

Séance 3 : Diodes et alimentations

Corrigé

1 Introduction

1.1 But de la manipulation

Cette manipulation a pour but d'illustrer :

- au niveau «application» : le fonctionnement d'une alimentation AC/DC linéaire
- au niveau «composant» : le fonctionnement des diodes les plus courantes : diode à jonction PN, diode Zener, LED.

1.2 Prérequis

- Circuit RC du premier ordre
- Chapitre n° 17 du livre de référence (ed 5).
En particulier :
 - rôle des diodes (redressement) dans les alimentations
 - redresseurs simple et double alternance
 - polarisation d'une diode
 - diode Zener
 - diode LED

1.3 Matériel

- Résistances : 100 Ω , 150 Ω , 330 Ω , 1 k Ω .
- Diodes : 1N5392 et LED TLHR5401.
- Condensateurs : 220 μ F
- Un transformateur 220 :9 V.
- Plaquettes de composants discrets : diode Zener, condensateur électrolytique, pont redresseur, résistance de 180 Ω et charges (quatre résistances).

1.4 Prédéterminations

Toutes les sections « prédétermination » ainsi que les questions 7 à 9 et 22 doivent être faites **avant** l'arrivée au laboratoire.

Le TP 4 portant sur les diodes fait également office de prédéterminations.

1.5 Objectifs

À la fin de ce laboratoire, vous devez être capable :

- de maîtriser le circuit d'une alimentation AC/DC classique,
- d'expliquer le fonctionnement du pont de diodes,
- de prévoir l'effet d'une charge sur l'alimentation,
- de dimensionner la capacité de sortie pour un *ripple* donné en faisant les hypothèses appropriées ;
- de calculer un régulateur de tension à diode Zener (courant, puissance, rendement, etc) ;
- d'expliquer le fonctionnement des circuits comprenant des diodes (à jonction, LED, Zener, etc) ;
- de lire la notice d'une diode et d'en extraire les informations utiles ;
- d'utiliser la caractéristique d'une diode ;
- de dimensionner une résistance de limitation de courant pour une LED.

2 Concepts

Les circuits électroniques ont besoin d'être alimentés par des sources de tension continue. Dans la plupart des cas, l'amplitude de ces tensions d'alimentation doit être de l'ordre de quelques volts ou quelques dizaines de volts (les plus courantes sont 2.5V, 3.3V, 5V, 12V et 15V). Malheureusement, le réseau électrique nous fournit une tension sinusoïdale de $220V_{\text{eff}}$. Il est donc nécessaire de transformer cette tension alternative en tension continue de plus faible amplitude ; c'est le rôle des alimentations AC/DC. Toute alimentation de ce type doit entre autres réaliser un « redressement » des grandeurs électriques, ce qui se fait en pratique au moyen d'une ou plusieurs diodes.

Dans la suite, nous appellerons :

- source, le réseau 220V (tout ce qui se trouve derrière la prise) ;
- alimentation, le circuit que nous allons étudier ;
- charge, le montage électronique qui doit être alimenté par notre alimentation. Durant la manipulation, nous simulerons la charge par une résistance consommant la puissance désirée, équivalent de Thévenin.

Commençons par comprendre le fonctionnement et l'utilisation d'une diode.

3 Polarisation d'une diode, exemple de la LED

Dans cette section, nous allons nous intéresser à la polarisation d'une diode afin de faire le lien entre les caractéristiques théoriques et l'utilisation pratique d'une diode.

3.1 Caractéristique I/V théorique

3.1.1 Conventions

Les conventions pour le tracé de caractéristique I/V pour les diodes sont « courant positif de l'anode vers la cathode, convention récepteur » :

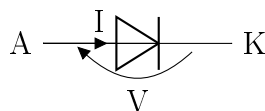


FIGURE 1 – Conventions électriques

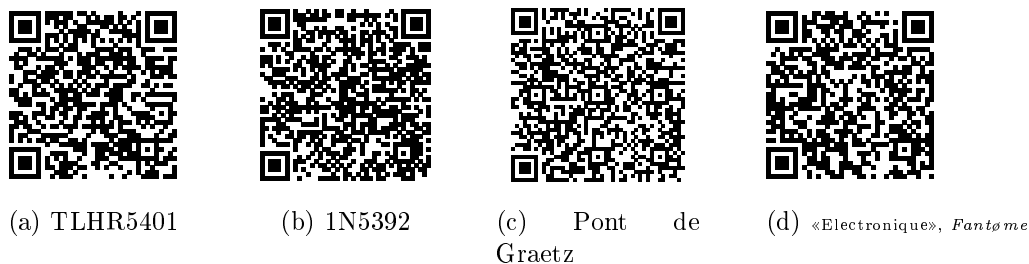


FIGURE 2 – QR codes cliquables vers la documentation des composants

3.1.2 Caractéristique I/V

La caractéristique courant–tension théorique de la LED ressemble à la Figure 3 :

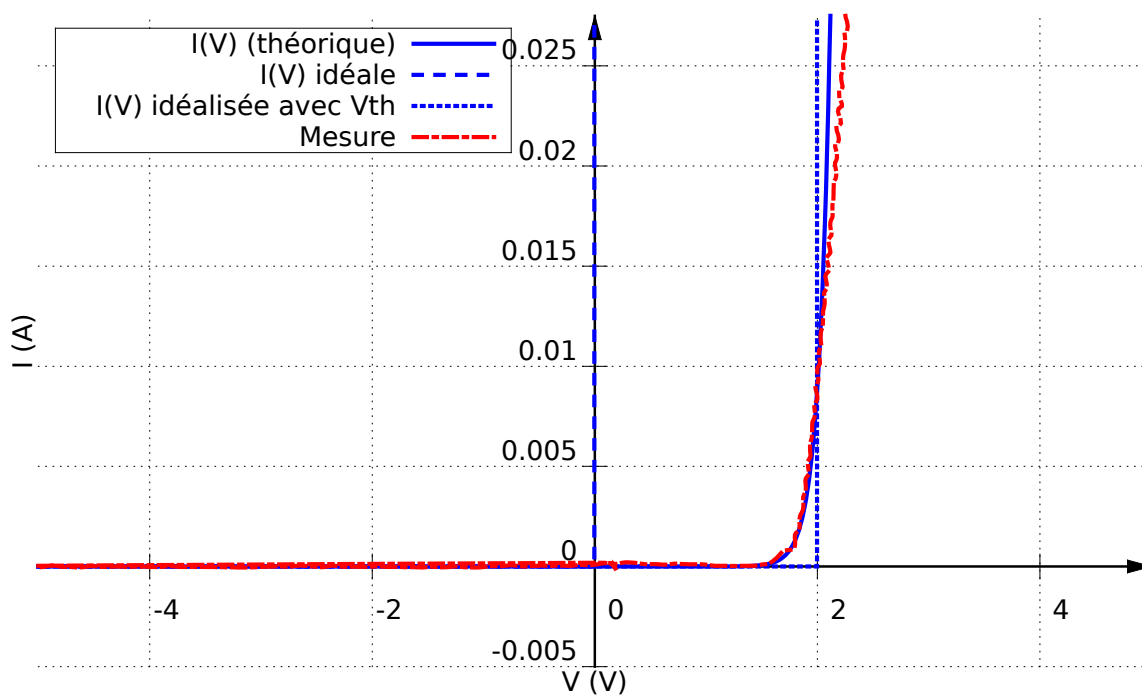


FIGURE 3 – Caractéristique I/V de la LED

3.2 Mesure de points de fonctionnement

Soit le montage de la Figure 4 page suivante.

Cette partie du laboratoire est à réaliser sur le protoboard en utilisant l'alimentation continue 5V.

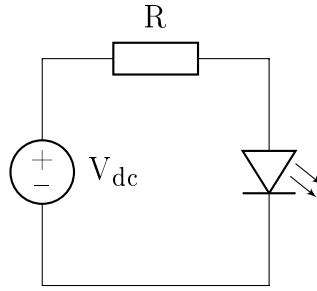


FIGURE 4 – Diode polarisée en direct si $V_{dc} > 0$

Question 1. En prenant $R = \{100, 150, 330, 1000, \infty\} \Omega$ et la tension de seuil indiquée dans la documentation de la LED TLHR5401 (V_F), mesurez et placez les 5 points correspondants sur le graphe de la Figure 3 page précédente. Utilisez le protoboard et $V_{dc} = 5V$.

Réponse :

[Voir graphe.](#)

Question 2. L'approximation $I(V)$ idéalisée avec seulement la tension de seuil est-elle une bonne approximation ?

Réponse :

On obtient quatre tensions différentes, donc l'approximation n'est pas parfaite. Elle est néanmoins suffisante pour la suite des exercices.

Question 3. Indiquez l'état de la diode sur le graphe de la page précédente en fonction de I .

Réponse :

Elle est bloquante pour une tension inférieure à $V_{th} = 2V$, passante sinon.

Question 4. En tenant compte de la réponse à la question 2, calculez la valeur de R pour obtenir un courant de 20mA dans la LED.

Réponse :

$$R = \frac{V_{dc} - V_{th}}{I_D} = 150\Omega$$

Question 5. Que se passe-t-il si la diode est mise en inverse ($V_{dc} < 0V$ ou diode inversée) ? Que peut on dire du courant la traversant (faire une mesure) ? Est-elle éclairée ?

Réponse :

La led est en inverse et est éteinte. Le courant la traversant est très faible : $\approx 50\mu A$

Question 6. Quelles précautions doivent être prises lors du fonctionnement en direct ? Même question pour un fonctionnement en inverse.

Réponse :

Le courant maximum ne doit pas être dépassé, il faut donc placer une résistance en série. En inverse, la tension d'avalanche ne doit pas être atteinte.

4 Structure d'une alimentation AC/DC

Il existe plusieurs types d'alimentations AC/DC. Le type le plus simple (l'alimentation linéaire) possède la structure suivante :

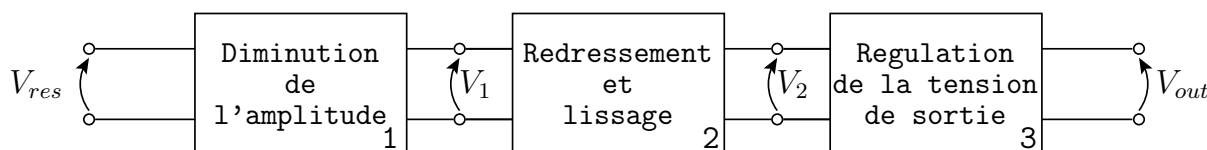


FIGURE 5 – Structure d'une alimentation linéaire

On peut diviser l'alimentation en trois étages, remplissant chacun une fonction :

- Le **1^{er} étage** a pour but de diminuer l'amplitude de la tension alternative, pour la rendre compatible avec les besoins de la charge. Pour cela, on utilise un transformateur abaisseur de tension. Dans ce labo, nous utiliserons un transformateur 220V/9V. Le transformateur a un avantage supplémentaire : il assure une isolation galvanique entre la charge et la source, ce qui garantit une certaine sécurité à l'utilisateur, même en cas de défaut de l'alimentation. À la sortie du 1^{er} étage, on a une tension (V_1) toujours sinusoïdale, mais d'amplitude plus faible, convenant mieux à notre application.
- Le **2^e étage** a pour but de transformer cette tension (V_1) alternative en une tension continue. Pour cela, il combine deux fonctions : le redressement et le lissage. Le redressement a pour but de transformer une tension purement alternative (sans composante continue) en une tension unipolaire (c'est à dire toujours positive). Il existe deux types de redressement : le simple redressement et le double redressement ; nous utiliserons le double redressement. Le lissage a pour but d'atténuer la partie alternative de la tension redressée, pour rendre celle-ci principalement continue. Dans la pratique, on aura une tension V_2 qui sera la somme d'une composante continue (qui est celle qui nous intéresse) et d'une composante alternative non sinusoïdale résiduelle, le « *ripple* », de faible amplitude.

- Le **3^e étage** a pour but de réguler l'amplitude de la tension de sortie. En effet, la tension V_2 n'est pas parfaitement continue, de plus, l'amplitude de sa composante continue dépend de celle de la source, qui peut fluctuer fortement ($\pm 10\%$ ¹). Il existe plusieurs façons de réaliser cet étage ; dans ce labo, nous étudierons le plus simple, basé sur une diode Zener.

5 Redressement simple alternance

Nous allons nous intéresser au deuxième étage de l'alimentation.

*Cette partie du laboratoire est à câbler sur le protoboard. Alimentez votre montage avec le transformateur **sans utiliser les bornes d'alimentation du protoboard**.*

Voici le schéma d'un redresseur simple alternance :

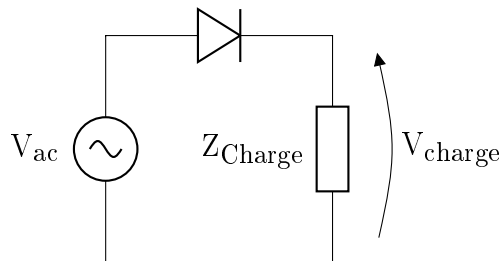


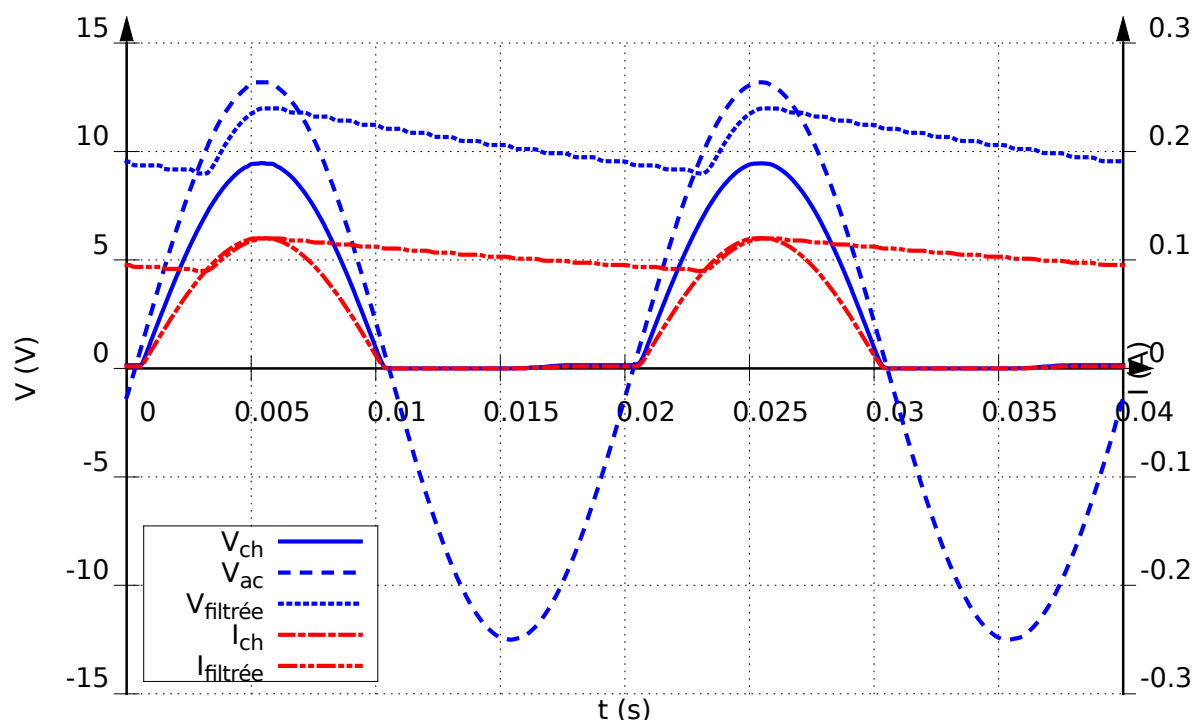
FIGURE 6 – redresseur simple alternance

Question 7. Tracez l'allure du courant circulant dans le circuit en fonction du temps.

Réponse :

Courbe rouge I_{ch}

1. La tension du réseau peut avoir une telle variation, demandez à M. Maun.



Question 8. Tracez sur un même graphe la tension aux deux bornes de la diode. Précisez l'état de la diode. Utiliser une tension de seuil de 1V pour simplifier (*cf* documentation 1N5392).

Réponse :

Courbes V_{ac} et V_{ch} du graphe précédent.

Question 9. La tension de sortie est-elle stable ? Que proposez-vous comme solution pour augmenter cette stabilité ?

Réponse :

Non, ajouter une capacité de filtrage.

6 Filtrage capacitif

Effectuons un filtrage capacitif² en ajoutant une capacité en parallèle avec la charge.

6.1 Prédéterminations

2. Il est également possible d'effectuer un filtrage inductif pour limiter l'amplitude des pics de courant sur la source alternative mais ces phénomènes dépassent les limites de ce cours.

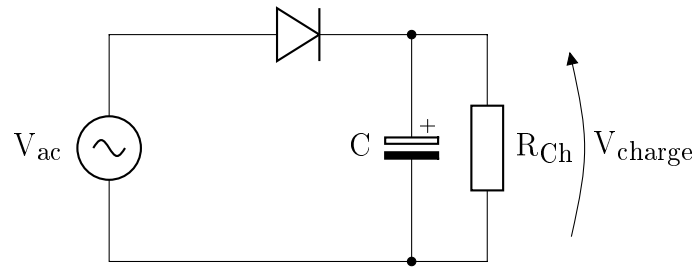


FIGURE 7 – redresseur simple alternance

Question 10. Justifiez la polarité utilisée pour la capacité.

Réponse :

Redresseur simple alternance, tension positive à la cathode par rapport à la charge.

Question 11. Tracez l'allure de V_{charge} en tenant compte de la capacité.

Réponse :

Voir graphe précédent, V_{filtre}

6.2 Manipulation

Question 12. Tracez l'allure du courant circulant dans la charge. Indiquez les intervalles de charge et de décharge.

Réponse :

Voir graphe précédent, courbe rouge I_{filtre}

Question 13.

- Vérifiez expérimentalement. (**ATTENTION** à la polarité de votre condensateur).
- Placez une résistance de charge en parallèle avec le condensateur ; observez son effet sur V_{charge} pour différentes valeurs.
- Expliquez qualitativement l'influence de cette résistance sur l'allure de V_{charge} .
- Remarquez que le signal comporte plusieurs « phases » successives.
- Quelle est la forme d'onde dans chacune de ces phases ?

Réponse :

On suit le sinus de la source durant la période de charge, tandis qu'on a une exponentielle décroissante durant celle de décharge.

6.3 Calcul de l'ondulation

On remarque que lorsque le circuit est chargé, la tension de sortie ondule. Quantifions cette ondulation en fonction des éléments du circuit.

La tension de sortie peut être décomposée en une composante continue et une composante alternative, d'où : $V = V_m + \Delta_V$

Question 14. Établissez une formule permettant d'estimer $\Delta_V = f(R, C, V_m, \dots)$.

Utilisez les approximations suivantes :

- $\Delta_V \ll V_m$
- le temps de charge du condensateur est négligeable devant son temps de décharge.
- la décharge de la capacité est linéaire

Réponse :

Loi de décharge d'un condensateur : $V_c(t) = V_m e^{-t/RC}$. On peut en déterminer son approximation au premier ordre avec un développement Taylor : $V_c(t) = V_m(1 - \frac{t}{RC})$. Ce qui nous intéresse, c'est uniquement « l'ondulation » Δ_V . Nous avons ainsi :

$$\begin{aligned}\Delta V &= V_f - V_i \\ &= V_c(t_f) - V_c(t_i) \\ &= V_m(1 - \frac{t_f}{RC}) - V_m(1 - \frac{t_i}{RC}) \\ &= V_m(\frac{t_i - t_f}{RC}) \\ &= -V_m(\frac{\Delta t}{RC})\end{aligned}$$

Cette formule permet de dimensionner la valeur de la capacité à utiliser pour lisser la tension de sortie pour limiter l'ondulation à une valeur donnée pour une charge donnée.

Question 15. Mesurez Δ_V et comparez à la valeur calculée pour les mêmes paramètres. L'approximation faite est-elle valable, optimiste ou pessimiste ?

Réponse :

Pour le redresseur simple alternance, la fréquence est de 50 Hz, ce qui correspond à une période T de 20 ms. En pratique, Δt sera légèrement plus faible que T , étant donné qu'il y a une courte période de charge à soustraire.

Avec une charge de 180Ω , un condensateur de $220\mu F$, une amplitude V_m de $9 \cdot \sqrt{2}$ et un Δt de 20 ms, on obtient un ΔV de 6.428V.

Avec une période réduite à 18 ms, on obtient des résultats plus proches de la réalité : 5.78V pour 180Ω , 3.15V pour 330Ω et 1.04V pour $1k\Omega$.

7 Redressement double alternance

Le redresseur simple alternance a le défaut majeur de ne redresser qu'une seule alternance (et également de consommer un courant continu sur le réseau alternatif³).

Ce défaut peut être corrigé et le courant fourni par le réseau peut être alternatif si la deuxième alternance du signal est mise à contribution. Un redresseur double alternance⁴ aura également moins d'ondulation.

Cette partie du laboratoire est à réaliser avec les composants sur support. Alimenter votre montage avec le transformateur.

Voici le schéma électrique d'un redresseur double alternance :

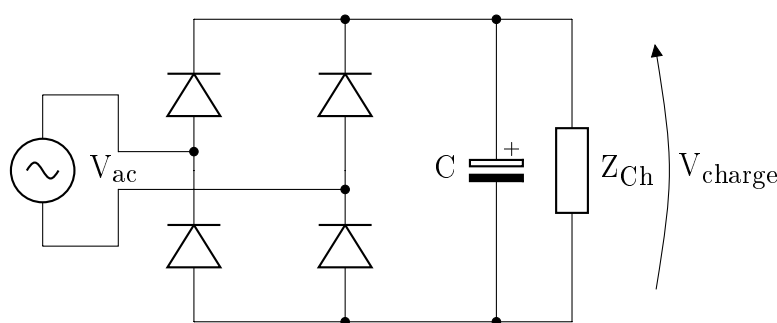


FIGURE 8 – redresseur double alternance

7.1 Prédéterminations

Question 16. Expliquez pourquoi il n'est **pas** possible de mesurer V_{ac} et V_{charge} en même temps avec un oscilloscope à deux canaux non isolés ? Justifier en quoi cela pourrait endommager le circuit ?

Réponse :

La diode en bas à droite serait court-circuitée, étant donné qu'elle aurait la masse à chacune de ses bornes. Ce serait alors la diode en bas à gauche qui serait dans le pétrin, se retrouvant seule dans une boucle avec V_{ac} , imposant une forte tension négative à ses bornes. La diode tomberait en avalanche sans aucun composant pour y limiter le courant, la faisant griller sur place.

3. Pour s'en rendre compte, effectuez une transformée de Fourier du courant délivré par la source ou calculez sa valeur moyenne. La circulation de courant continu sur un réseau alternatif pose un certain nombre de problèmes détaillés dans les différents cours de M. Maun.

4. Le pont redresseur à 4 diodes est aussi appelé « Pont de Graetz »

Question 17. Expliquez les avantages de ce circuit par rapport au précédent.

Réponse :

La période de décharge est divisée par 2, on peut donc se contenter d'un condensateur ayant une capacité deux fois plus faible.

Question 18. Tracez l'allure de la tension de sortie avec et sans capacité de filtrage.

Réponse :

Question 19. Tracez l'allure de la tension aux deux bornes d'une diode et déduisez-en son état en fonction du temps.

Réponse :

Question 20. Que devient la formule d'approximation permettant de déterminer ΔV ?

Réponse :

$$\Delta V = -V_m \left(\frac{\Delta t}{2RC} \right)$$

7.2 Manipulation

Question 21. Vérifiez expérimentalement les trois résultats précédents.

Réponse :

8 Régulation à diode Zener

Le circuit précédent produit une tension quasiment continue mais dont l'amplitude n'est pas précisément connue et peut varier assez fortement ($\pm 10\%$). Nous devons maintenant la réguler afin d'obtenir une tension continue de valeur connue indépendante des variations du réseau. Nous allons utiliser une diode Zener. D'autres composants permettant d'effectuer des régulations plus précises existent.

8.1 La diode Zener

La diode Zener utilise le phénomène d'avalanche existant d'une diode⁵ dont le seuil a été fixé à la fabrication de la diode. Notez qu'une diode Zener se comporte comme une diode classique si elle est utilisée en direct. Au risque de répéter un point important, une diode Zener s'utilise en **inverse** car sa caractéristique intéressante est son phénomène d'avalanche (en inverse).

Les conventions électriques utilisées pour la diode Zener sont les mêmes que pour toute diode, pour rappel, sa caractéristique comporte un coude supplémentaire en inverse :

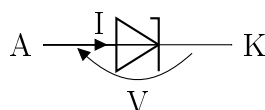


FIGURE 9 – Conventions électriques

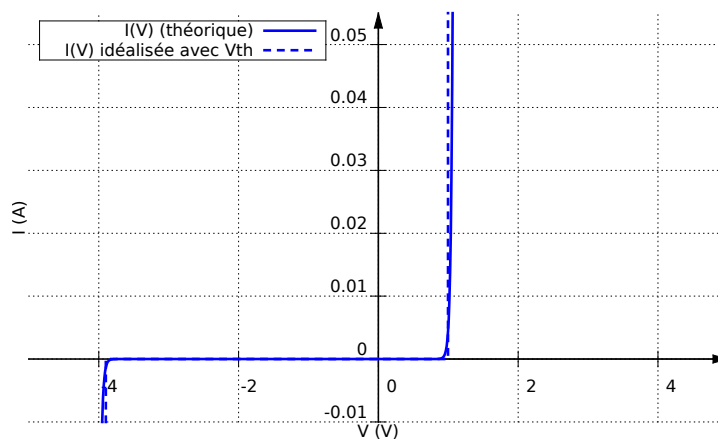


FIGURE 10 – Caractéristique I/V de la diode Zener

Notez que la tension de Zener est positive et que sur la caractéristique, le phénomène d'avalanche se produit pour $V = -V_Z$. Il faut donc utiliser la diode Zener en **inverse** pour pouvoir utiliser l'effet Zener. En direct, une diode Zener se comporte comme une diode commune ayant une tension de seuil de 0.7V généralement.

8.2 Utilisation en avalanche

Intéressons-nous uniquement à l'étage de régulation de l'alimentation présentée Figure 5 page 6 dans un premier temps.

Soit le circuit de la Figure 11 page suivante.

5. Le phénomène d'avalanche n'est destructeur que si la température limite de jonction de la diode est atteinte. Généralement, l'entrée en avalanche donne lieu à la circulation d'un courant qui va échauffer très rapidement la diode et la détruire lorsque la température limite de jonction aura été atteinte.

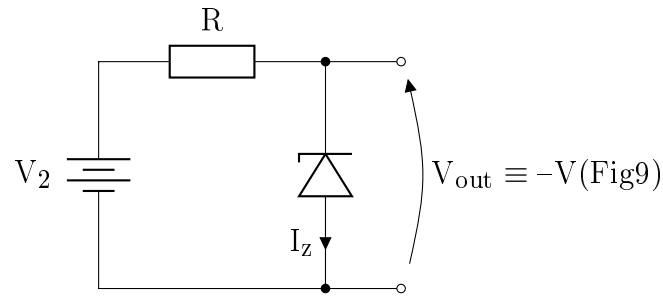


FIGURE 11 – Diode Zener utilisée en avalanche pour effectuer une régulation en tension

Question 22. En supposant $V_2 > V_{\text{out}}$, prédéterminez :

1. l'état de la diode Zener
2. la tension V_{out}
3. la valeur du courant traversant la diode I_z
4. les valeurs des puissances dissipées par les différents éléments du circuit

Réponse :

1. En avalanche.
2. $V_{\text{out}} = V_z$
3. $V_z = V_2 - V_R = V_2 - R \cdot I_z \Leftrightarrow I_z = \frac{V_2 - V_z}{R}$
4. $P_R = V_R \cdot I_z = R \cdot I_z^2 = (V_2 - V_z)^2$ et $P_D = V_z \cdot I_z = \frac{V_z \cdot (V_2 - V_z)}{R}$

8.3 Influence d'une charge

Ajoutons une charge à ce beau circuit, nous obtenons :

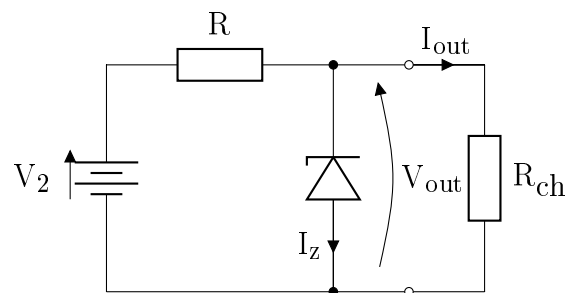


FIGURE 12 – Circuit de régulation de tension, chargé

8.4 Prédéterminations

- $V_2 = 13\text{V}$
- $V_z = 9.1\text{V}$
- la puissance maximale que peuvent dissiper R et la diode est 1W.

Question 23. Indiquez l'état de la diode, exprimez et calculez I_{out} et la puissance dissipée par les différents éléments (R, D, R_{ch}) dans les 3 cas suivants :

1. la charge est un court-circuit
2. la charge est un circuit ouvert
3. la charge est telle que le courant circulant dans la diode est négligeable devant les autres courants circulant dans le circuit.

Réponse :

1. CC : $I_{\text{out}} = \frac{V_2}{R}$, $P_{\text{charge}} = 0$, $P_R = V_2^2/R$, $P_D = 0$, la diode est bloquante.
2. CO : $I_{\text{out}} = 0$, $P_{\text{charge}} = 0$, $P_R = (V_2 - V_z)^2/R$, $P_D = V_z \cdot (V_2 - V_z)/R$, la diode en avalanche
3. $I_z \simeq 0$: $I_{\text{out}} = \frac{V_2 - V_z}{R} = \frac{V_z}{V_{\text{out}}}$ (on dimensionne la charge pour être dans ce cas limite),
 $P_{\text{charge}} = \frac{V_z \cdot (V_2 - V_z)}{R}$, $P_R = \frac{(V_2 - V_z)^2}{R}$, $P_D = V_z \cdot I_z \simeq 0$, la diode est tout juste en avalanche.

Question 24. R et D ne doivent pas dissiper plus que leur puissance maximale admissible quelle que soit la charge.

1. Pour quelle valeur de I_{out} la puissance dissipée par la diode est-elle maximale ?
2. Pour quelle valeur de I_{out} la puissance dissipée par la résistance R est-elle maximale ?
3. Dédurre la valeur minimale de R des 2 calculs précédents (tous les composants doivent survivre).
4. Quel est le courant maximum que ce circuit peut fournir à la charge (en méritant encore son nom, *i.e.* avec une tension de sortie régulée) ?
5. Quelle est la résistance de charge correspondante ?

Réponse :

1. $P_D = I_z \cdot V_z$, or $I = I_z + I_{\text{out}} = \frac{V_2 - V_z}{R} \Leftrightarrow I_z = I - I_{\text{out}} = \frac{V_2 - V_z}{R} - I_{\text{out}}$. Ainsi, $P_D = V_z \cdot (\frac{V_2 - V_z}{R} - I_{\text{out}})$ est maximum lorsque $I_{\text{out}} = 0$.
2. $P_R = V_R \cdot I = \frac{V_R^2}{R} = \frac{(V_2 - V_z)^2}{R}$, avec $V_z = V_{\text{out}} = R_{\text{ch}} \cdot I_{\text{out}}$, on obtient donc $P_R = \frac{(V_2 - R_{\text{ch}} \cdot I_{\text{out}})^2}{R}$. Quand cette valeur est-elle maximale ?
 - Lorsque $I_{\text{out}} = 0$, mais on se trouve alors dans le cas d'un circuit ouvert (sur la charge) et la diode sera forcément passante, consommant un certain courant I_z et dissipant une partie de la puissance de R (voir question 23).

- Lorsque $R_{ch} = 0$, c'est-à-dire lorsque la charge est remplacée par un court-circuit. La diode sera alors bloquante et la puissance dissipée dans la résistance sera de $\frac{V_2^2}{R}$, au lieu de $\frac{(V_2 - V_z)^2}{R}$ lorsque la diode est passante.
3. $P_{D,max} = V_z \cdot \frac{V_2 - V_z}{R} \leq 1W \Leftrightarrow R \geq V_z \cdot \frac{V_2 - V_z}{1W} = 35.49\Omega$.
 $P_{R,max} = \frac{V_z^2}{R} \leq 1W \Leftrightarrow R \geq \frac{V_z^2}{1W} = 169\Omega$.
4. $I_z \simeq 0$ et $V_{out} = V_z = 9.1V$.
Si $I_z \simeq 0 \Rightarrow I_{out} = I = \frac{V_2 - V_z}{R} \Leftrightarrow I_{out} = \frac{V_2 - V_z}{R} = 23mA$.
5. $V_{out} = V_z = I_{out} \cdot R_{ch} \Leftrightarrow R_{ch} = \frac{V_z}{I_{out}} = 394.33\Omega$.

Question 25. Déduisez-en la caractéristique $V_{out} = f(I_{out})$ du montage. Justifiez l'appellation « régulateur de tension » de ce circuit.

Réponse :

Partie plateau suivie par une droite décroissante.

La première partie correspond à une grosse charge, un faible courant I_{out} et une diode Zener en avalanche. La charge est donc régulée.

La partie décroissante correspond à un comportement en diviseur résistif lorsque la charge est trop importante et que la diode devient bloquante. Déterminons l'équation de cette droite : $V_{out} = V_2 \cdot \frac{R_{ch}}{R + R_{ch}}$ et $V_{out} = R_{ch} \cdot I_{out}$. Ainsi, $R_{ch} = \frac{V_{out}}{I_{out}}$, et donc $V_{out} = V_2 \cdot \frac{V_{out}/I_{out}}{R + V_{out}/I_{out}} = V_2 \cdot \frac{V_{out}}{R \cdot I_{out} + V_{out}} \Leftrightarrow V_2 = R \cdot I_{out} + V_{out} \Leftrightarrow V_{out} = V_2 - R \cdot I_{out}$.

Question 26. Établissez l'expression du rendement du montage en fonction de I_{out} . Discutez le résultat obtenu.

Réponse :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{ch}}{P_{V_2}} = \frac{R_{ch} \cdot I_{out}^2}{V_2 \cdot I} = \frac{R_{ch} \cdot I_{out}^2}{V_2 \cdot \frac{V_2 - V_z}{R}}$$

8.5 Manipulation

Question 27. Ajoutez le régulateur de tension à la sortie de votre montage.

Réponse :

Question 28. Tracez la caractéristique de sortie du circuit en relevant les points de fonctionnement pour différentes valeurs de résistance de charge. Comparez avec vos prédéterminations.

Réponse :