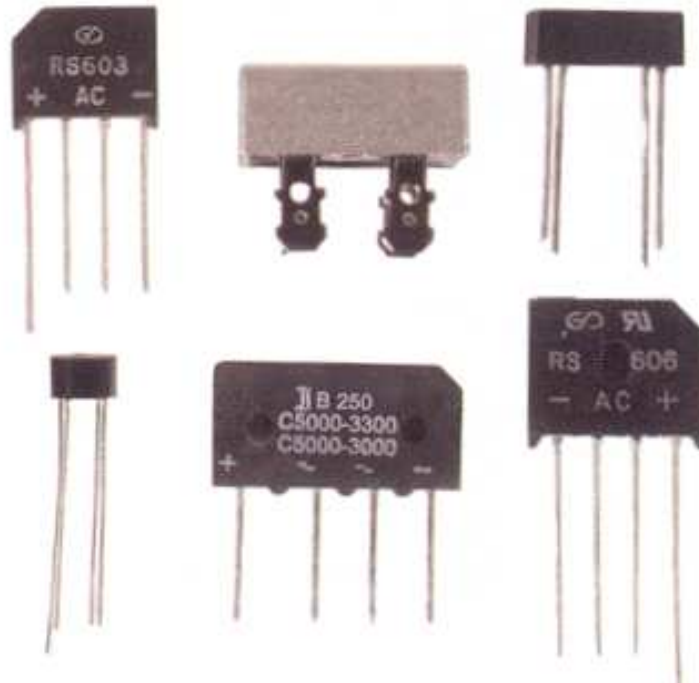


# Cours d'électronique

## LA THEORIE SUR L'ELECTRONIQUE

### LES COMPOSANTS DE BASE



### PARTIE N°3 :

### LE REDRESSEMENT

## **TABLE DES MATIERES**

1. Le redressement.....	2
1.1. Le redressement monophasé simple alternance .....	2
1.1.1. Définition de la valeur moyenne .....	4
1.1.2. Définition de la valeur efficace .....	4
1.1.3. Notion de dissipation thermique .....	5
1.2. Le redressement sur charge inductive .....	6
1.2.1. Cas sans diode de roue libre .....	6
1.2.1.1. Evolution de la tension .....	7
1.2.1.2. Evolution du courant .....	7
1.2.1.3. L'effet de self .....	7
1.2.2. Cas avec diode de roue libre .....	9
1.3. Le redressement double alternance par point milieu.....	11
1.4. Le redressement double alternance en pont de Graëtz .....	12
1.5. Notion d'ondulation .....	14
1.6. Le redressement triphasé simple alternance.....	16
1.7. Le redressement triphasé double alternance par pont de Graëtz .....	18

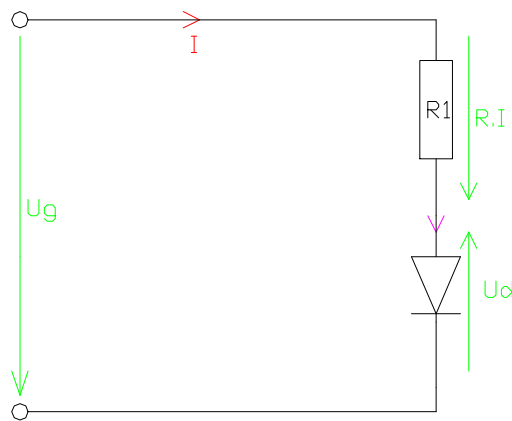
## 1. Le redressement

**Une des applications principales de la diode se retrouve dans le redressement. En fonction du nombre de diodes utilisées, nous retrouvons les différents type de redressement en monophasé comme en triphasé .**

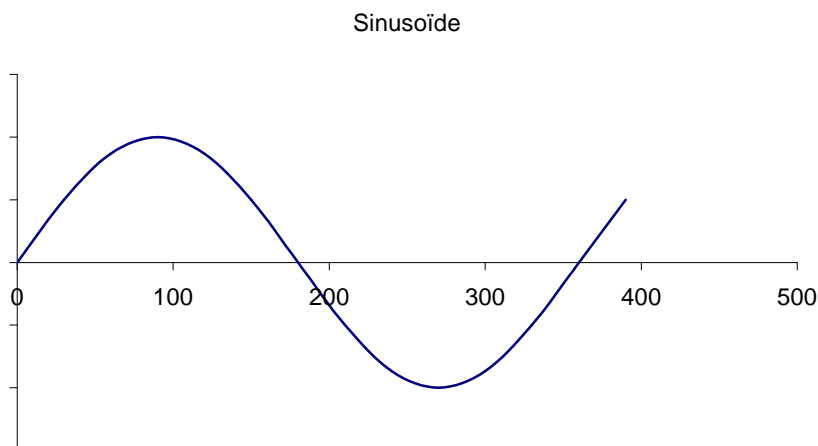
### 1.1. Le redressement monophasé simple alternance

Comme l'indique ce titre, il s'agit du redressement d'un signal de type sinusoïdale monophasé. Nous savons qu'un signal sinusoïdale est composé d'une alternance positive et d'une alternance négative. Dans ce type de redressement, nous utiliserons une seule diode ce qui sur base de la théorie vue précédemment signifie que notre diode sera en sens passant pour une des alternances et en sens bloquant pour la seconde alternance. Analysons concrètement comment cela va se vérifier.

Le schéma peut être le suivant :

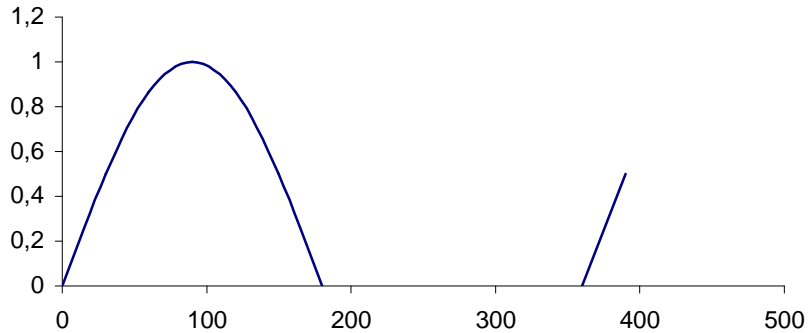


Analysons l'allure des tensions aux bornes de notre circuit :



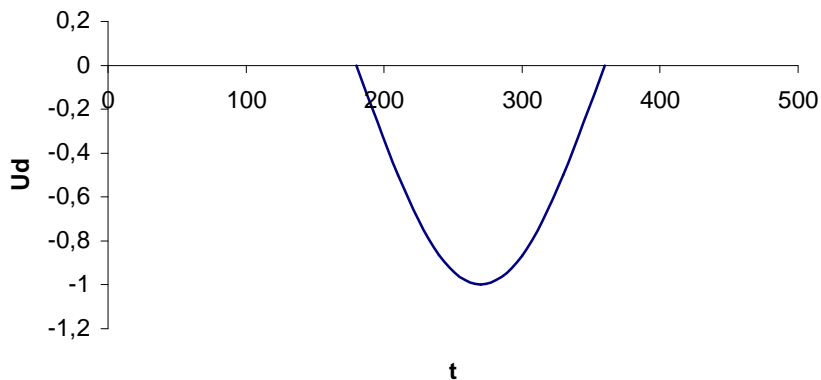
La tension aux bornes de la résistance va avoir l'allure suivante ce qui correspond à la conduction de notre diode, dans ce cas, la diode est polarisée en positif et elle conduit.

Redressement simple



La tension aux bornes de la diode va avoir l'allure suivante ce qui montre bien la conduction de la diode pour la première alternance et le blocage pour la seconde. Il ne pourrait en être autrement puisque dans ce cas la diode est polarisée en inverse.

Redressement simple



Etant donné qu'au niveau de la charge ce qui importe c'est la valeur moyenne de la tension et la valeur efficace de la tension pour l'énergie dissipée au niveau de cette charge, nous pouvons tenter de trouver ces dernières.

Le facteur d'ondulation pour ce type de tension redressée est de 1,21.

### 1.1.1. Définition de la valeur moyenne

La valeur moyenne de la tension aux bornes de notre charge dans le cas d'un

redressement simple alternance est :  $V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_M \sin(\omega.t).dt$

La valeur moyenne d'un courant, sur une période T, est égale à la valeur du courant continu qui, dans la même durée T, aurait transporté la même quantité d'électricité.

Rappelons au passage que la valeur moyenne d'un signal alternatif sinusoïdale est nulle.

Nous savons que lors d'un redressement simple alternance, seul une des alternances est appliquée aux bornes de la charge, je peux donc écrire :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_M \sin(\omega.t).dt$$

Le calcul de cette intégrale vous amènera au résultat suivant :

$$V_{moy} = \frac{V_M}{\pi} = 0,318.V_M$$

Par la même démarche mathématique, je peux déduire la valeur du courant moyen :  $I_{moy} = 0,318.I_M$

### 1.1.2. Définition de la valeur efficace

La valeur efficace d'un courant alternatif sinusoïdale est l'intensité du courant continu qui, passant dans une même résistance, pendant le même laps de temps, produirait le même dégagement de chaleur que le courant alternatif sinusoïdale.

Si pour un laps de temps élémentaire dt, l'énergie dissipée par le courant sinusoïdale vaut dw, nous pouvons écrire :  $dw = r.i^2.dt$ . Dès lors, pendant la période complète du courant alternatif sinusoïdal, cette énergie vaudra :

$$W = \int_0^T r.i^2.dt = r \int_0^T i^2.dt.$$

L'énergie dissipée par le courant efficace serait :  $W = r.P.T$

Comme les deux énergies sont identiques, je peux écrire et déduire que :

$r.P.T = r \int_0^T i^2.dt$  ce qui se ramène à :  $P = \frac{1}{T} \int_0^T i^2.dt$ . Nous savons que lors d'un

redressement simple alternance, seul une des alternances est appliquée aux

bornes de la charge, je peux donc écrire :  $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_M \sin(\omega.t).dt}$

Le calcul de cette intégrale vous amènera au résultat suivant :  $I_{eff} = \frac{I_M}{2}$

Par la même démarche mathématique, je peux déduire la valeur de la tension effective:  $V_{eff} = \frac{V_M}{2}$

### 1.1.3. Notion de dissipation thermique

Lorsqu'une diode est parcourue par un courant, elle est, comme tout élément dans le même cas, le siège d'une dissipation énergétique par effet joule. Cette dissipation thermique peut conduire, si elle est trop importante, à la destruction de la diode.

Afin de garantir un fonctionnement sans risque d'une diode, nous allons donc calculer la valeur de la puissance maximum que la diode peut dissiper. En fonction de cette valeur, il sera analysé la nécessité ou non de placer un radiateur.

Nous savons que la puissance dissipée sera égale à :  $P_d = V_d \cdot I_d$  .  
 $V_d$  représente la chute de tension aux bornes de la diode et vaut :  
 $V_d = E_o + R_d \cdot I_d$

AVEC :

- $V_d$  = chute de tension aux bornes de la diode pour une polarisation directe de cette dernière
- $E_o$  = seuil de conduction de la diode
- $R_d$  = résistance interne ou dynamique de la diode dans le sens direct
- $I_d$  = courant direct parcourant la diode

La puissance dissipée dans la diode a donc pour expression :  
 $P_d = V_d \cdot I_d = E_o \cdot I_d + R_d \cdot I_d^2$

Nous savons que l'énergie ainsi développée sous forme de chaleur devra être dissipée dans le milieu ambiant ce qui veut dire que la diode pourra fournir à l'ambiance une quantité de chaleur égale à la différence entre la température de la jonction ( $T_j$ ) et la température de l'air ambiant ( $T_a$ ). Nous devons encore tenir compte de la faculté d'échange thermique entre le boîtier de la diode et le milieu ambiant. Nous appellerons ce facteur la capacité thermique est sera noté  $C$  en  $J/^\circ K$ .

Le milieu ambiant sera donc capable d'absorbé la puissance  $P' = C \cdot (T_j - T_a)$

En notant que la puissance maximale que peut dissipée une diode ne pourra être supérieur à la puissance que le milieu ambiant pourra absorbé, je peux écrire que  $E_o \cdot I_d + R_d \cdot I_d^2 = C \cdot (T_j - T_a)$

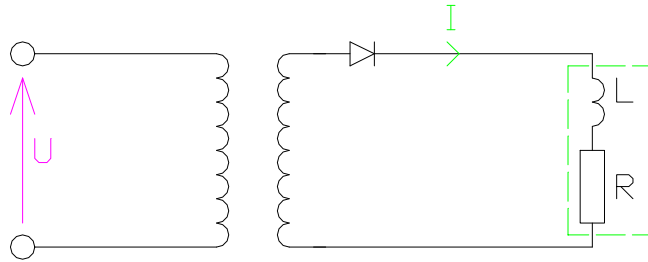
Les valeurs  $T_j$  et  $C$  sont donnée par le constructeur.

Je peux donc calculer pour une température ambiante donnée la puissance que peut dissiper une diode et en déduire ensuite la valeur un courant dans cette dernière.

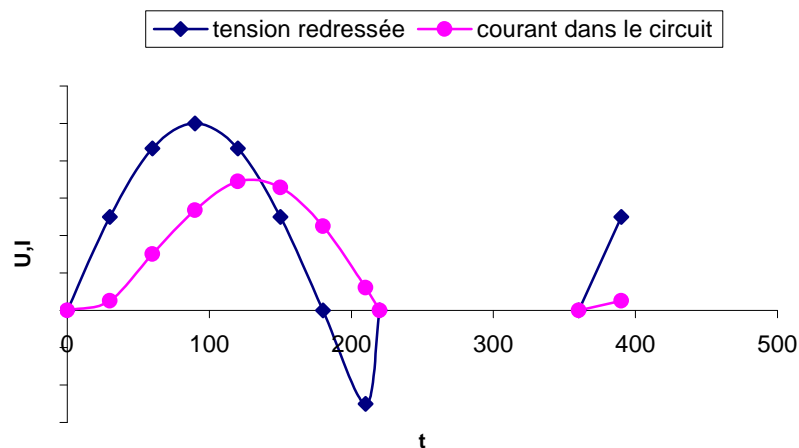
## 1.2. Le redressement sur charge inductive

Si jusqu'à présent nous avons travaillé sur des charges de type résistives, dans le quotidien, les charges sont le plus souvent mixte. Analysons le phénomène lorsque nous avons à faire à une charge dite inductive, un moteur par exemple dont le bobinage offre une prédominance inductive face au caractère résistif.

### 1.2.1. Cas sans diode de roue libre



Analysons sur un oscilloscope les allures de la tension et du courant que nous avons aux bornes de notre circuit.



Nous voyons nettement apparaître le déphasage entre courant et tension. Noter toutefois que le courant prend naissance dès l'apparition de la tension. Autrement dit, dès que la diode est polarisée en direct, et malgré le déphasage du à la charge, notre diode se met en conduction et nous avons circulation d'un courant dans celle-ci.

### 1.2.1.1. Evolution de la tension

Nous voyons que la tension redressée évolue selon l'allure de la tension sinusoïdale du secondaire du transformateur et qu'elle croît jusqu'à une valeur maximum égale à la tension maximum débitée. Que ce passe t'il ensuite, et bien la tension diminue toujours en suivant l'allure de la sinusoïde pour se retrouver à une valeur nulle. Ce point n'est cependant pas la fin de l'évolution de la tension aux bornes de la charge, en effet, nous remarquons que la tension passe en négatif durant un temps donné fixé par la présence d'un courant dans la charge. Une fois le courant nul, la diode se bloque et la tension devient nulle. Il va de soit que nous retrouvons cette évolution à chaque alternance de la tension redressée.

### 1.2.1.2. Evolution du courant

Nous savons que de part notre charge, nous avons un retard entre la tension et le courant ce qui voudrait dire que le courant devrait être représenté par une allure en décalage par rapport à la tension. En d'autre terme, les deux allures ne devraient pas avoir la même origine.

Dans notre situation, nous devons constater que l'origine est identique ce qui veut dire que malgré le déphasage entre la tension et le courant, nous avons dès apparition d'une tension aux bornes de la charges apparition d'un courant. Cela est du à l'effet de self induction, rappelez-vous que lorsqu'une bobine est soumise à une variation de flux, elle à tendance à s'opposer à ce qui lui à donné naissance. Dans notre cas, le self doit s'opposer à la tension redressée et pour y parvenir, la self va demander la circulation d'un courant afin de permettre la création de la force contre électro motrice qui devra s'opposer à la tension redressée. Nous avons donc une évolution exponentielle du courant pour retrouver l'allure de l'évolution sinusoïdale de notre courant. Lorsque la tension diminue, la self qui a emmagasiné de l'énergie magnétique va la restituer au circuit tout en tentant de maintenir la circulation du courant. Ainsi donc, la self parviendra à maintenir le sens de circulation du courant dans le circuit et la conduction de la diode et ce malgré le changement de polarité aux bornes du secondaire du transformateur. Nous avons un fonctionnement particulier ou la diode est polarisée en inverse mais ou elle continue à être passante.

### 1.2.1.3. L'effet de self

Nous venons de parler ci-dessus de l'effet de self induction, La bobine emmagasine de l'énergie et en même temps, la force électro motrice qui tente à s'opposer à ce qui lui à donné naissance retarde l'évolution du courant. Noter que ce qui génère se phénomène n'est pas tellement la tension mais l'évolution de cette dernière.

Nous savons que la force électro motrice induite peut être notée comme suit :

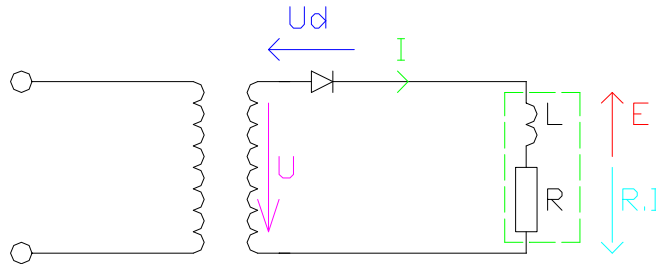
$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Nous savons encore que le flux est directement proportionnel au courant donc :

$$e = -\frac{di}{dt}$$



Lorsque notre tension diminue, elle finit par entraîner une diminution du courant ce qui signifie que  $\frac{di}{dt}$  sera négatif et que dès lors la FEM sera positive. Ce qui montre bien que la self va fournir un courant de même sens sous une différence de potentiel inverse puisque la self est passée d'un fonctionnement récepteur à un fonctionnement générateur.



Si nous appliquons la loi des mailles au circuit suivant, je peux tirer l'équation suivante :  $U - U_d + E - U_r = 0$

Avec  $U$  = tension délivrée par le secondaire du transformateur

$U_d$  = chute de tension aux bornes de la diode (seuil de conduction de la diode)

$E$  = FEM induite dans la bobine et due à la variation de courant

$U_r$  = chute de tension ohmique aux bornes de la bobine.

Je peux encore écrire que  $U + E - U_d = R.I$ .

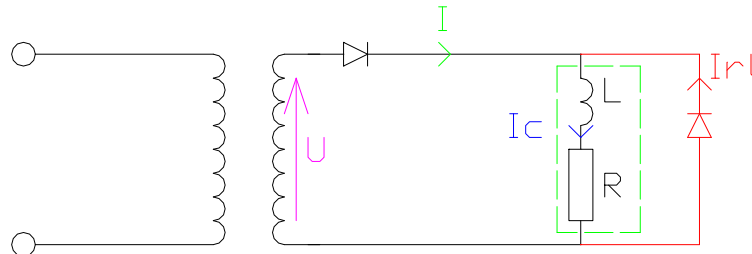
De cette équation, je peux tirer que tant que  $U + E$  est supérieur à  $U_d$ , le terme  $R.I$  sera positif et comme  $R$  est une constante, le courant sera positif. Cette démonstration confirme la possibilité de conduire un courant dans une diode et ce malgré une tension négative au secondaire du générateur.

On peut tirer comme conclusion que notre diode fonctionne pendant un certain temps avec une tension négative à ces bornes et en même temps traversée par un courant relativement important. Ce type de fonctionnement est à proscrire pour une diode.

Je peux encore tirer comme conclusion que la charge est soumise pendant un laps de temps à une tension négative ce qui pour certains types de récepteurs tel que moteur courant continu peut poser des problèmes évidents. (risque d'inversion du sens de rotation).

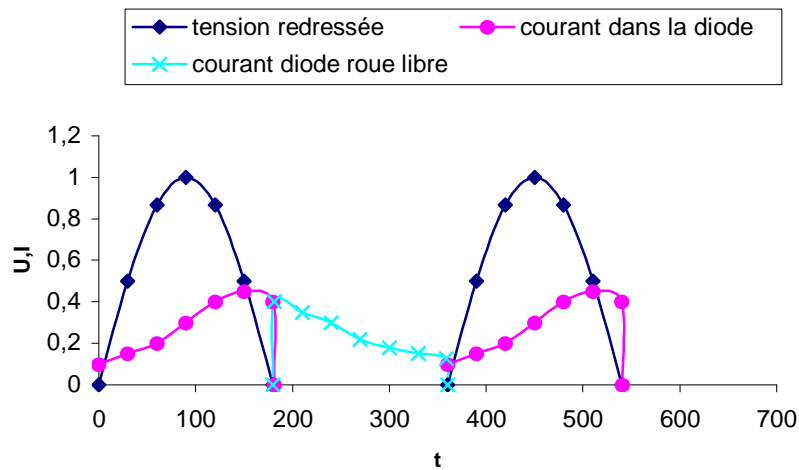
1.2.2. Cas avec diode de roue libre

Afin d'apporter une solution au problème relevé ci-dessus, nous allons placer une diode de roue libre qui va permettre de reprendre la circulation du courant et ce lorsque la tension redressée va devenir négative. Le schéma va devenir le suivant :

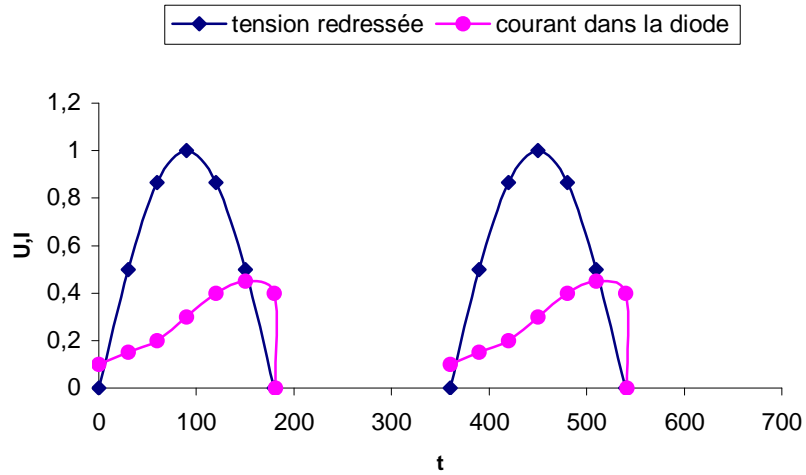


Que va t'il se passer exactement dans mon circuit ? Nous savons que la diode de roue libre se mettra en conduction lorsqu'elle sera polarisée en direct et que ce point sera atteint lorsque la tension redressée passera par une valeur nulle. La diode de roue libre va donc permettre au courant de la charge de continuer à circuler et ce pendant la décharge de la self ou plus précisément lorsque la self va restituer au circuit l'énergie emmagasinée. Le courant va ainsi pouvoir circuler en boucle fermée dans la self, la résistance et la diode de roue libre. La diode de redressement elle verra à ces bornes une tension négative et sera donc bloquée. Voyons graphiquement l'allure de la tension et du courant.

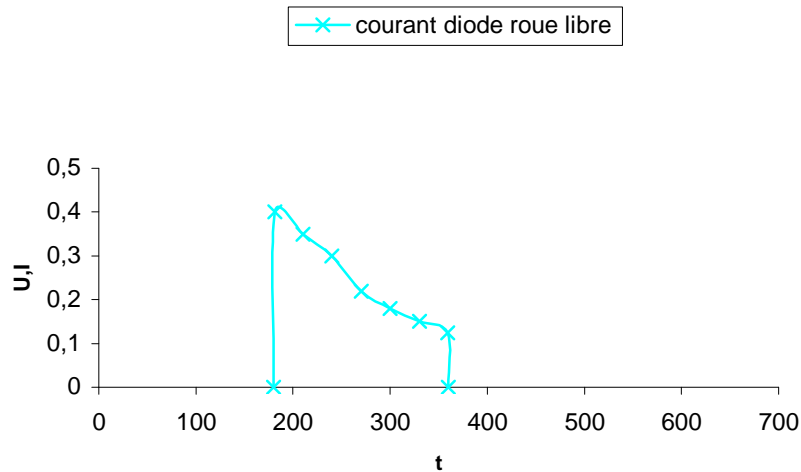
Ce premier graphe nous donne l'allure du courant dans la charge.



Celui-ci nous donne l'allure du courant dans la diode lorsque celle-ci conduit.



Celui-ci nous donne l'allure du courant dans la diode de roue libre.

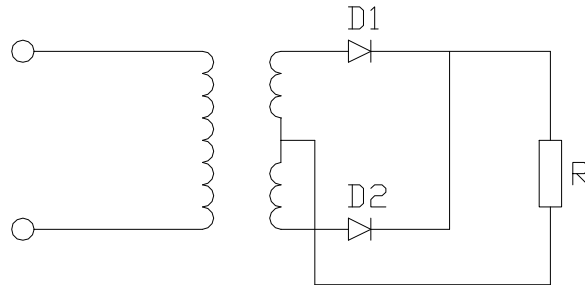


Nous voyons qu'avec cet artifice, nous n'avons plus de tension négative aux bornes de la charge.

Comme nous l'avons déjà vu lors de l'étude des circuits, l'évolution du courant sera fonction de la charge inductive, il est donc possible que le courant ne s'annule jamais dans la charge pour des valeurs inductance très grande. L'ensemble de ce qui vient d'être démontré s'applique à tous les systèmes de redressement, simple ou double alternance, monophasé au triphasé.

### 1.3. Le redressement double alternance par point milieu

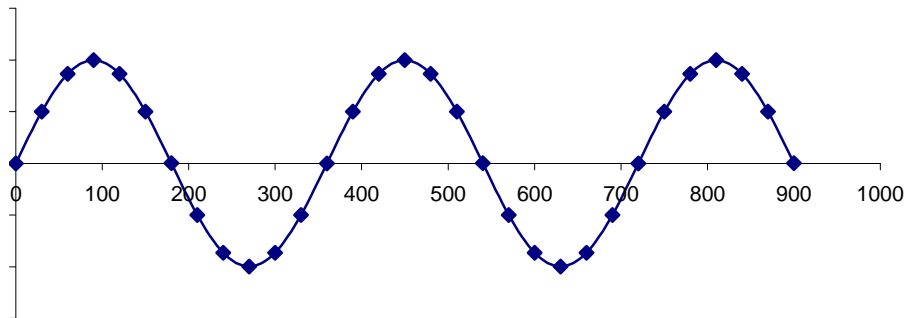
Dans ce mode de redressement double alternance, on fait appel à deux diodes et un transformateur ayant deux enroulements secondaires identiques.



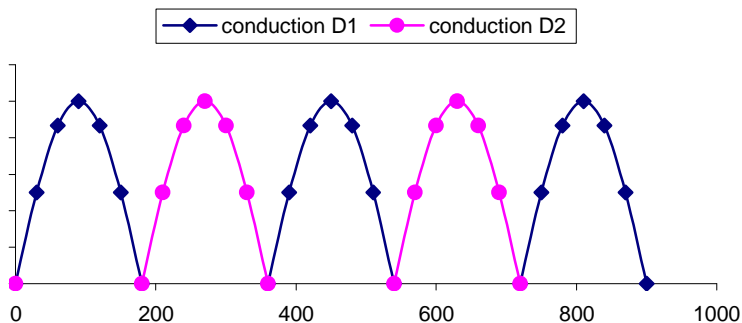
Il est bon de rappeler le fonctionnement d'un transformateur double enroulement. Lorsque le signal primaire est alimenté sous tension alternative sinusoïdale, nous retrouvons deux potentiels au secondaire, l'un sur l'enroulement du dessus et le second sur l'enroulement du dessous. Si nous disons encore que ces deux derniers enroulements sont bobinés dans le même sens, je peux conclure que lorsque nous sommes sur l'alternance positive de la tension primaire, nous avons sur l'un des enroulement une alternance positive également tandis que sur l'autre nous aurons une alternance négative et vis versa pour l'alternance négative de la tension primaire.

Je peux donc déduire les allures suivantes :

signal de départ (sinusoïde)



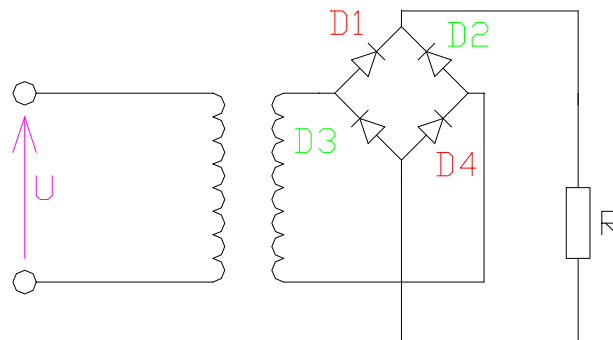
Signal aux bornes de la charge



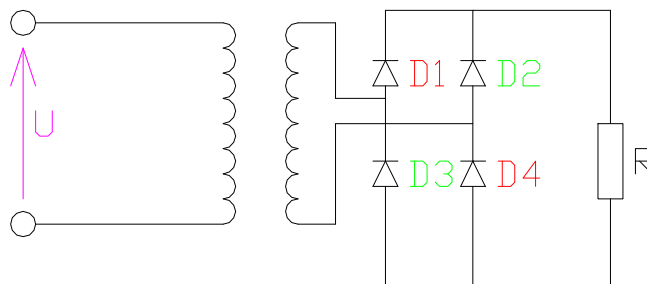
Je peux donc dire que lorsque mon premier enroulement secondaire est dans son alternance positive, la diode D1 est dans le sens passant et conduira. La diode D2 est elle à ce moment soumise à une tension inverse et est donc bloquée. Par contre lorsque la tension dans ce même enroulement sera dans son alternance négative, la diode D2 sera dans le sens passant et conduira. La diode D1 est elle à ce moment soumise à une tension inverse et est donc bloquée. La charge verra donc une tension du type double alternance. Moyennant un lissage, nous pourrions dire que notre charge voit une tension continue.

#### 1.4. Le redressement double alternance en pont de Graëtz

Dans ce type de redressement, on utilise quatre diodes au lieu de deux. Le schéma devient le suivant :

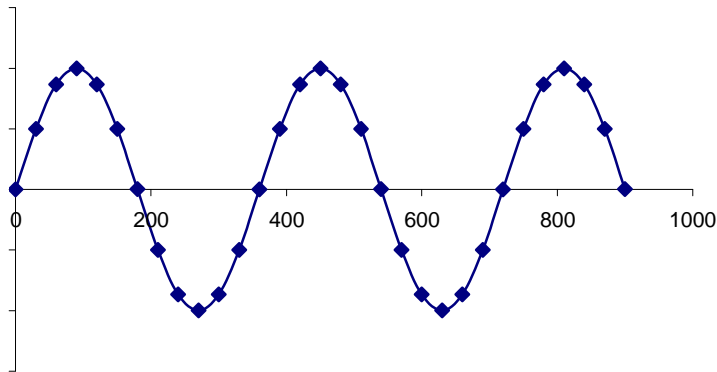


On peut représenter ce type de pont également comme ceci :

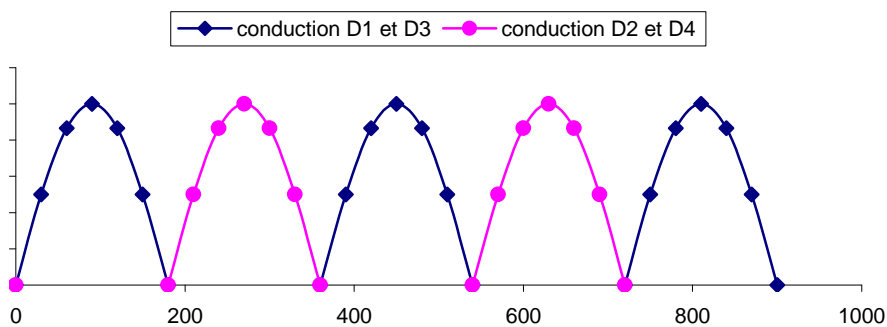


Les allures des tensions seront dans ce cas les suivantes :

signal de départ (sinusoïde)



Signal aux bornes de la charge



Comme le montre les courbes, nous retrouvons une tension redressée double alternance. Voyons comment cela est réalisé au départ de nos diodes. Lors de l'alternance positive de la tension secondaire, seuls les diodes D1 et D4 seront polarisés en direct, elles seront donc les seules à conduire. Les deux autres diodes seront bloquées car polarisées en inverse. Noter que les diodes devront reprendre en inverse la moitié de la tension débitée par le secondaire. Pour l'alternance négative, les diodes D1 et D4 seront bloquées (polarisation inverse) et les diodes D2 et D3 seront en sens passant. Je peux donc dire que la tension redressée est le résultat de la conduction simultanée de deux diodes.

La valeur moyenne de la tension pourra être calculée au départ de :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_M \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \text{ et le résultat nous donnera : } V_{moy} = 0,636 \cdot V_M .$$

La valeur efficace de la tension pourra être calculée au départ de :

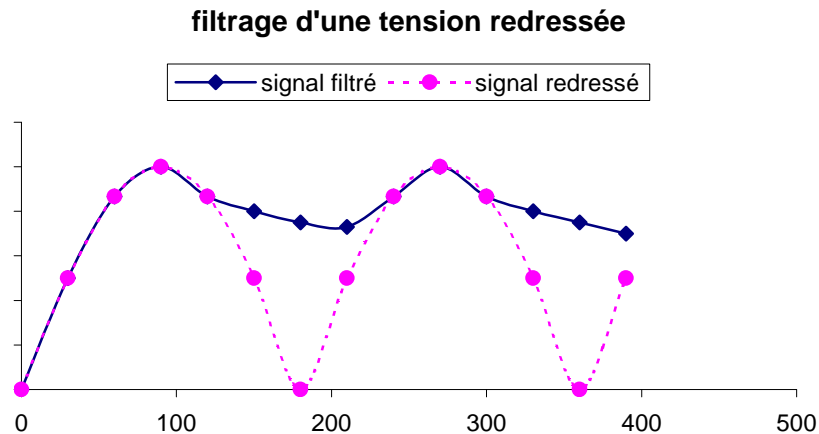
$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_M \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt} \text{ et le résultat nous donnera : } V_{eff} = \frac{V_M}{\sqrt{2}} .$$

Le facteur d'ondulation dans ce type de tension redressée est de 0,48.

### 1.5. Notion d'ondulation

Afin de réduire les variations de la tension redressée, on place souvent un condensateur de filtrage dont le rôle sera de rapprocher le signal final le plus possible de la tension continue.

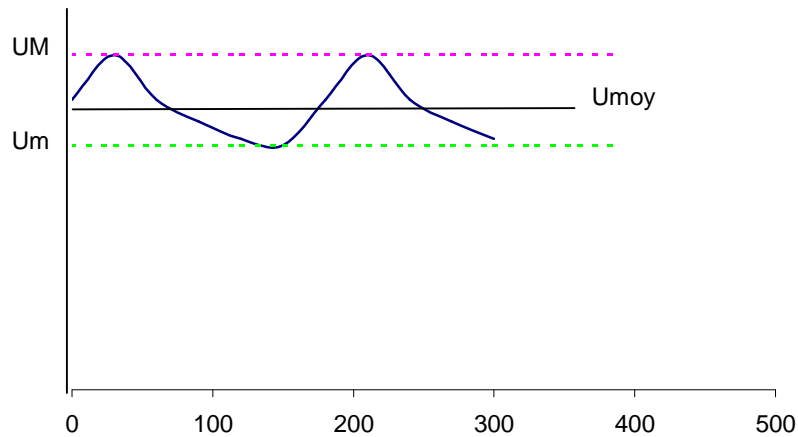
Dans le cas d'un redressement double alternance, le signal pourrait ressembler à celui-ci :



Analysons ce qui se passe au sein de chaque élément :

Prenons comme hypothèse que notre condensateur est déchargé en début de cycle.

Je peux dire que notre condensateur soumis à la tension redressée va se charger en suivant l'évolution de cette dernière. Lorsque notre tension sera maximum, la tension de charge de notre condensateur sera également maximum. Lorsque le potentiel de mon signal redressé va diminuer, je peux dire qu'à ce moment là, le condensateur va se décharger dans la charge. La vitesse de déchargement de ce dernier sera toutefois plus faible que l'évolution de la tension redressée et je peux ainsi dire que le condensateur va maintenir un potentiel aux bornes de la charge et que ce dernier évoluera en fonction d'une constante de temps bien précise fixée d'une part par la capacité et d'autre part par la charge. On peut voir sur le graphe ci-dessus que le condensateur n'aura pas l'occasion de se décharger complètement, en effet, lorsque la tension redressée va à nouveau augmenter, elle va lorsque le potentiel du condensateur et celle de la tension redressée seront identiques participer à la recharge du condensateur pour ramener ce dernier à la valeur maximum de la tension redressée pour à nouveau ensuite se décharger dans la charge tout en maintenant aux bornes de la charge un potentiel ayant une évolution plus lente que l'évolution de la tension redressée.



La tension ainsi obtenue peut être considérée comme étant la somme de deux tensions :

- Une composante continue égale à la valeur moyenne de la tension ondulée
- Une composante alternative correspondant à l'ondulation de la tension ondulée autour de cette valeur moyenne.

Le taux d'ondulation est défini comme étant le rapport de la valeur efficace de l'ondulation par la valeur moyenne de la tension ondulée.

En pratique, nous retiendrons cette équation :  $\tau = \sqrt{\left(\frac{V_{eff}}{V_{moy}}\right)^2 - 1}$ .

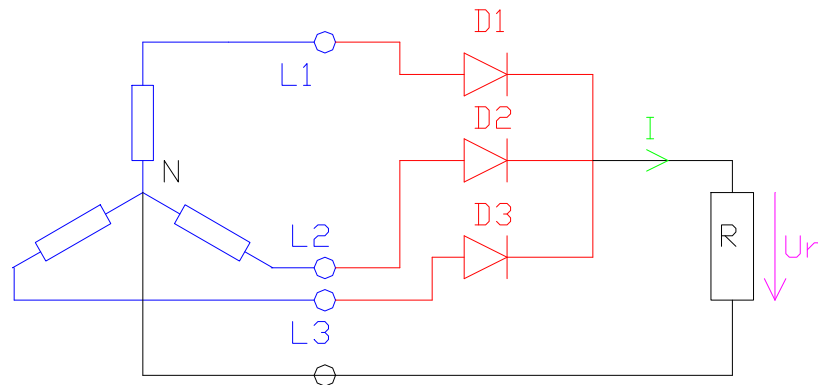


### 1.6. Le redressement triphasé simple alternance

Dans ce type de redressement, il faut obligatoirement un transformateur triphasé avec secondaire couplé en étoile.

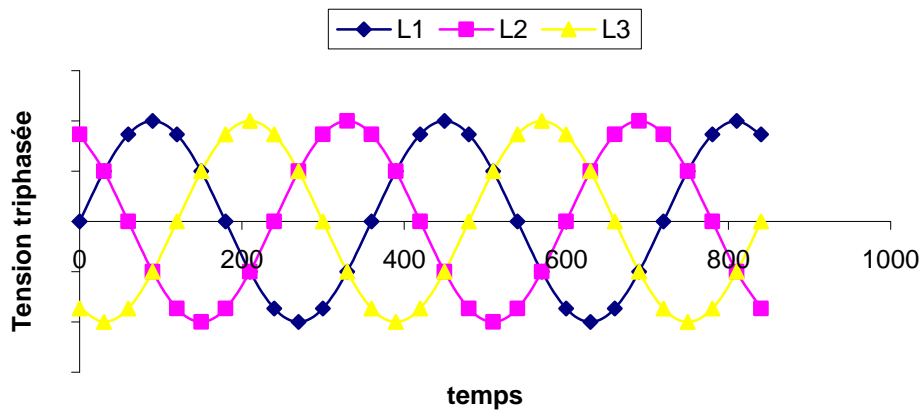
Dans ce type d'étude, il ne faut pas perdre de vue que nous avons à faire à un réseau triphasé et que dès lors les tensions simples sont déphasées l'une de l'autre de  $120^\circ$ .

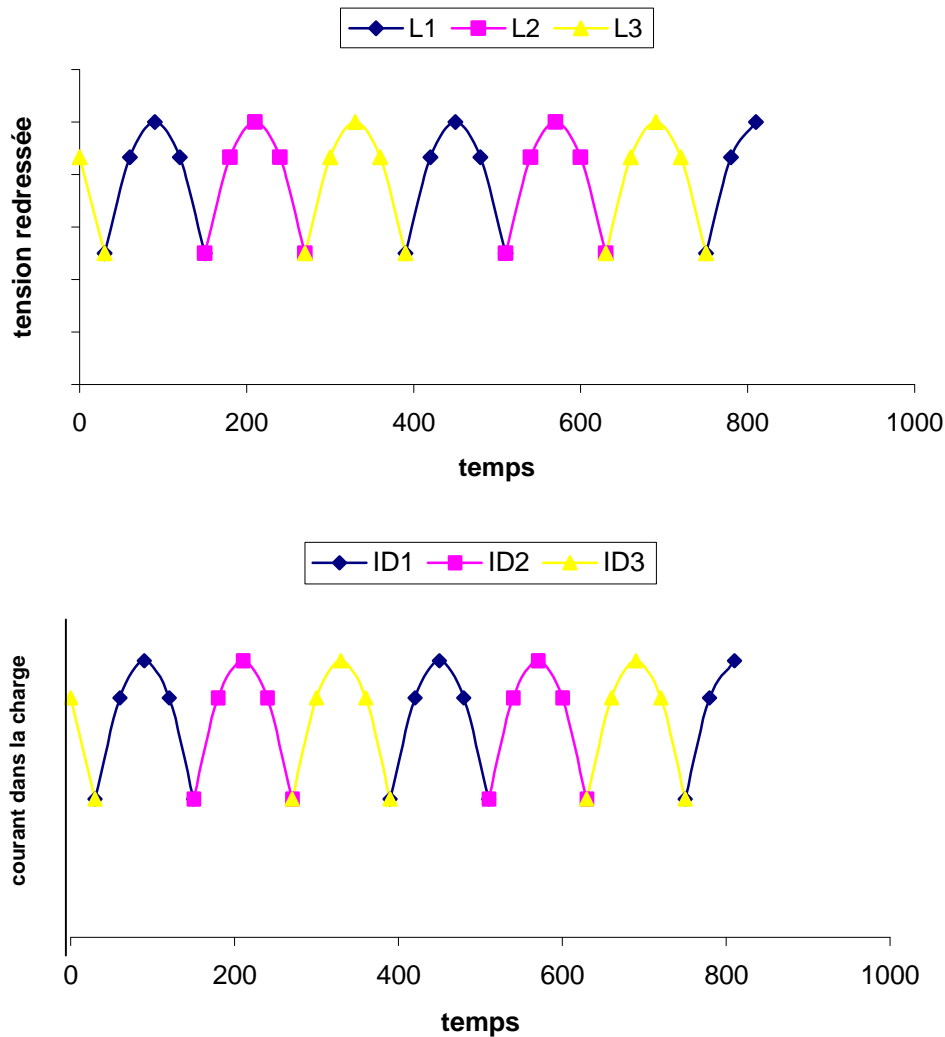
Si nous prenons encore comme hypothèse que la charge est unique, que les diodes sont identiques et que les enroulements du transformateur sont identiques, je peux conclure en disant que mon circuit est équilibré.



Les allures des courants dans chaque diode et les tensions en sortie du transformateur ou aux bornes de la charge peuvent se représentées comme suit :

Réseau triphasé(sortie transformateur)





Nous voyons en regard au allure des différentes courbe que les diodes vont se mettre en conduction les unes après les autres. Les diodes se mettront en conduction lorsque la tension dans la phase correspondante sera la plus positive. Nous retrouvons d'ailleurs la plage de conduction de chacune des diodes sur la courbe de la tension aux bornes de la charge. Noter que pendant cette conduction, la tension redressée suit parfaitement l'allure sinusoidale de la tension en sortie du transformateur.

Je peux tirer de notre signal redressé que  $V_M = V_{eff} \cdot \sqrt{2}$ .

La tension moyenne elle pourra se trouver au départ de l'intégrale suivante :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_2} V_M \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \text{ ce qui reprend bien la conduction d'une diode de } t_1 \text{ à } t_2.$$

La valeur ainsi trouvée est de :  $V_{moy} = 0,827 \cdot V_M$ .

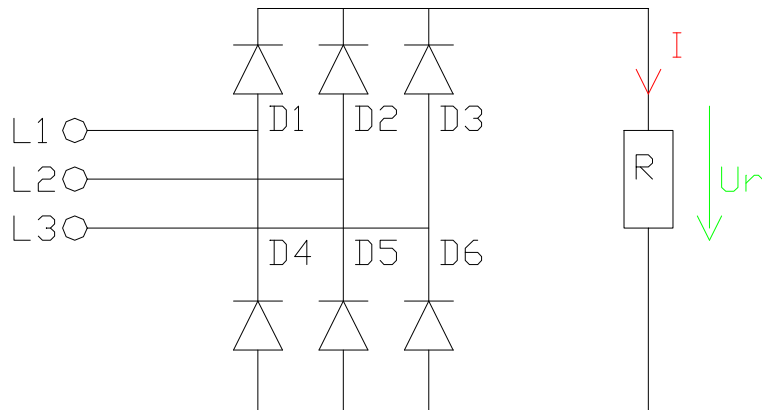
Noter au passage que le temps de conduction de chaque diode sur une période complète est de 1/3 de cette période. Dans une autre analogie, la fréquence du signal redressé est égale à 3 fois la fréquence du signal en sortie du transformateur.

Le courant moyen dans une diode sera donc de :  $I_{Dmoy} = \frac{I_{moy}}{3}$ .

### 1.7. Le redressement triphasé double alternance par pont de Graëtz

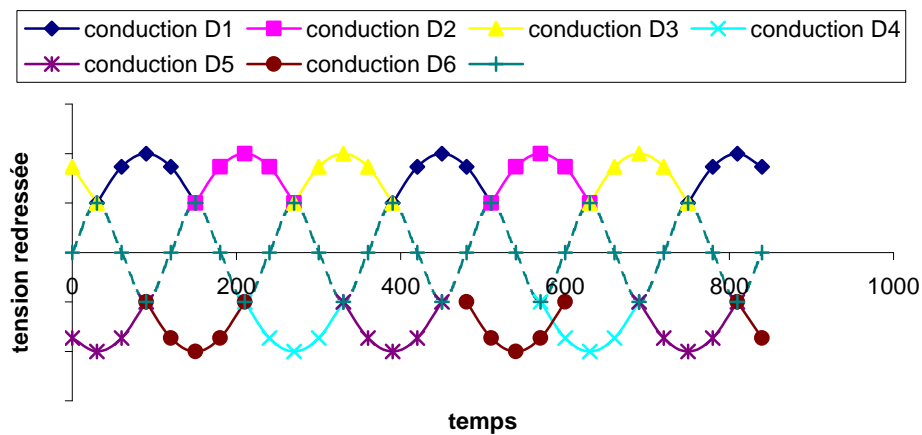
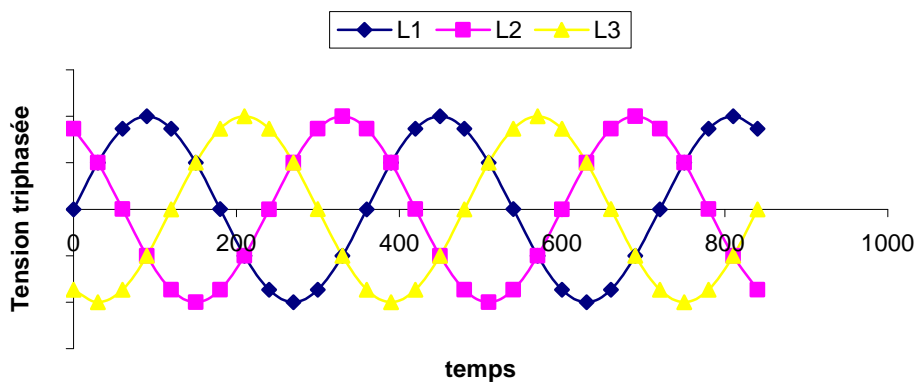
Dans ce type de redressement, nous utiliserons six diodes afin de réaliser le redressement d'un signal triphasé sinusoïdale. Cette méthode est de loin la meilleure et la plus utilisée.

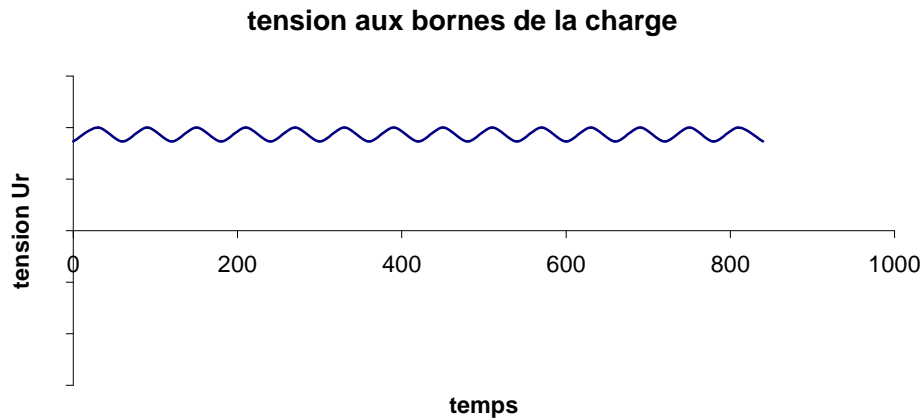
Le schéma de câblage est le suivant :



Voyons ci-dessous les zones de conduction de chaque diode afin de trouver la mise en conduction de chacune des diodes.

Réseau triphasé(sortie transformateur)





Analysons pour une période les différentes phases de commutation au droit de chaque diode.

temps	D1	D2	D3	D4	D5	D6
0-30	0	0	1	0	1	0
30-60	1	0	0	0	1	0
60-90	1	0	0	0	1	0
90-120	1	0	0	0	0	1
120-150	1	0	0	0	0	1
150-180	0	1	0	0	0	1
180-210	0	1	0	0	0	1
210-240	0	1	0	1	0	0
240-270	0	1	0	1	0	0
270-300	0	0	1	1	0	0
300-330	0	0	1	1	0	0
330-360	0	0	1	0	1	0

La tension moyenne aux bornes de la charge est donc le double de celle d'un montage redresseur simple alternance.  $U_{Rmoy}=1,65.V_M$  ou encore  $U_{Rmoy}=2,34.V_{eff}$  avec  $V_{eff}$  = tension simple effective.

Pour une tension composée nous aurons  $U_{Rmoy}=1,35.U_{eff}$  avec  $U_{eff}$  = tension composée effective.

La fréquence d'ondulation vaudra dans ce cas 6 fois la fréquence de la tension triphasée.

Le courant moyen traversant chaque diode est  $I_{Dmoy}=\frac{I_{moy}}{3}$  avec  $I_{moy}$  = courant moyen dans la charge.