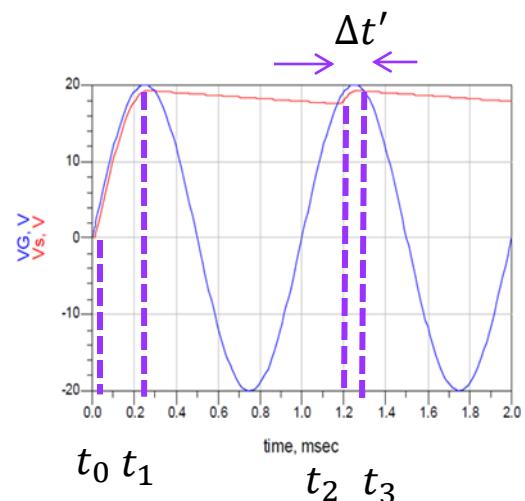
$$I_d(t) = C \frac{d(V_c(t))}{dt} + \frac{V_s(t)}{R} = C \frac{d(V_{S_{max}} \sin(\omega t))}{dt} + \frac{V_{S_{max}} \sin(\omega t)}{R}$$

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

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

❖ Quand  $V_g(t_0) = V_{g_{max}}(\omega t_0) = V_{d_0} \Rightarrow t_0 = \frac{1}{\omega} \cdot \cos^{-1} \left( \frac{V_{d_0}}{V_{g_{max}}} \right)$

❖ 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  $\Delta t'$  :

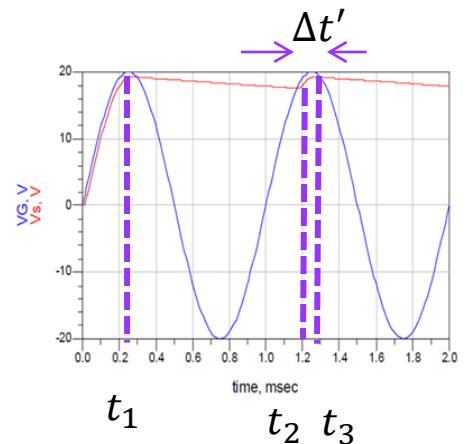
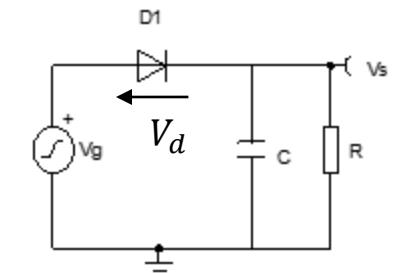
$$I_d(t_2) = C\omega V_{S_{max}} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega\Delta t'\right) + \frac{V_{S_{max}}}{R} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega\Delta t'\right) = C\omega V_{S_{max}} \sin(\omega\Delta t') + \frac{V_{S_{max}}}{R} \cos(\omega\Delta t')$$

- ✓ 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

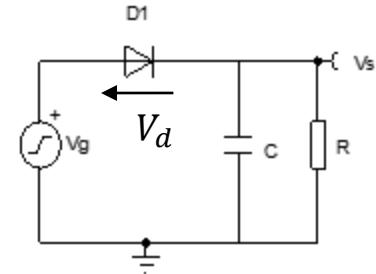
$$I_{dmoy} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\frac{\pi}{2}-\omega\Delta t'}^{\frac{\pi}{2}} \left( C \frac{dV_s(t)}{dt} + \frac{V_s(t)}{R} \right)$$

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

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

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

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



# 3. Circuits élémentaires

## ► Le redressement avec filtre capacitif et résistance de charge

- Calcul et dimensionnement du montage : 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 :

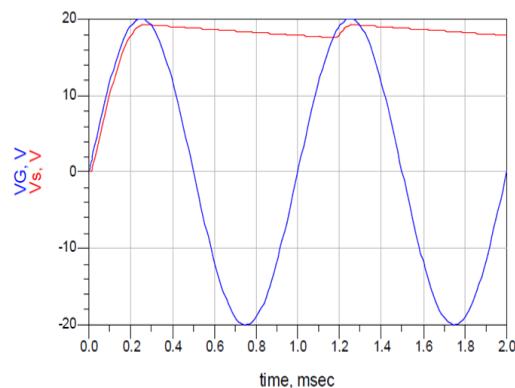
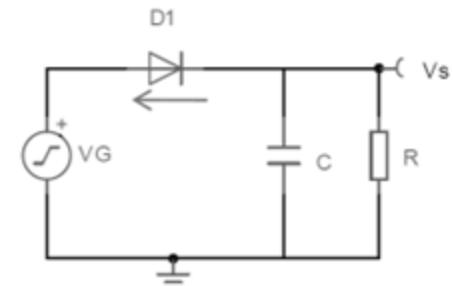
$$C = \frac{T \cdot I_{max}}{\Delta V_S}$$

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

- Pour un montage en double alternance

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

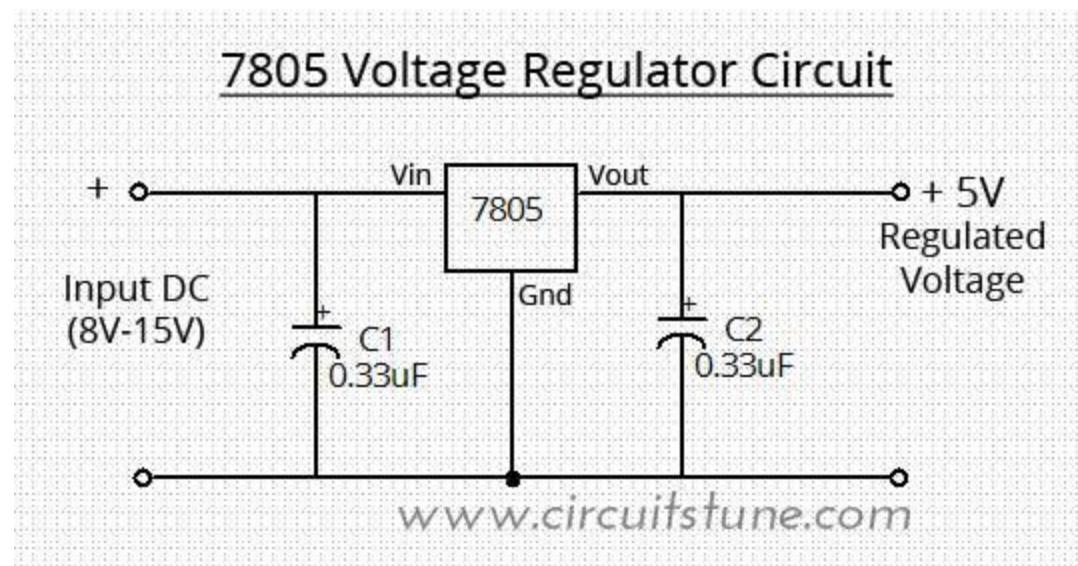
❖ La diode est passante pour deux alternances par période au lieu de une



# 3. Circuits élémentaires

## ► Le régulateur de tension à diode Zener

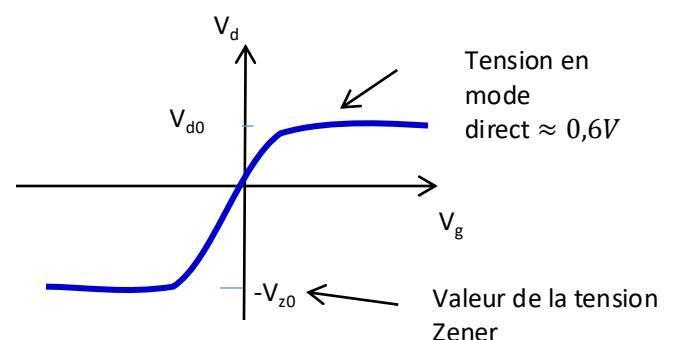
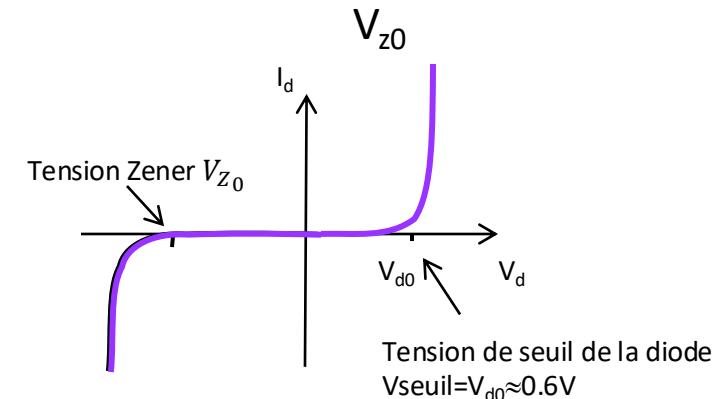
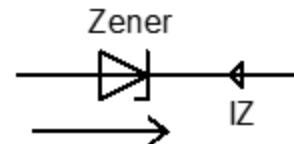
- ✓ Pour faire une alimentation, en sortie d'un redresseur de tension, on place un régulateur de tension qui va amortir les ondulations
  - ❖ On peut faire des régulateurs avec des diodes Zener
  - ❖ Il existe des composants (plus performants)



# 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,  $V_{Z_0}$ , 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

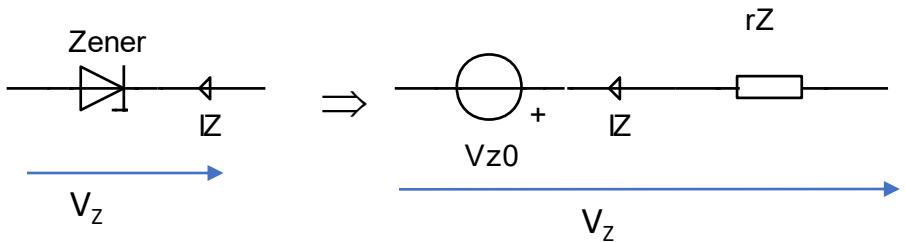
## ► Le régulateur de tension : la diode Zener

- La diode fonctionne en régulation à condition qu'un courant minimum puisse la traverser :  $I_{Z_{min}}$
- 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 :  $P_{max} = V_{Z_0} \cdot I_{Z_{max}}$
  - ✓ On peut donc définir une zone de fonctionnement en courant de la diode tel que :

$$I_{Z_{min}} \leq I_Z \leq I_{Z_{max}}$$

- 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 :  $V_Z = r_Z \cdot I_Z + V_{Z_0}$
  - ✓ La puissance maximum qu'elle peut admettre s'écrit alors :

$$P_{max} = (V_{Z_0} + r_Z \cdot I_{Z_{max}}) \cdot I_{Z_{max}}$$



# 3. Circuits élémentaires

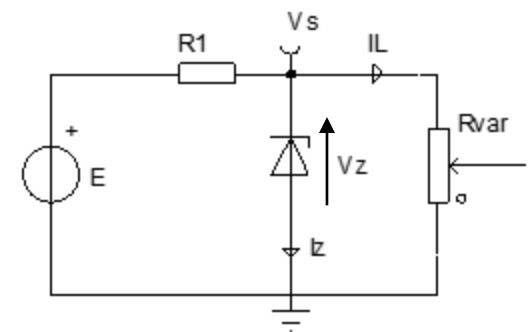
## ► Le régulateur de tension avec une diode Zener

- 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 :

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

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

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



# 3. Circuits élémentaires

## ► Le régulateur de tension avec une diode Zener

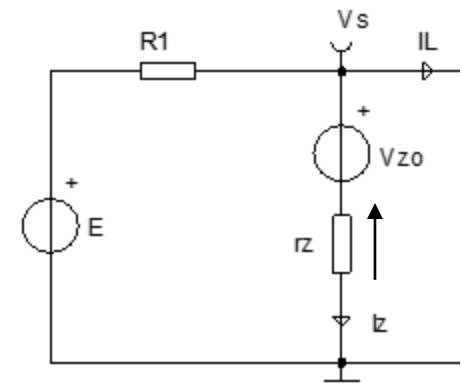
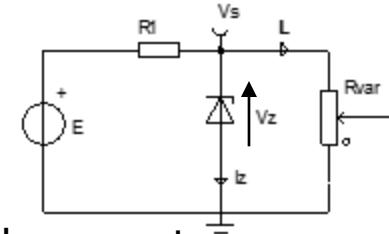
- Calcul de la résistance  $R_1$

- ✓ La résistance  $R_1$  est là pour « protéger » la diode Zener et éviter que le courant  $I_Z$  dépasse le courant maximum admissible  $I_{Z_{max}}$
- ✓ 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 :  $E = R_1 \cdot I_Z + V_{Z_0} + r_Z \cdot I_Z \Rightarrow I_Z = \frac{E_{max} - V_{Z_0}}{R_1 + r_Z}$
- ✓ On déduit de cette expression la valeur minimale de la résistance  $R_1$  telle que :

$$I_{Z_{max}} = \frac{E_{max} - V_{Z_0}}{R_{1min} + r_Z} \Rightarrow R_{1min} = \frac{E_{max} - V_{Z_0}}{I_{Z_{max}}} - r_Z$$



# 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  $I_{Z_{min}}$  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  $I_L = I_{L_{max}}$  puisque  $I_g = I_Z + I_L$
    - ❖ La loi des mailles montre qu'il est aussi minimum pour  $E_{min}$  et  $R_{1_{max}}$  puisque

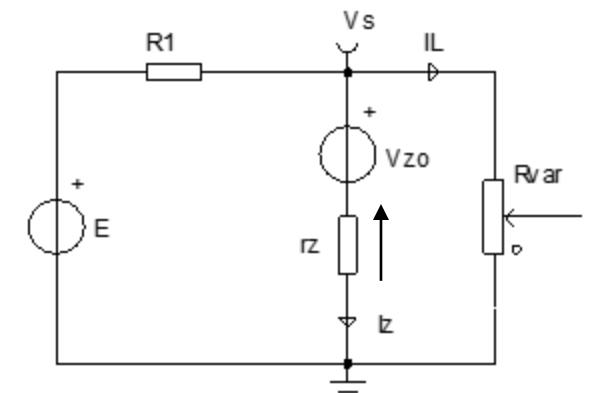
$$E = R_1 \cdot I_g + V_{Z_0} + r_Z \cdot I_Z$$

- ✓ On peut écrire les équations suivantes pour le circuit

$$E = R_1 \cdot (I_L + I_Z) + V_{Z_0} + r_Z \cdot I_Z \Rightarrow I_Z = \frac{E - V_{Z_0} - R_1 \cdot I_L}{R_1 + r_Z}$$

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

$$R_{1_{max}} = \frac{E_{min} - V_{Z_0} - r_Z \cdot I_{z_{min}}}{I_{L_{max}} + I_{z_{min}}}$$



# 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.

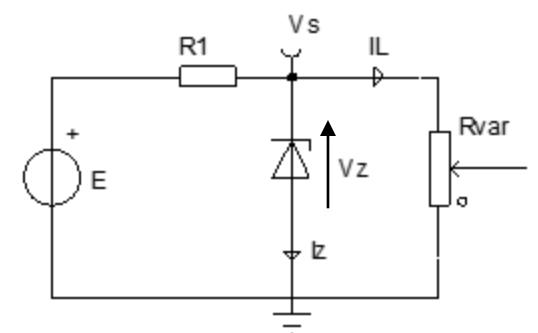
$$K = \left. \frac{dV_s}{dE} \right|_{I_L=cte}$$

- ✓ On souhaite que la tension de sortie de 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 :

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

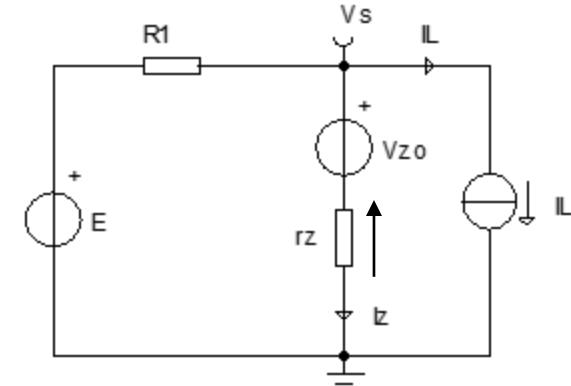


# 3. Circuits élémentaires

## ► 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

$$\diamond K = \left. \frac{dV_s}{dE} \right|_{I_L=cte} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_z}} = \frac{r_z}{R_1 + r_z}$$

$$\diamond r_i = - \left. \frac{dV_s}{dI_L} \right|_{E=cte} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{r_z}} = \frac{R_1 r_z}{R_1 + r_z}$$

- ✓ Le générateur de Thévenin équivalent du montage est alors :

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