



ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

2^{ème} année – S3

ELEC INSTRU 3

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Ch1 – HACHEUR

Ch2 – THYRISOR

Ch3 – REDRESSEMENT NON COMMANDE

Ch4 – REDRESSEMENT COMMANDE

Ch5 – GRADATEUR

Ch6 – ONDULEUR

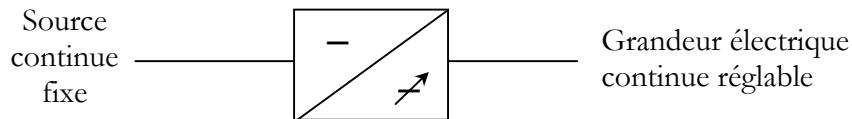
Colle (1s)

Support de Cours/TD
Document à compléter pendant les séances.

Chapitre 1 – HACHEUR

I – DEFINITION

Un hacheur est un convertisseur statique (qui ne tourne pas !) permettant de régler le transfert d'énergie entre une source électrique continue et une charge devant fonctionner en courant continu.

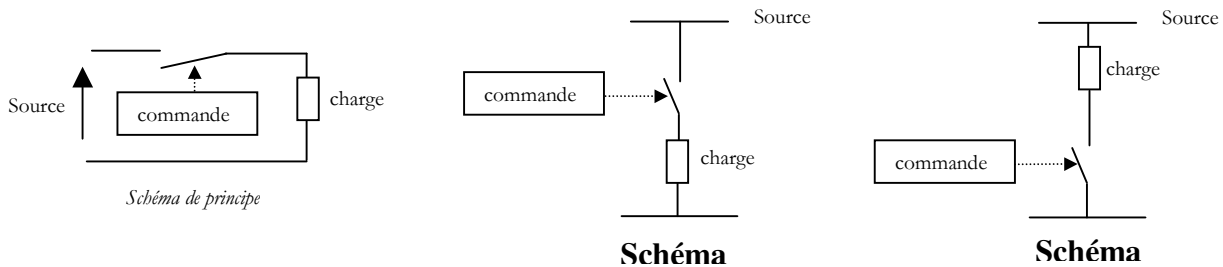


L'application typique est la commande de vitesse de rotation d'un moteur à courant continu : A partir d'une source de tension fixe, le moteur est alimenté par un courant continu réglable. La vitesse de rotation est d'autant plus grande que l'intensité du courant est grande.

II – PRINCIPE

1°/ SCHEMA DE PRINCIPE

Le principe de fonctionnement est d'établir et interrompre la liaison source-charge à l'aide d'un interrupteur électronique commandé par un signal périodique.



Les deux premiers schémas sont identiques. Dans le troisième on a permuté l'interrupteur et la charge, ce qui ne change rien au fonctionnement du dispositif.

L'interrupteur électronique utilise un transistor de puissance ou un thyristor.

2°/ SIGNAL DE COMMANDE DE L'INTERRUPTEUR



Le rapport cyclique α est défini par :

$$\alpha = T_1 / T$$

C'est le paramètre de réglage du signal de commande : La période T est fixe et T_1 réglable.

L'état haut du signal de commande provoque la fermeture de l'interrupteur. La charge est alors reliée à la source électrique. L'état bas du signal de commande provoque l'ouverture de l'interrupteur. La charge est alors déconnectée de la source.

Cette succession périodique d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur provoque le hachage de la grandeur électrique de la source.

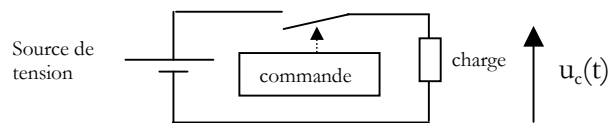
La fréquence $f = 1/T$ est la fréquence du hachage.

3°/ DIFFERENTS TYPES DE HACHEURS

a) Source de tension

La source électrique est une source de tension.

A cause du hachage, la tension aux bornes de la charge présente des variations brutales.



Si la charge est résistive, le courant sera également haché. ($u_c = Ri$)

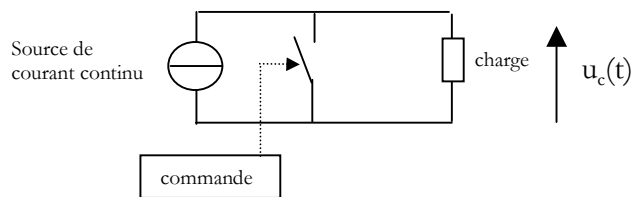
Si la charge est inductive, le courant sera lissé. (Rappel : Le courant dans un circuit inductif (R, L) ne présente pas de variations brutales).

Si la charge est capacitive : la variation brutale imposée entraînera des pics de courants : $i_c = C du_c/dt$. On évitera donc cette possibilité.

En conclusion : Source de tension => charge R ou R,L.

Ce type de hacheur est un à liaison directe appelé **hacheur série**.

b) Source de courant



Le signal de commande entraîne le hachage du courant dans la charge.

Si la charge est résistive, la tension sera également hachée. ($u_c = Ri$)

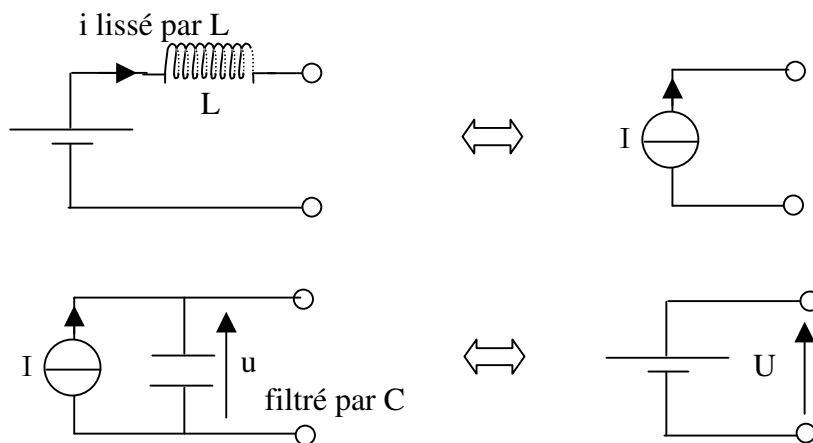
Si la charge est capacitive, la tension sera filtrée. (Rappel : La tension aux bornes d'un condensateur ne présente pas de variations brutales).

Si la charge est inductive : la variation brutale imposée entraînera des pics de tension : $u_L = L di/dt$. On évitera donc cette possibilité.

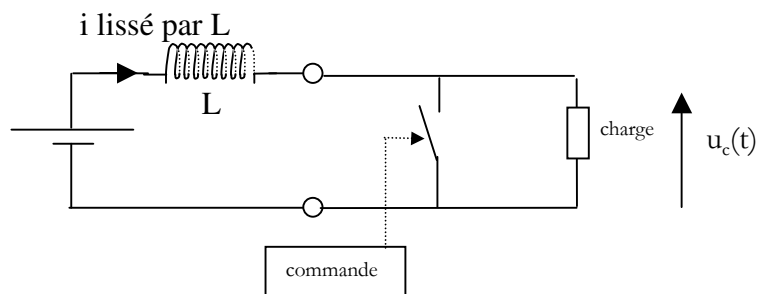
En conclusion : Source de courant => charge R ou R,C.

Ce type de hacheur est un hacheur à liaison directe appelé **hacheur parallèle**.

c) Changement de la nature des sources



Ainsi le hacheur parallèle peut être réalisé à partir d'une source de tension transformée en source de courant par une inductance :

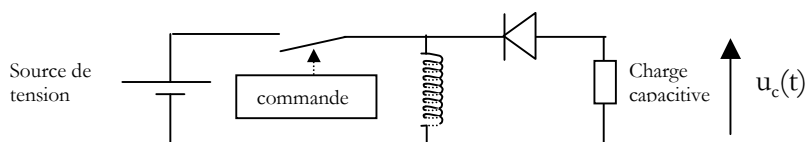


d) Hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation

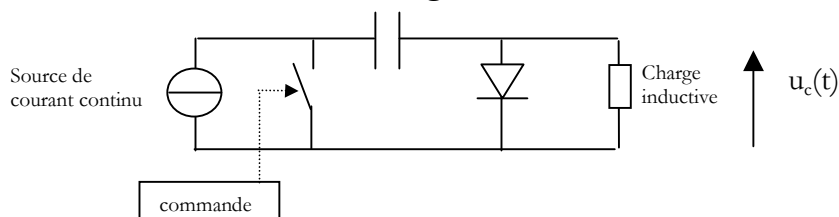
Nous avons vu que les hacheurs à lisons directe ne permettent pas la liaison : Source de tension et charge capacitive ou source de courant et charge inductive.

Pour ces deux cas on peut utiliser un hacheur à liaison indirecte :

- Source de tension et charge capacitive : *hacheur à accumulation inductive*

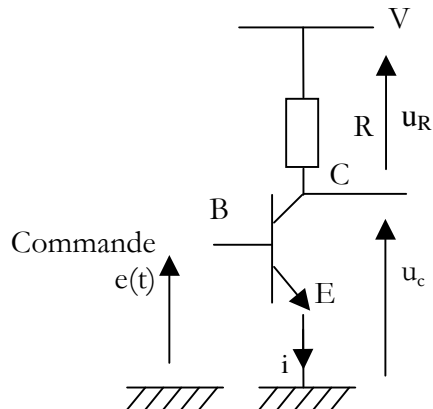


- Source de courant et charge inductive : *hacheur à accumulation capacitive*



III – HACHEUR SERIE - CHARGE R

1°/ SCHEMA DU DISPOSITIF

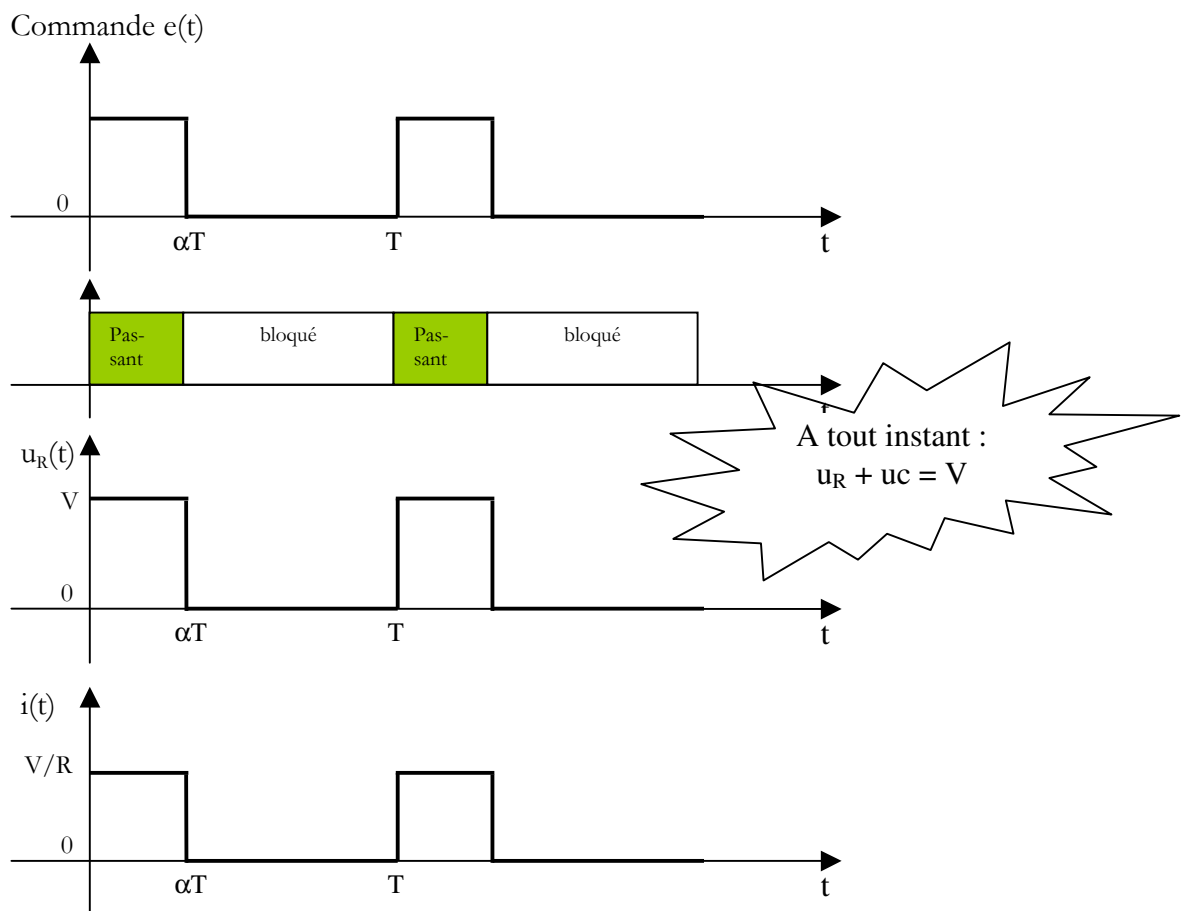


L'interrupteur commandé est un transistor de puissance fonctionnant en commutation.

$e(t)$ état haut $\Rightarrow$ transistor saturé : $V_{CE} \approx 0$

$e(t)$ état bas $\Rightarrow$ transistor bloqué : $V_{CE} = V$

2°/ CHRONOGRAMMES



3°/ VALEUR MOYENNE DE U_c ET DE I

Rappel valeur moyenne :

$$U_{R \text{ moy}} = \frac{\text{surface sous une période de la courbe } u_c(t)}{\text{Période}} = \frac{V \alpha T}{T}$$

On a donc ici :

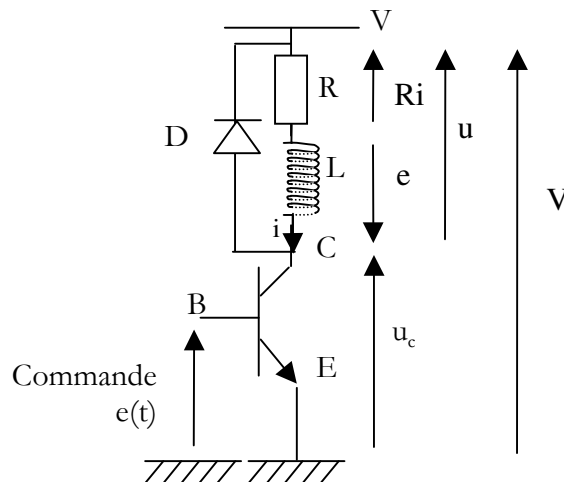
$$U_{R \text{ moy}} = \alpha V \text{ et } I_{\text{moy}} = \alpha V / R$$

Le rapport cyclique du signal de commande fait varier la valeur moyenne du courant dans la charge résistive.

Le courant et la tension sont discontinus (hachés).

IV- HACHEUR SERIE - CHARGE RL

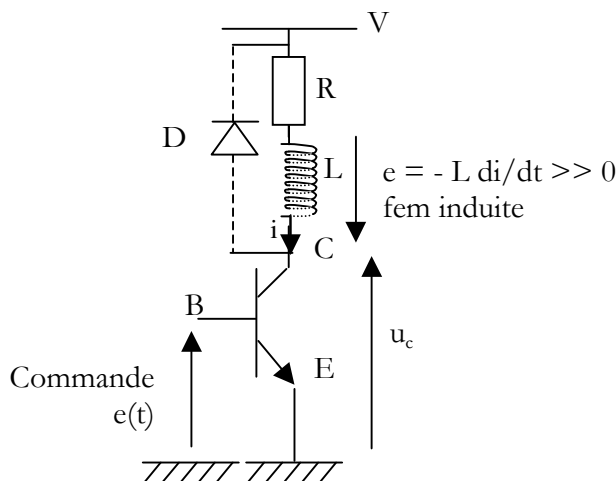
1°/ SCHEMA DU DISPOSITIF



2°/ NECESSITE D'UNE DIODE DE ROUE LIBRE

- Sans la diode D :

Quand le transistor passe de passant à bloqué, le courant i s'interrompt brutalement. Cela entraîne une variation de flux magnétique dans la bobine et donc l'apparition d'une fem induite s'opposant par ses effets à la cause qui lui donne naissance, c'est à dire s'opposant à l'annulation du courant.



Interruption du courant : $di/dt \ll 0$

$$e = -L \frac{di}{dt} \gg 0$$

$$u_c = V_{CE} = V - R \cdot i + e = V + e \gg 0$$

On a donc un pic de tension aux bornes du transistor. Cela peut le détruire.

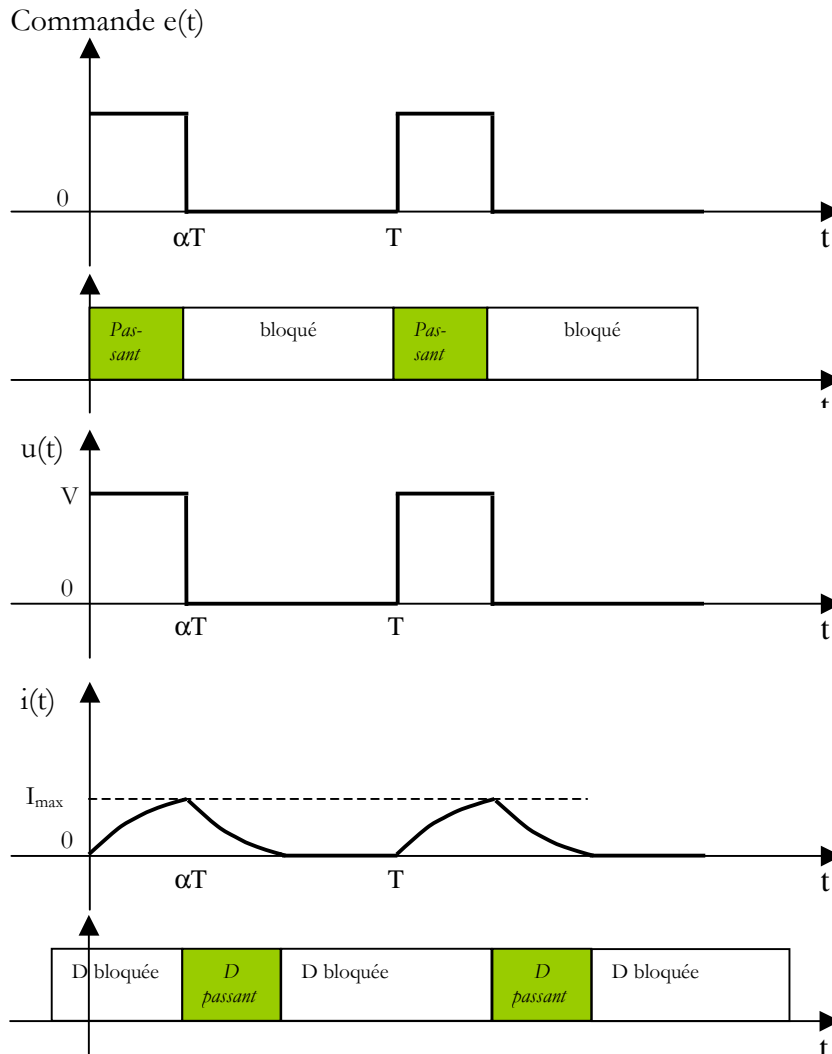
- Avec la diode D :

Quand le transistor se bloque, le courant induit généré par la fem induite peut circuler librement dans le circuit RL car la diode est alors passante ($e > 0$). Le courant i s'éteint donc progressivement.

3°/ CHRONOGRAMMES

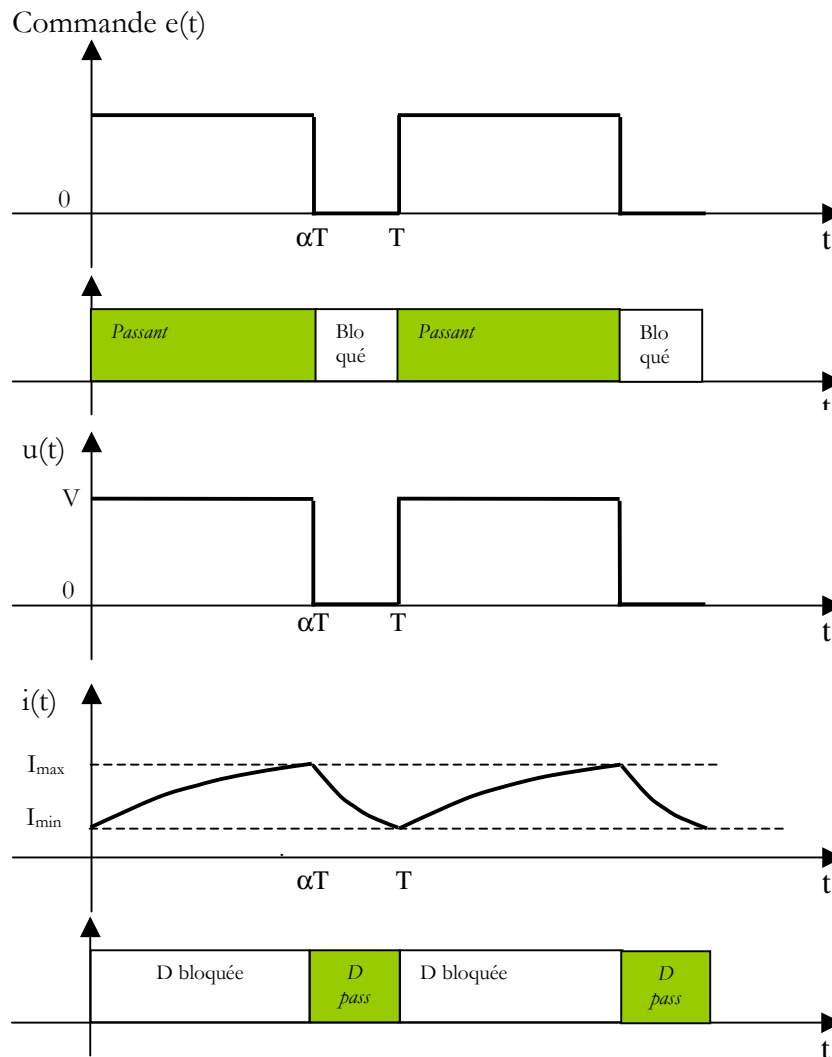
a) Conduction discontinue

La constante de temps L/R et le rapport cyclique est tel que le courant $i(t)$ peut s'annuler avant la remise en conduction du transistor.



b) Conduction continue

Pour une même période T et une même constante de temps L/R , la conduction peut devenir continue lorsque le rapport cyclique augmente. Le courant i n'a pas le temps de s'annuler avant la remise en conduction du transistor.



4°/ VALEUR MOYENNE DE U ET DE I

On a donc ici :

$$U_{\text{moy}} = \alpha V \text{ et } I_{\text{moy}} = U_{\text{moy}}/R \text{ car } U_{L\text{moy}} = 0$$

Le rapport cyclique du signal de commande fait varier la valeur moyenne du courant dans la charge résistive.

La tension est hachée.

Le courant est ondulé mais toujours de même signe et donc dans le même sens.

Le courant est d'autant moins ondulé que la constante de temps L/R est grande par rapport à la période du signal de commande.

On a donc intérêt à utiliser une inductance de forte valeur.

On parle de bobine de lissage : la bobine a alors pour fonction de rendre le courant continu.

5°/ ONDULATION DU COURANT

T passant : Rappel : $i(t) = A \exp(-t/\tau) + B$

avec B régime permanent et A = Valeur initiale – Régime permanent

$$i(t) = (I_{\min} - V/R) \exp(-Rt/L) + V/R$$

$$\text{A } t = \alpha T, \text{ on a : } i(\alpha T) = I_{\max} = (I_{\min} - V/R) \exp(-R\alpha T/L) + V/R$$

T bloqué. En prenant l'origine des temps au début de cette phase, on a :

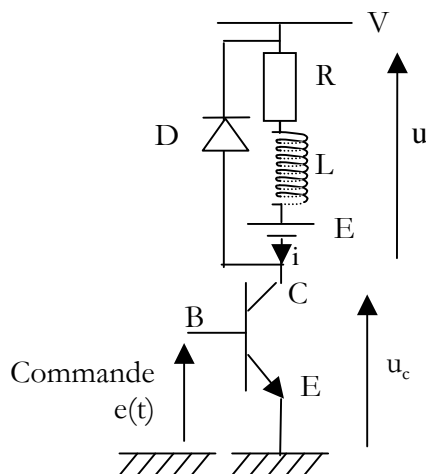
$$i(t) = I_{\max} \exp(-Rt/L)$$

$$\text{A } t = (1-\alpha) T, \text{ on a : } i[(1-\alpha)T] = I_{\min} = I_{\max} \exp(-R(1-\alpha)T/L)$$

On a ainsi la possibilité d'exprimer $I_{\max}$ et $I_{\min}$ en fonction de R, L α et T

V- HACHEUR SERIE - CHARGE RL,E (moteur à courant continu)

1°/ SCHEMA DU DISPOSITIF



E : Fem induite dans le moteur E

E est proportionnelle à :

- la vitesse de rotation n (trs/s)
- au flux magnétique Φ

$$E = k n \Phi$$

Transistor passant :

$$u = V$$

i augmente exponentiellement vers la valeur finale $(V-E)/R$

Transistor bloqué :

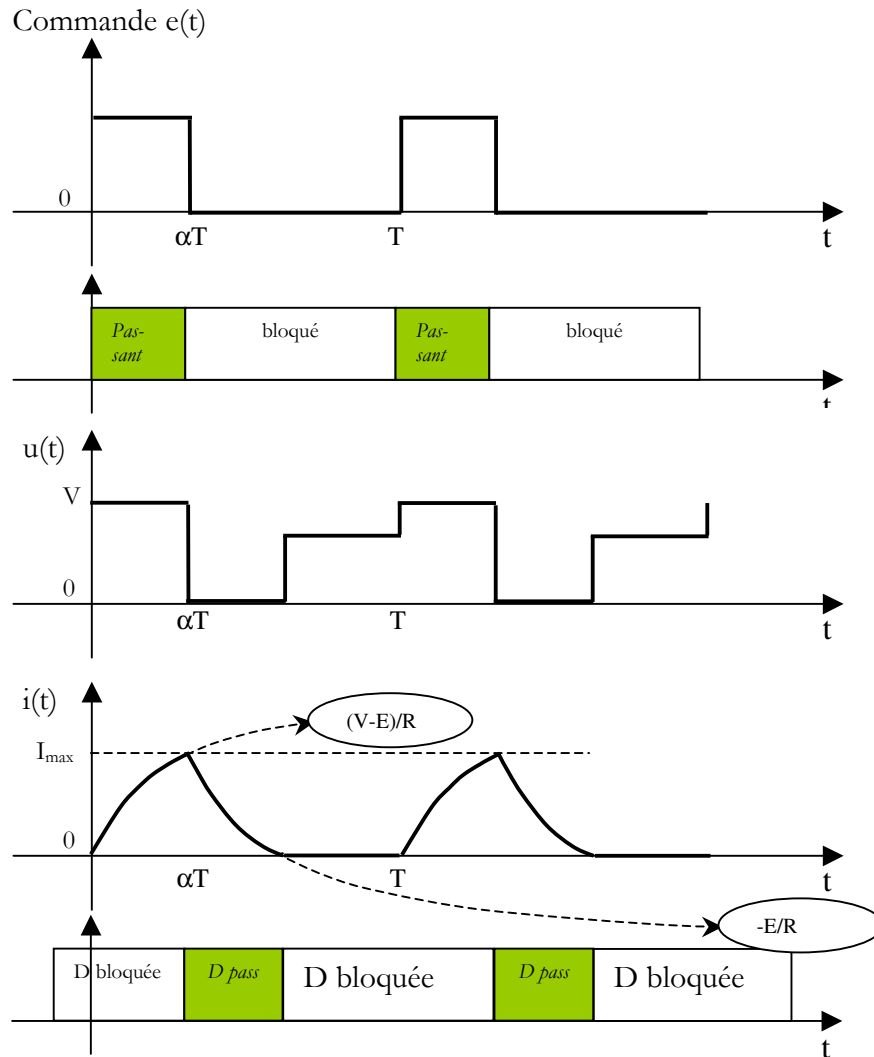
I décroît exponentiellement vers $-E/R$, grâce à la diode de roue libre. On a alors $u = 0$.

Mais quand i tend à s'inverser la diode se bloque donc $u = E$.

2°/ CONDUCTION DISCONTINUE

Chronogrammes

La constante de temps L/R et le rapport cyclique sont tels que le courant $i(t)$ peut s'annuler avant la remise en conduction du transistor.

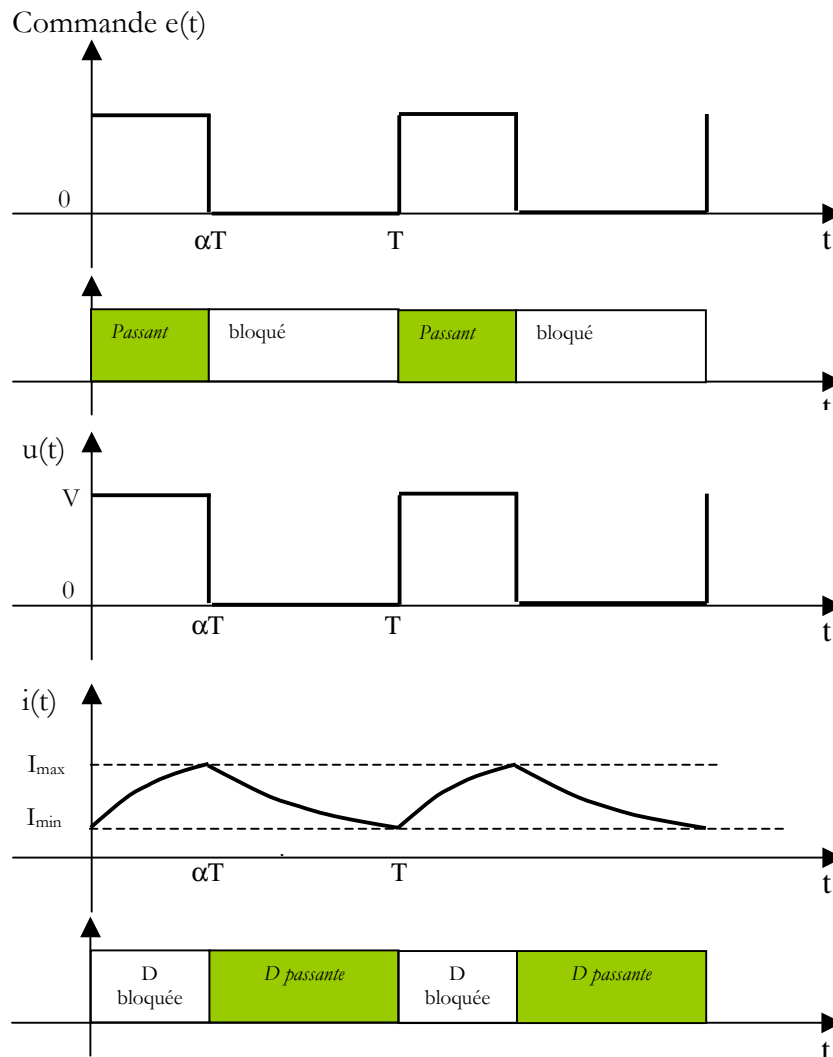


Remarque : On évite ce cas car le moteur est alors parcouru par un courant trop ondulé.

3°/ CONDUCTION CONTINUE

En augmentant la constante de temps L/R du circuit en jouant sur L , on peut obtenir une conduction continue quel que soit le rapport cyclique.

a) Chronogrammes



b) Valeur moyenne

On a donc ici :

$$U_{\text{moy}} = \alpha V \text{ et } I_{\text{moy}} = (U_{\text{moy}} - E)/R \text{ car } U_{L\text{moy}} = 0$$

Le rapport cyclique du signal de commande fait varier la valeur moyenne du courant dans la charge résistive.

La tension est hachée.

Le courant est ondulé mais toujours de même signe et donc dans le même sens.

Le courant est d'autant moins ondulé que la constante de temps L/R est grande par rapport à la période du signal de commande.

On a donc intérêt à avoir une inductance de forte valeur. On peut éventuellement ajouter une bobine de lissage pour augmenter l'inductance du bobinage du rotor du moteur à courant continu.

c) Condition pour obtenir une conduction ininterrompue

Le courant I_{cmoy} est forcément positif. Cela entraîne la condition : $\alpha V > E \Leftrightarrow \alpha > E/V$.

d) Expressions instantanées du courant.

T passant :

$$i(t) = (I_{\min} - (V-E)/R) \exp(-Rt/L) + (V-E)/R$$

$$\text{A } t = \alpha T, \text{ on a : } i(t) = I_{\max} = (I_{\min} - (V-E)/R) \exp(-R\alpha T/L) + (V-E)/R$$

T bloqué : En prenant l'origine des temps au début de cette phase, on a :

$$i(t) = (I_{\max} + E/R) \exp(-Rt/L) - E/R$$

$$\text{A } t = (1-\alpha) T, \text{ on a : } i[(1-\alpha)T] = I_{\min} = (I_{\max} + E/R) \exp(-R(1-\alpha)T/L) - E/R$$

Ondulation du courant :

$$I_{\max} - I_{\min} = (V-E) [1 - \exp(-\alpha RT/L)] / R$$

Approximation :

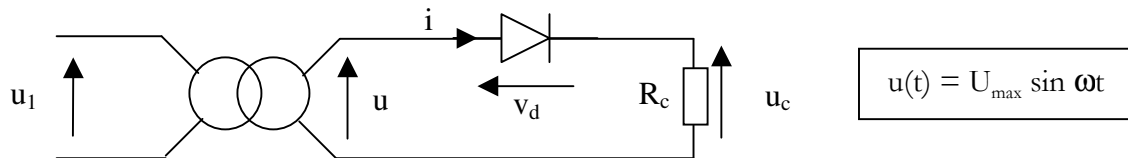
Si $L/R \gg T \Rightarrow RT/L \ll 1 \Rightarrow \alpha RT/L \approx \epsilon$. On a alors : $1 - \exp(\epsilon) \approx \epsilon$

$$I_{\max} - I_{\min} \approx (V-E) \alpha T / L$$

Chapitre 2 – REDRESSEMENT NON COMMANDE

I – REDRESSEMENT SIMPLE ALTERNANCE

1°/ CHARGE RESISTIVE

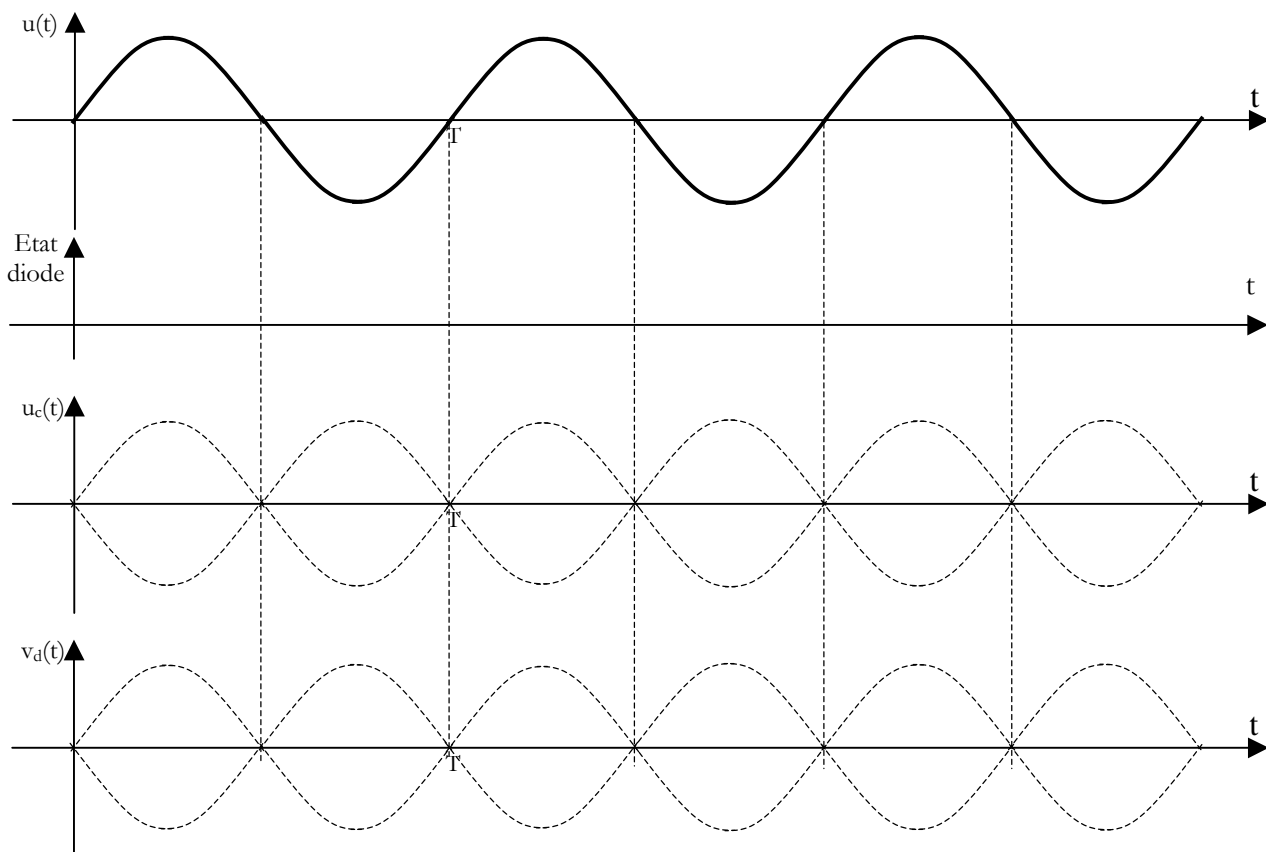


a) Fonctionnement

$$u > 0 \Rightarrow D \text{ passante} \Rightarrow v_d = 0,7V \text{ et } u_c = u - v_d \approx u$$

$$u < 0 \Rightarrow D \text{ bloquée } (i = 0) \Rightarrow u_c = 0 \text{ et } v_d = u$$

b) Chronogrammes



c) Valeurs moyennes

$$U_{\text{cmoy}} = (1/T) \int_0^{T/2} u_c(t) dt$$

Changement de variable : $\theta = \omega t \Rightarrow$ période 2π , intégrale de 0 à π

$$\text{Donc : } U_{\text{cmoy}} = (1/2\pi) \int_0^\pi U_{\text{max}} \sin \theta d\theta = \{ U_{\text{max}} [-\cos\theta]_0^\pi \} / 2\pi \Rightarrow$$

$$U_{\text{cmoy}} = U_{\text{max}} / \pi$$

$$\text{Courant moyen : } I_{\text{moy}} = U_{\text{cmoy}} / R$$

d) Valeurs efficaces

$$U_{\text{ceff}}^2 = (1/T) \int_0^{T/2} u_c^2(t) dt$$

Changement de variable : $\theta = \omega t \Rightarrow$ période 2π , intégrale de 0 à π

$$\begin{aligned} \text{Donc : } U_{\text{ceff}}^2 &= (1/2\pi) \int_0^\pi U_{\text{max}}^2 \sin^2 \theta d\theta = (U_{\text{max}}^2/2\pi) \int_0^\pi (1 - \cos 2\theta) d\theta / 2 \\ &= (U_{\text{max}}^2/4\pi) \{ \int_0^\pi d\theta - \int_0^\pi \cos 2\theta d\theta \} \\ &= (U_{\text{max}}^2/4\pi) \{ [\pi - 0] - [\sin 2\theta]_0^\pi \} = U_{\text{max}}^2/4 \end{aligned}$$

$$\text{On a donc : } U_{\text{ceff}} = U_{\text{max}} / 2$$

$$\text{Courant efficace : } I_{\text{eff}} = U_{\text{ceff}} / R$$

Connaître U_{ceff} et I_{eff} permet de chiffrer la puissance consommée par la charge, et donc de dimensionner le transformateur.

e) Taux d'ondulation

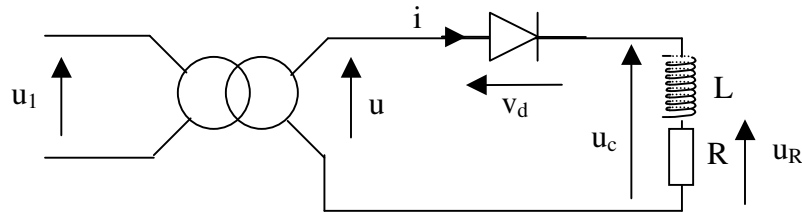
$$\text{Définition : Taux d'ondulation } o = (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) / 2X_{\text{moy}}$$

$$\text{Taux d'ondulation de la tension } o_{\text{uc}} = \pi/2$$

$$\text{Taux d'ondulation du courant : } o_i = \pi/2$$

Avec une charge résistive l'ondulation du courant reste importante et égale à celle de la tension. Il n'en est plus de même avec une charge inductive.

2°/ CHARGE INDUCTIVE



a) Fonctionnement

La bobine est parcourue par un courant variable

- ⇒ variation du flux propre
- ⇒ fem auto-induite vérifiant la loi de Lenz : elle s'oppose aux variations du courant.
- ⇒ Croissance plus lente du courant que dans le cas charge Résistive
- ⇒ Décroissance plus lente du courant
- ⇒ Durée de circulation du courant augmente
- ⇒ Durée de conduction de la diode augmente.

Tant que la diode conduit, on a $u_c = u$

- ⇒ u_c peut donc devenir négative.

b) Evolution du courant

$$u_c = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Quand D passante, $u_c = u \Rightarrow i = (u - L \frac{di}{dt}) / R$

D reste passante tant que $i > 0$ donc tant que $u > L \frac{di}{dt} = u_L$.

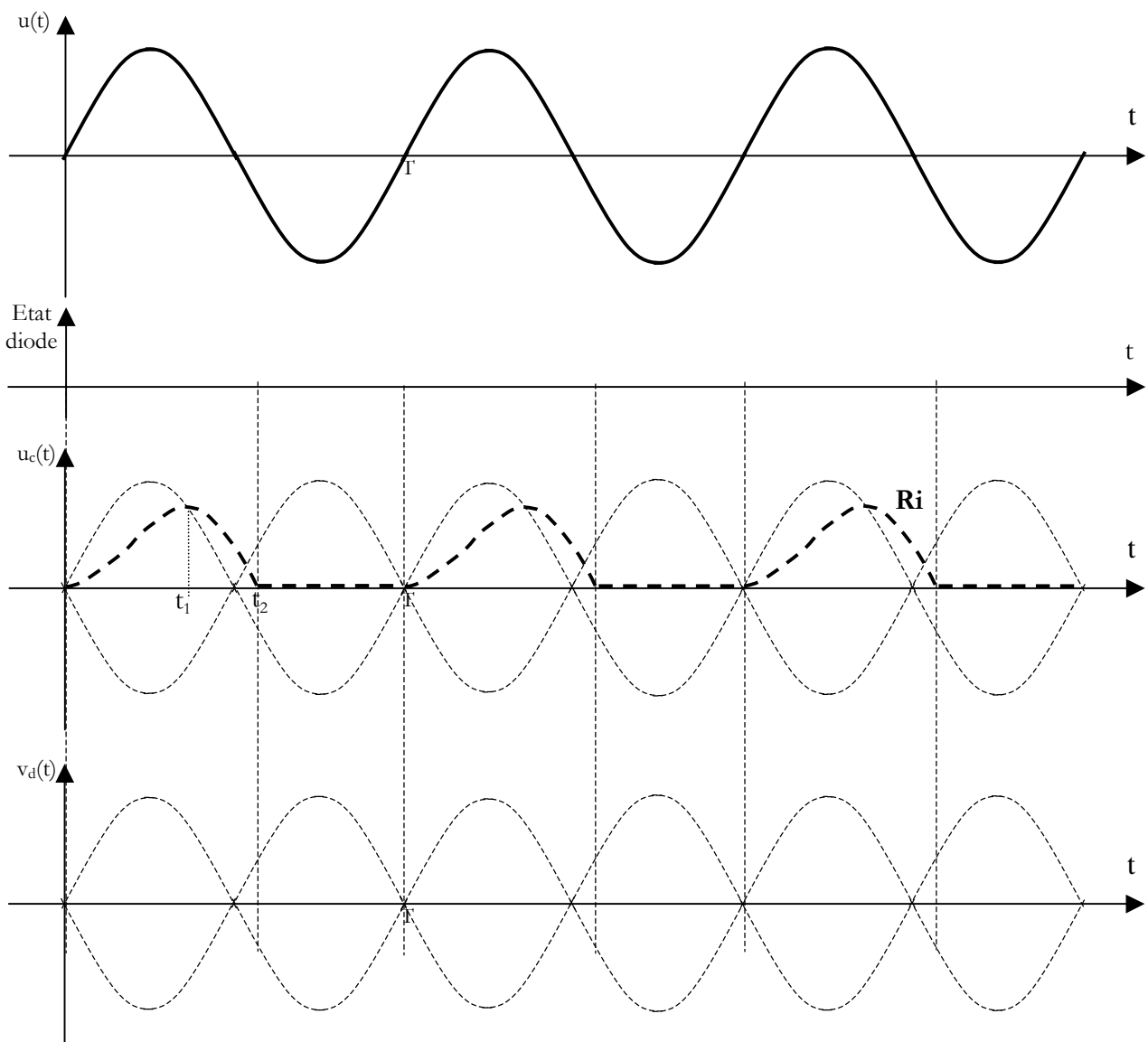
Croissance du courant : $\frac{di}{dt} > 0 \Rightarrow Ri < u$

Courant maximum à l'instant t_1 : $\frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow Ri_{max} = u(t_1)$

Décroissance du courant : $\frac{di}{dt} < 0 \Rightarrow Ri > u$

Annulation du courant à l'instant t_2 : La diode se bloque quand le courant tend à devenir négatif c'est à dire quand $u < L \frac{di}{dt}$. La tension u_c devient alors nulle : $u_c = 0$.

c) Chronogrammes



d) Point de vue énergétique

$0 < t < t_1$: La bobine emmagasine de l'énergie sous forme magnétique pendant la phase de croissance du courant.

$t_1 < t < t_2$: La bobine restitue cette énergie sous forme électrique au reste du circuit pendant la phase de décroissance du courant.

e) Remarques

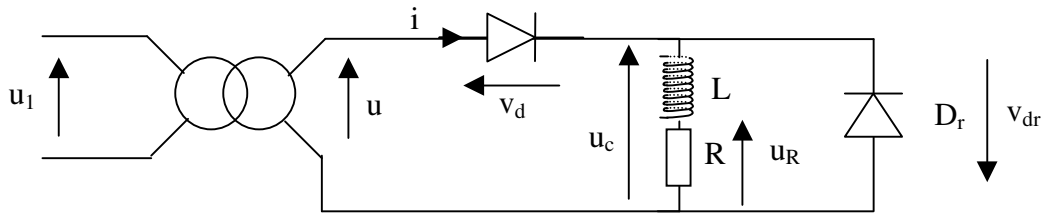
On constate que l'ondulation du courant diminue par rapport au cas de la charge résistive.

Cette ondulation est d'autant plus faible que L est grande

Le temps de conduction de la diode augmente également avec L .

U_{cmoy} diminue avec l'augmentation du temps de conduction de la diode.

3°/ CHARGE INDUCTIVE et DIODE DE ROUE LIBRE



a) Fonctionnement

On a $L \frac{di}{dt} = u - Ri$ si D est passante

- Tant que $Ri < u$, on a $di/dt > 0$: le courant augmente. La diode D est alors passante et D_r bloquée.

On a alors $u_c = u - 0,7 \approx u$

- Quand $Ri > u$, $di/dt < 0$: le courant décroît.. On a toujours D passante et D_r bloquée et $u_c \approx u$.
- Quand u_c tend à devenir négatif, la diode D se bloque et la diode D_r devient passante (car $v_{dr} = -u_c$ est positif)

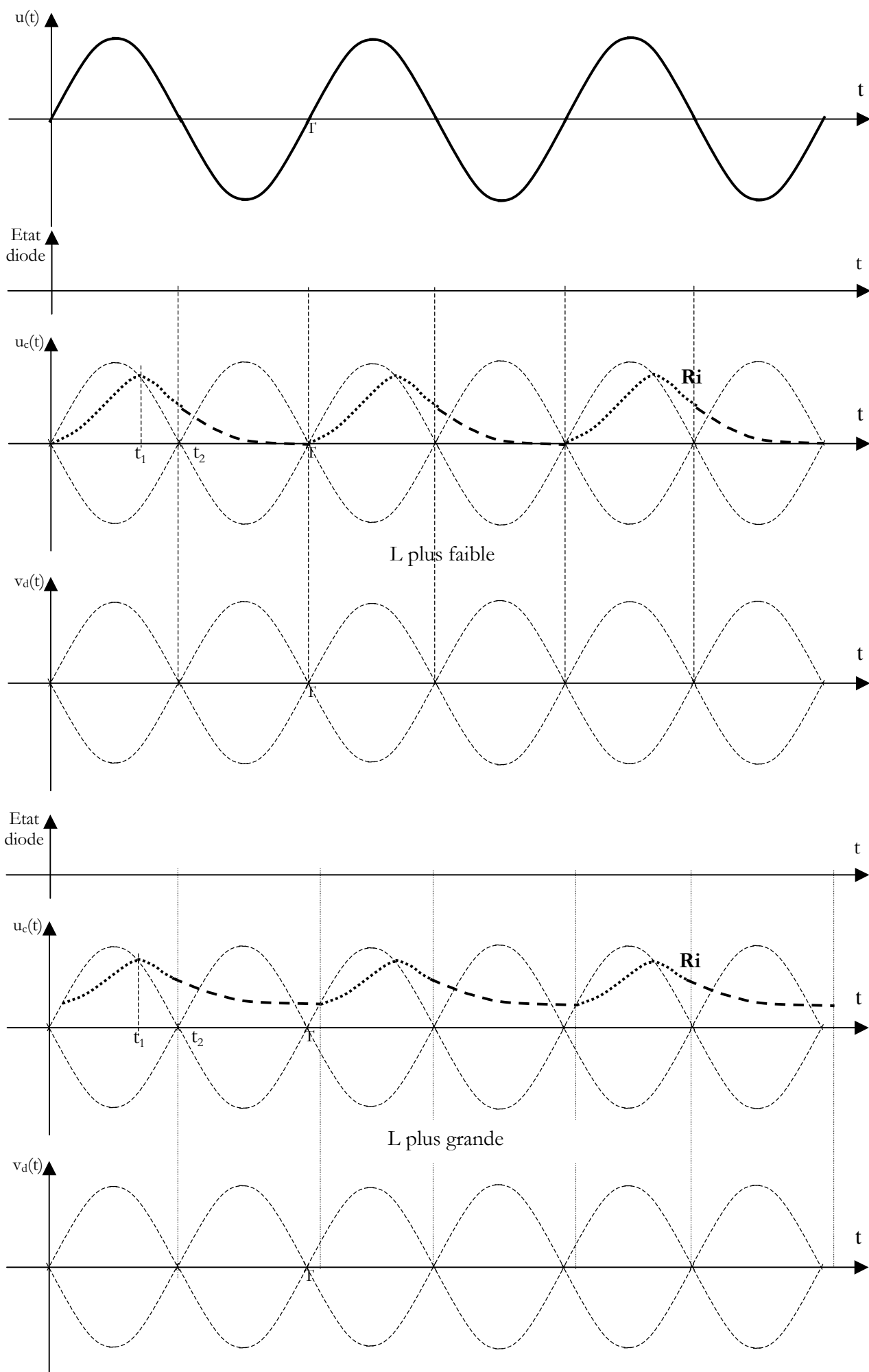
On a alors $u_c = -0,7 \approx 0$

On retrouve donc pour u_c une forme d'onde de redressement simple alternance sur charge R

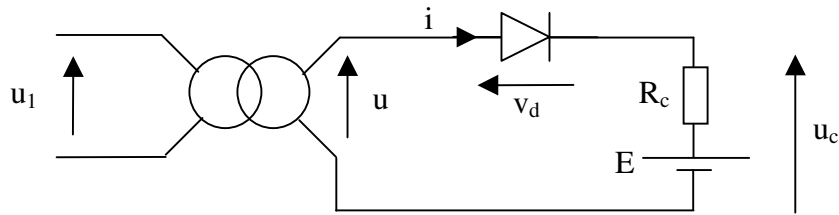
Les remarques du cas précédent s'appliquent toujours : L provoque l'augmentation de la durée de circulation du courant dans la charge par rapport au cas de la charge R .

Plus L est grande, plus la durée de circulation du courant est grande et moins il est ondulé. La circulation du courant peut ne plus s'interrompre.

Si L est très grande, le courant peut sembler continu.



4°/ CHARGE ACTIVE R, E => chargeur de batterie



a) Fonctionnement

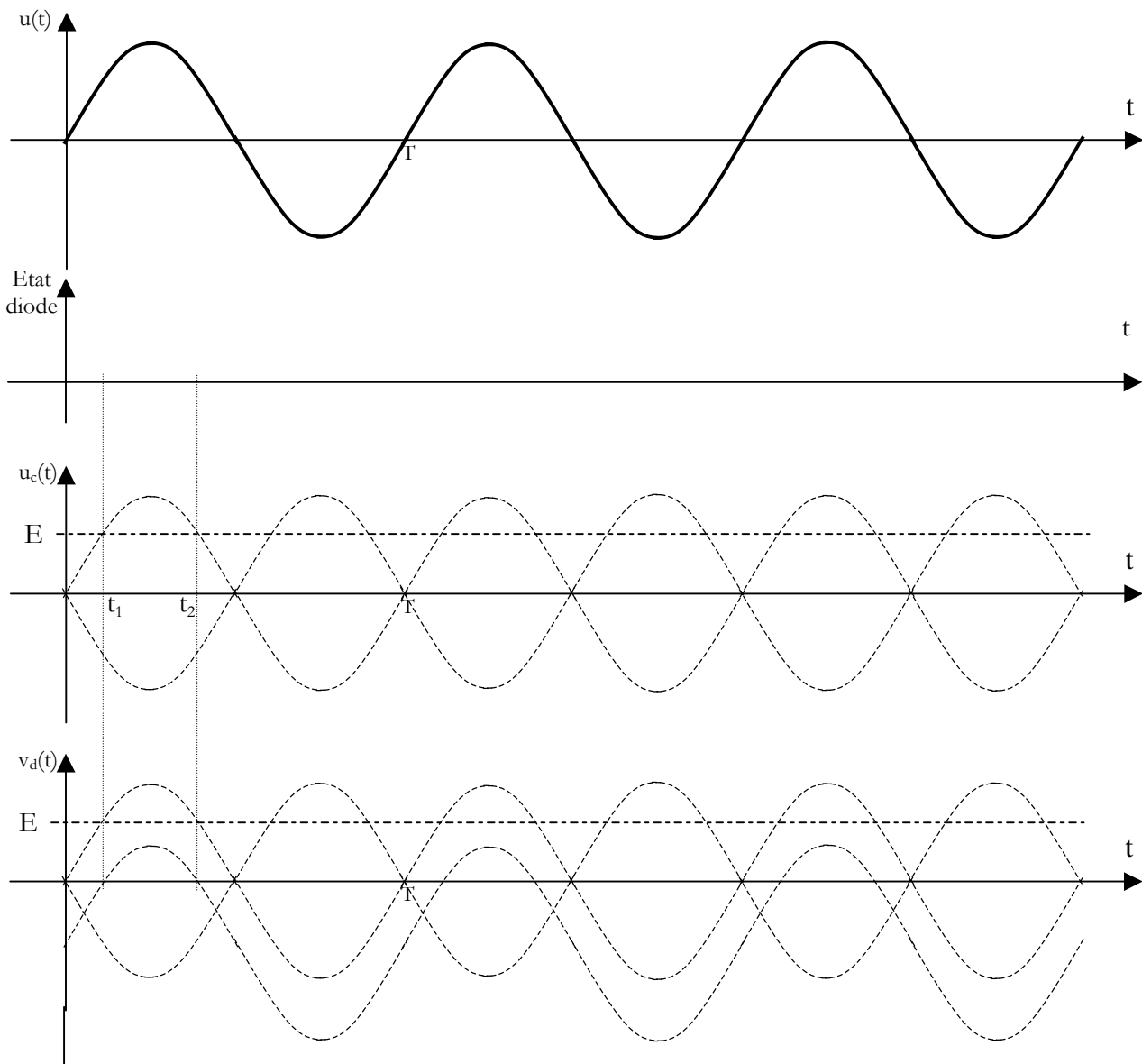
$$u > E + 0,7 \approx E \Rightarrow D \text{ passante} \Rightarrow v_d = 0,7V \approx 0 \text{ et } u_c = u - v_d \approx u$$

$$\text{On a alors } i = (u - E)/R \text{ et } I_{\max} = (U_{\max} - E) / R$$

$$u < E + 0,7 \approx E \Rightarrow D \text{ bloquée (} i = 0 \text{)} \Rightarrow u_c = E \text{ et } v_d = u - E < 0,7 \approx 0$$

$$\text{On a alors } i = 0 \Rightarrow \text{Conduction discontinue}$$

b) Chronogrammes



c) Valeur moyenne

Tension moyenne aux bornes de la charge :

$$U_{cmoy} = [E(t_1 + T - t_2) + \int_{t_1}^{t_2} U_{max} \sin \omega t \, dt] / T$$

$$U_{cmoy} = [E(\theta_1 + 2\pi - \theta_2) + \int_{\theta_1}^{\theta_2} U_{max} \sin \theta \, d\theta] / 2\pi$$

$$t_1 \text{ et } t_2 \text{ sont les instants pour lesquels } u = U_{max} \sin \omega t = E \Rightarrow$$

$$\theta_1 = \arcsin(E/U_{max}) \text{ et } \theta_2 = \pi - \theta_1$$

On a ainsi :

$$U_{cmoy} = [E(\theta_1 + 2\pi - \pi + \theta_1) + U_{max} (\cos \theta_1 - \cos(\pi - \theta_1))] / 2\pi$$

$$U_{cmoy} = [E(2\theta_1 + \pi) + 2U_{max} \cos \theta_1] / 2\pi \quad \text{où } \theta_1 = \arcsin(E/U_{max})$$

Courant moyen :

$$I_{moy} = (U_{cmoy} - E) / R$$

On peut aussi faire le calcul :

$$\begin{aligned} I_{moy} &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} (U_{max} \sin \theta - E) \, d\theta / 2\pi R = (1/2\pi R) [U_{max} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) - E(\theta_2 - \theta_1)] \\ &= (1/2\pi R) [U_{max} 2\cos \theta_1 - E(\theta_2 - \theta_1)] \\ &= (1/2\pi R) [U_{max} 2\cos \theta_1 + E(2\theta_1 - \pi)] \quad \text{où } \theta_1 = \arcsin(E/U_{max}) \end{aligned}$$

La quantité de charge fournie à la batterie pendant une durée t est $q(t) = I_{moy} t$

On peut calculer le temps de charge de la batterie, mais attention, le courant moyen diminue au fur et à mesure de la charge :

Dans le cas d'un chargeur de batterie pour lequel la batterie est initialement déchargée : $E = 0$.

En début de charge, $E = 0$ et $\theta_1 = 0$.

On a donc : $U_{cmoy} = U_{max} / \pi$ et $I_{moy} = U_{max} / \pi R$

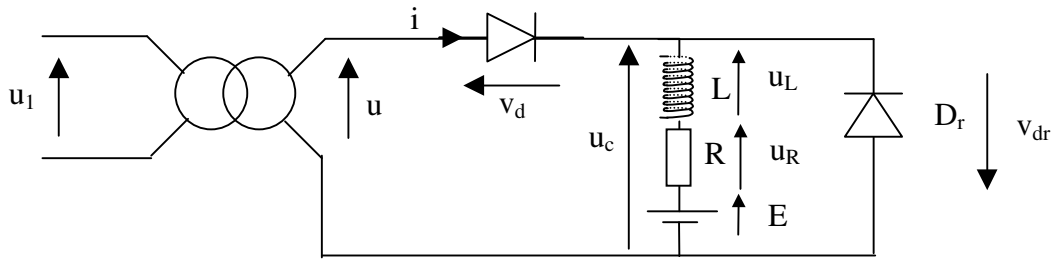
En cours de charge, E augmente et θ_1 augmente vers $\pi/2$.

En fin de charge, $\theta_1 = \pi/2$ et $E = U_{max}$

On a alors : $U_{cmoy} = U_{max}$ et $I_{moy} = 0$

Le courant débité par le chargeur de batterie est plus grand en début de charge qu'en fin de charge.

5°/ CHARGE ACTIVE R, L, E + DIODE DE ROUE LIBRE => Moteur à courant continu



a) Fonctionnement

Par rapport au cas précédent, la bobine retarde la croissance du courant ainsi que son annulation

On constate l'augmentation de la durée de conduction de la diode.

Tant que la diode D est passante, on a $u_c = u$. La tension u_c peut donc devenir $< E$.

b) Evolution du courant

$$u_c = Ri + L \frac{di}{dt} + E$$

$$Ri = u_c - E - L \frac{di}{dt}$$

Phase d'augmentation du courant : $\frac{di}{dt} > 0 \Rightarrow Ri < u_c - E$

Phase de diminution du courant : $\frac{di}{dt} < 0 \Rightarrow Ri > u_c - E$

La diode D se bloque quand u_c tend à devenir négatif.

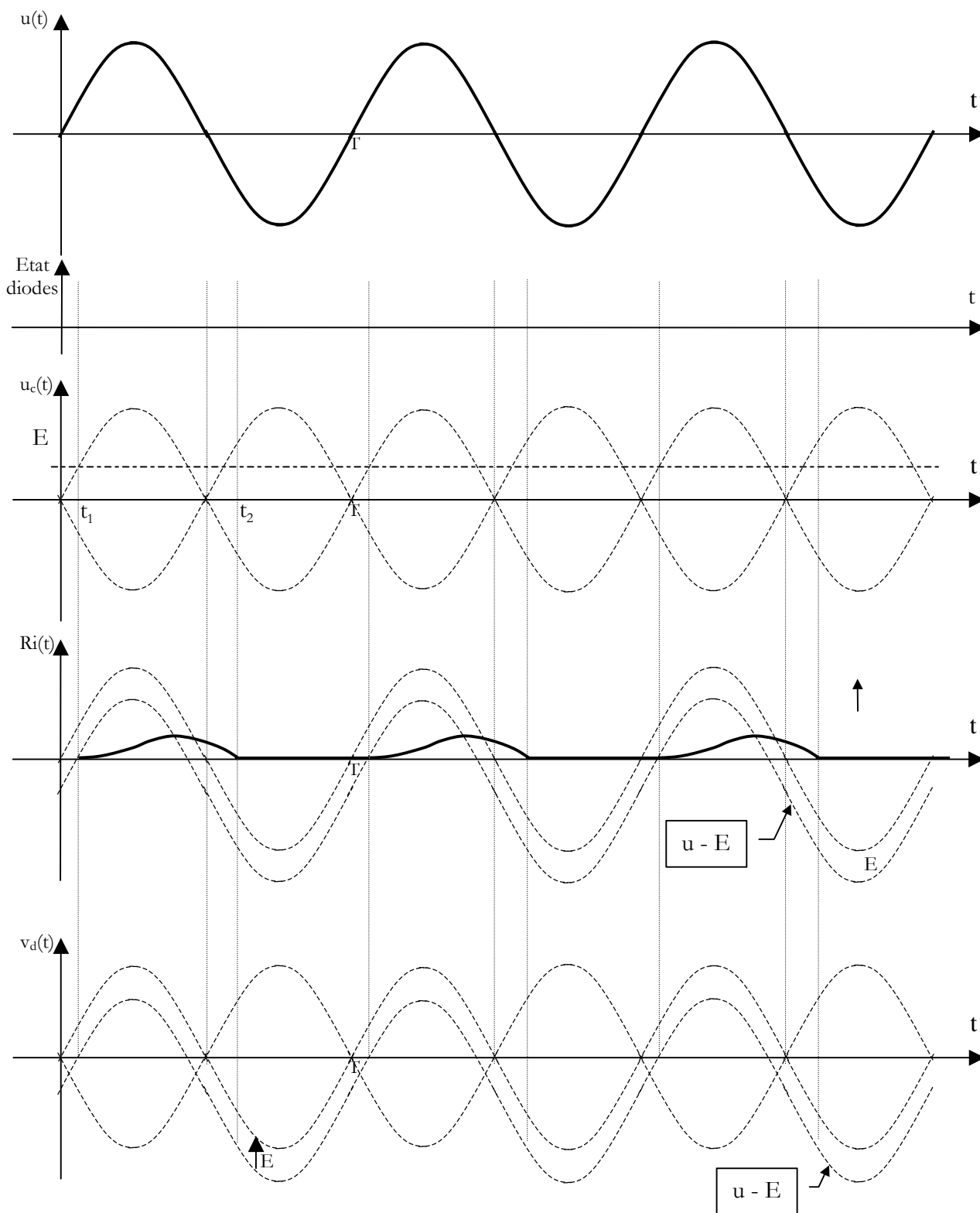
*C'est alors la diode de roue libre qui devient passante.
On a alors $u_c = 0$.*

La diode de roue libre conduit tant que le courant i reste positif.

c) Quand i devient < 0

Dr se bloque

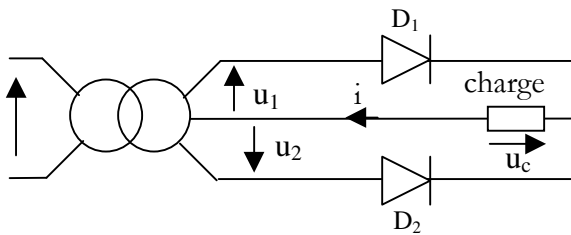
D est bloquée $\Rightarrow u_c = E$ et $v_d = u - E$



II – REDRESSEMENT BOUBLE ALTERNANCE

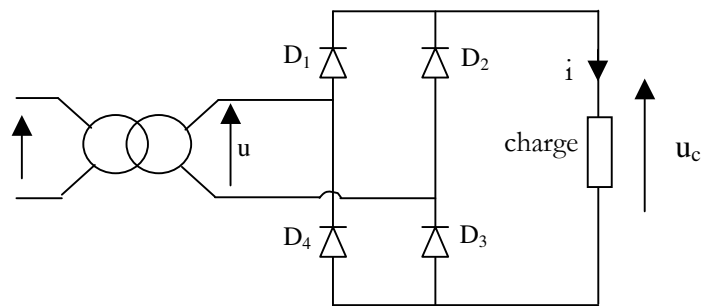
1°/ MONTAGES

Montage P2



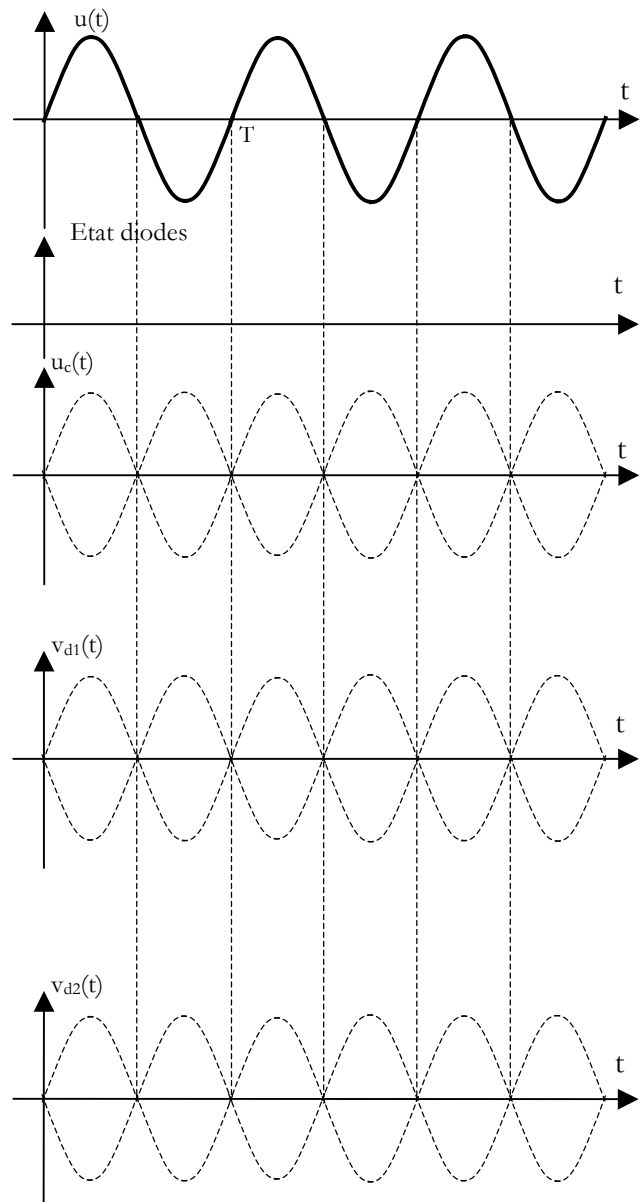
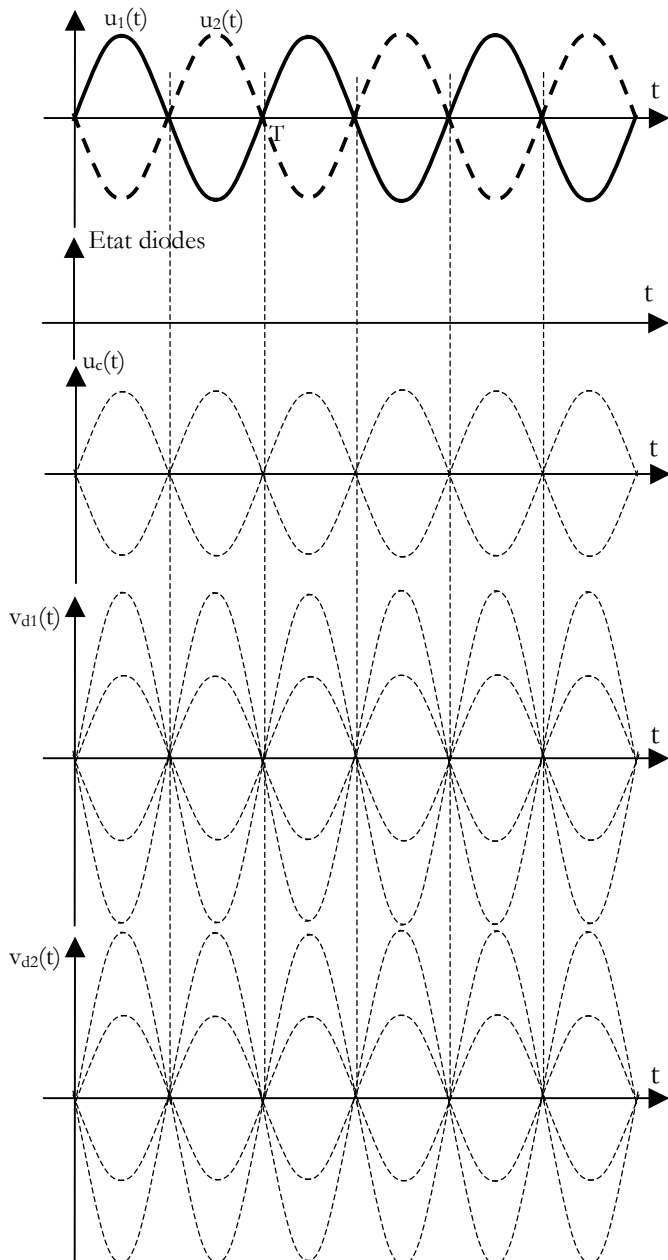
*Nécessite un transformateur à point milieu.
u1 et u2 sont en opposition de phase.*

Montage PD2

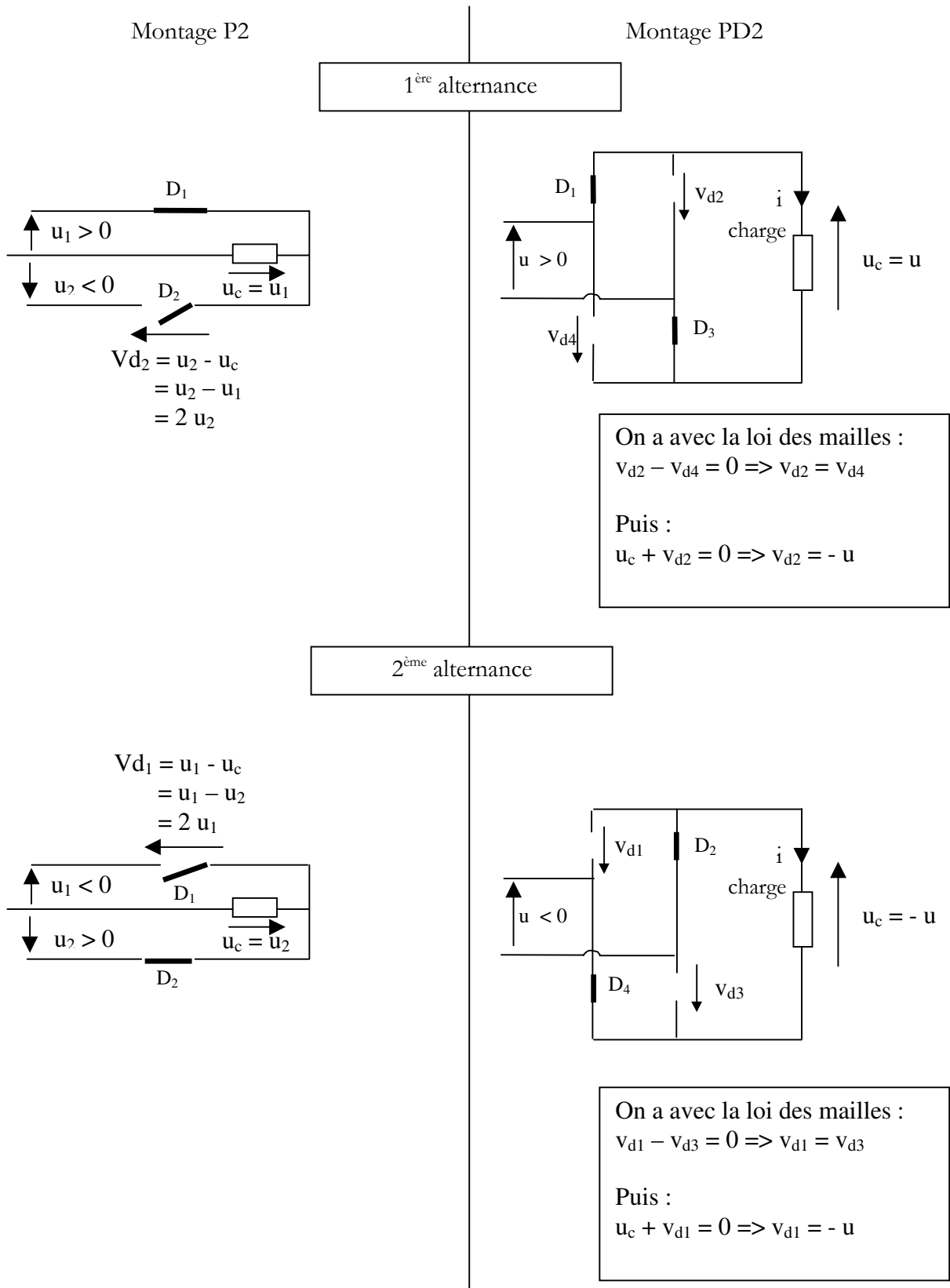


2°/ CHARGE RESISTIVE

a) Chronogrammes



b) Explications



c) Valeurs moyennes

Exprimer la valeur moyenne U_{cmoy} et en déduire I_{moy}

d) Valeurs efficaces

Exprimer la valeur efficace U_{eff} et en déduire I_{eff}

e) Courant circulant dans le transformateur

*Exprimer I_{1eff} et I_{2eff} circulant dans les deux enroulements secondaire du transformateur du montage P2.
Comparer à l'intensité efficace circulant dans le secondaire du transformateur du montage PD2.
Expliquer pourquoi le montage PD2 est meilleur que le montage P2.*

Dans la suite on ne considère que le cas du montage PD2

3°/ CHARGE R, L

Répondre aux questions en se référant au cours sur le redressement simple alternance.

Quelle est l'influence de l'inductance sur la forme d'onde du courant ?

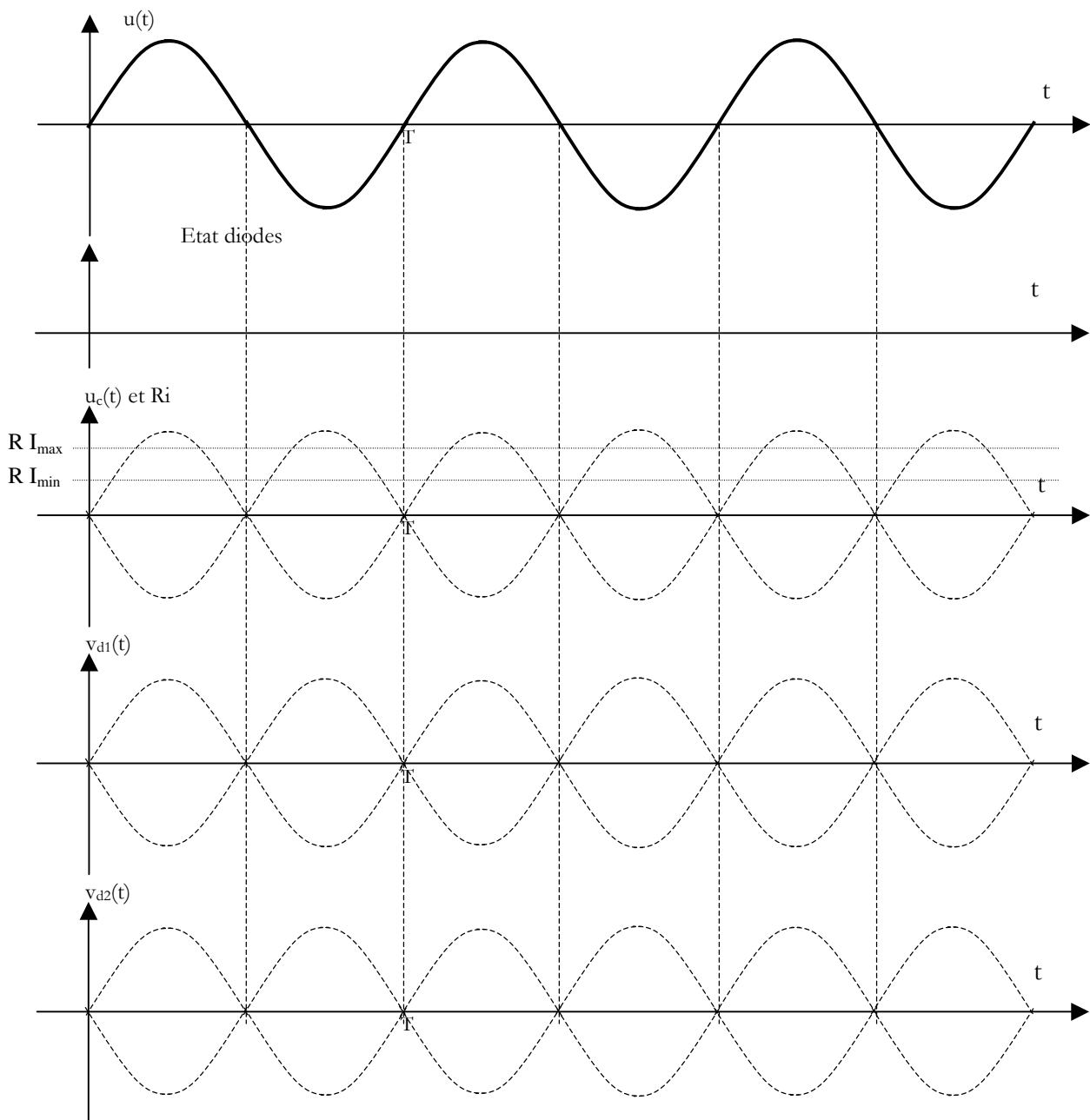
Dans la phase où D1 et D3 sont passantes,

Exprimer u_c en fonction de i

Montrer que tant que $Ri < u$ alors i est croissante et inversement.

Montrer que lorsque D1 et D3 sont passantes, D2 et D4 sont forcément bloquées (exprimer v_{d2} et v_{d4}).

Compléter les chronogrammes ci-dessous.



3°/ CHARGE R, E

Expliquer le fonctionnement du montage

$$u > E \Rightarrow D1 \text{ et } D3$$

$$\Rightarrow \mathcal{UC} =$$

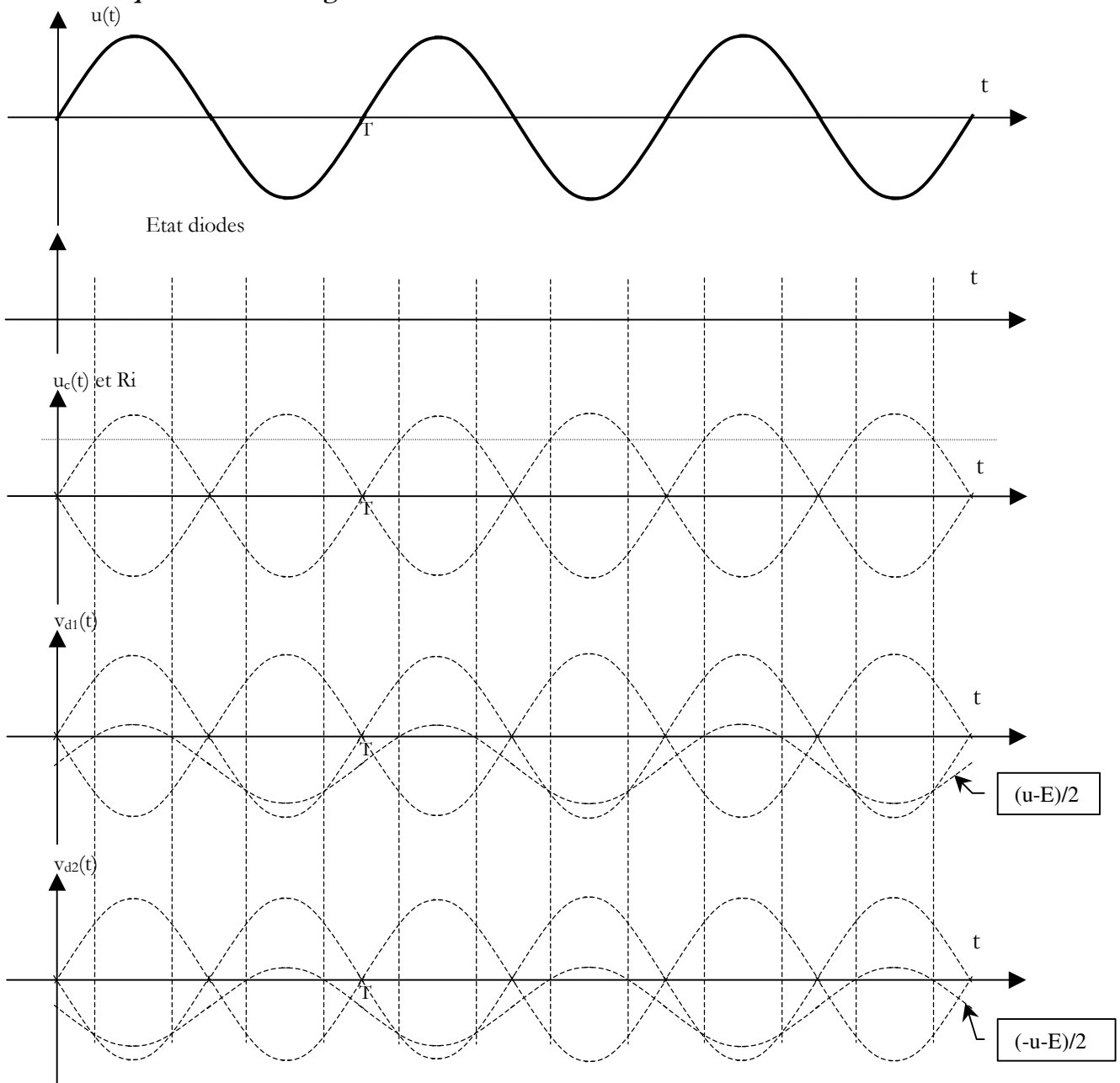
$$\Rightarrow vd1 = vd3 =$$

$$u < E \Rightarrow D1 \text{ et } D3$$

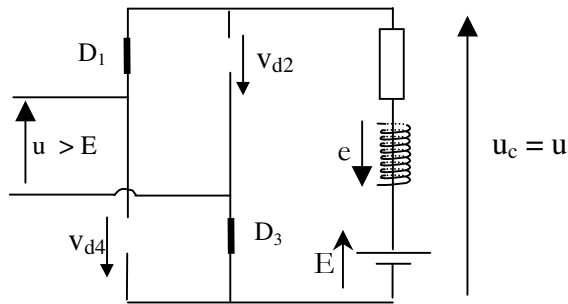
Si $-u < E$: Schéma équivalent

Si $-u > E$: Schéma équivalent

Compléter les chronogrammes :



4°/ CHARGE R, L, E



$u > E$:

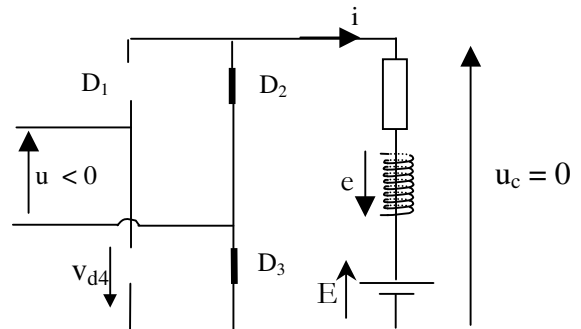
D1 et D3 conduisent

L entraîne l'augmentation de la durée de conduction de D1 et D3 : Elles continuent de conduire alors que u devient $< E$ sous l'action de la fem induite $e > 0$

Quand $u < 0$:

D2 et D3 conduisent et jouent le rôle de diodes de roue libre, jusqu'à ce que le courant i tende à changer de sens.

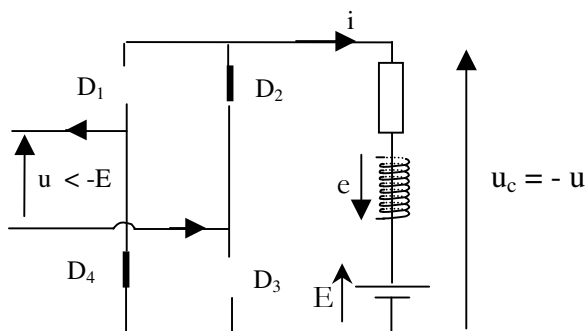
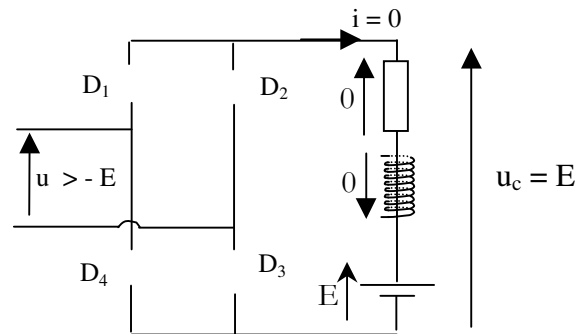
La charge est alors court-circuitée : $u_c = 0$



Quand i tend à être < 0 :

D2 et D3 se bloquent.

$$u_c = E$$



$u < -E \Leftrightarrow -u > E$

D2 et D4 conduisent

L entraîne l'augmentation de la durée de conduction de D2 et D4 : Elles continuent de conduire alors que u devient $< E$ sous l'action de la fem induite $e > 0$

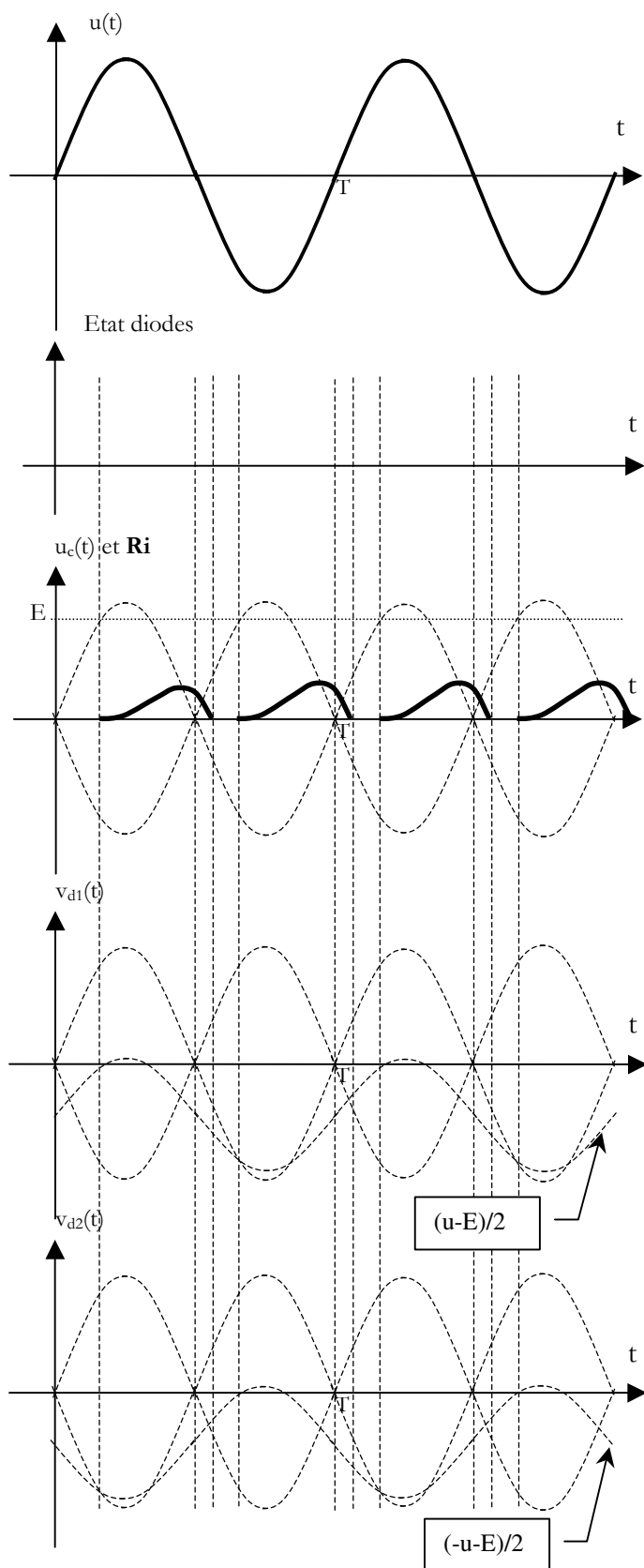
Quand $u_c < 0$:

D1 et D4 conduisent et jouent le rôle de diodes de roue libre, jusqu'à ce que le courant i tende à changer de sens. La charge est alors court-circuitée : $u_c = 0$

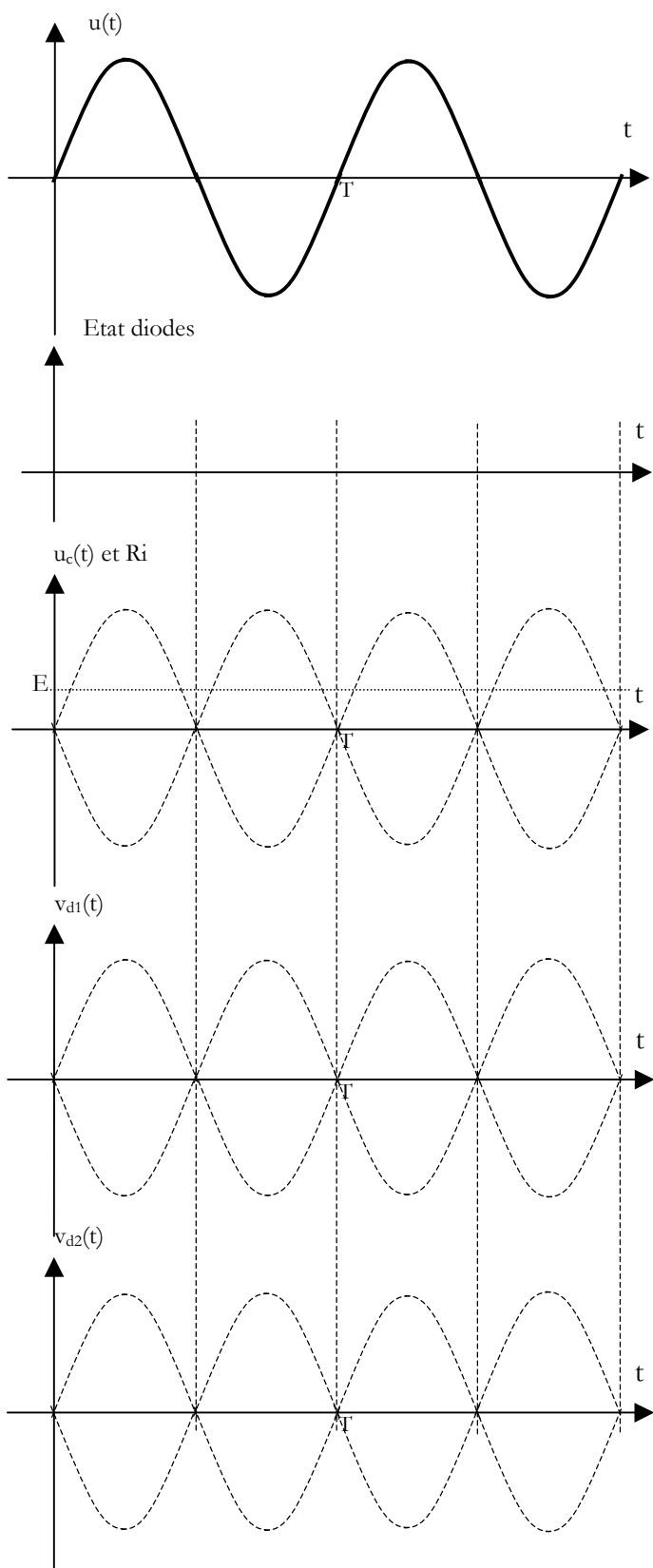
Quand i tend à être < 0 :

D1 et D4 se bloquent $\Rightarrow u_c = E$ il faut attendre $u > E$ pour revenir à la 1^{ère} étape.

a) Conduction discontinue

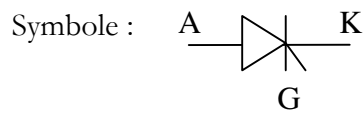
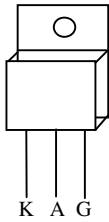


b) Conduction continue



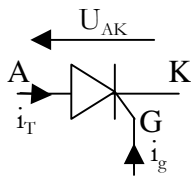
Chapitre 3 - LE THYRISTOR

I – PRESENTATION



II – FONCTIONNEMENT

1°/ AMORCAGE



$$U_{AK} > V_T \text{ (Tension de seuil du thyristor)}$$

ET

$$i_g > I_{gT} \text{ (courant d'amorçage)}$$



Thyristor passant

2°/ BLOCAGE

$$U_{AK} < V_T \text{ (Tension de seuil du thyristor)}$$

OU

$$i_T < I_h \text{ (courant de maintien)}$$



Thyristor bloqué

III – CARACTERISTIQUES

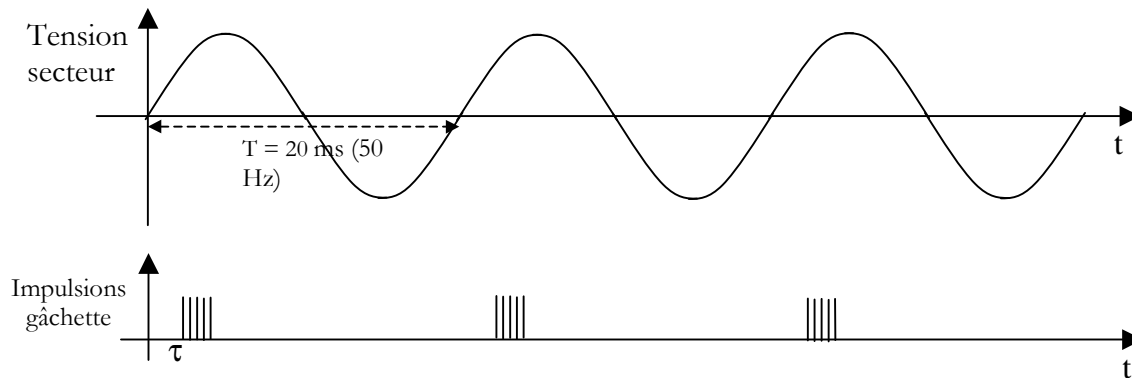
Exemple : Thyristor BTW67 et 69

$I_T = 50 \text{ A (efficace)}$
$I_{T\text{moy}} = 32 \text{ A}$
$I_{g\text{maxi}} = 8 \text{ A}$
$I_{gT} = 8 \text{ mA}$
$I_h = 150 \text{ mA}$
$V_{T\text{max}} = 1,9 \text{ V}$

IV – IMPULSION DE COMMANDE

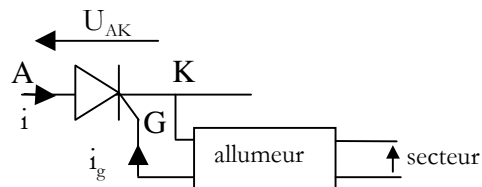
1°/ ALLUMEUR

L'allumeur du thyristor est un montage générant une salve périodique d'impulsions, synchronisées sur le secteur donc toutes les 20 ms, avec une possibilité de réglage du décalage temporel entre le début de la salve et la période de la tension secteur :



On pourrait se contenter d'une impulsion unique. La salve est une garantie pour que le thyristor soit bien rendu passant.

2°/ BRANCHEMENT DE L'ALLUMEUR



L'allumeur est connecté sur le secteur pour permettre la synchronisation, un transformateur permettra d'abaisser la tension.

3°/ EXEMPLE DE CIRCUIT INTERGRE (IC)

TCA 785 : Phase Control IC

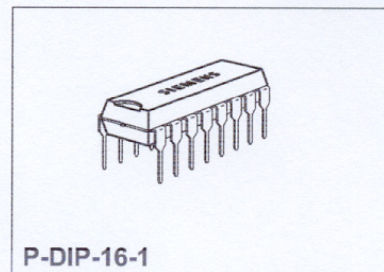
Phase Control IC

TCA 785

Bipolar IC

Features

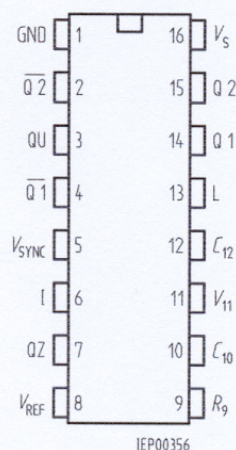
- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range



Type	Ordering Code	Package
TCA 785	Q67000-A2321	P-DIP-16-1

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0 ° and 180 °. Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.



Pin Configuration (top view)

Pin Definitions and Functions

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q2}$	Output 2 inverted
3	$\overline{Q U}$	Output U
4	$\overline{Q2}$	Output 1 inverted
5	V_{SYNC}	Synchronous voltage
6	I	Inhibit
7	$\overline{Q Z}$	Output Z
8	V_{REF}	Stabilized voltage
9	R_9	Ramp resistance
10	C_{10}	Ramp capacitance
11	V_{11}	Control voltage
12	C_{12}	Pulse extension
13	L	Long pulse
14	Q 1	Output 1
15	Q 2	Output 2
16	V_s	Supply voltage

Semiconductor Group

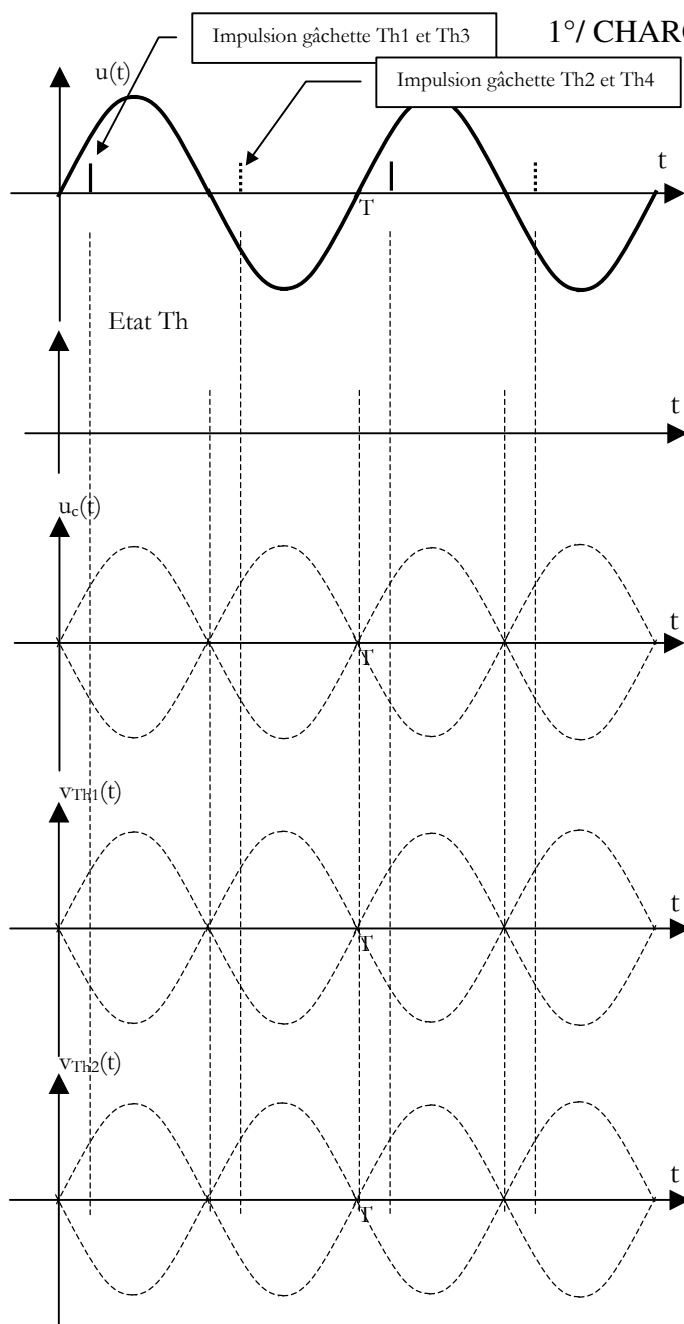
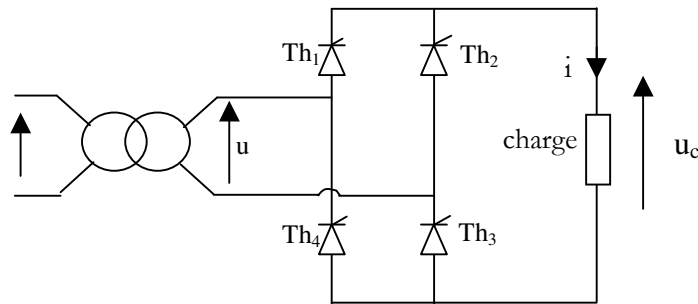
1

09.94

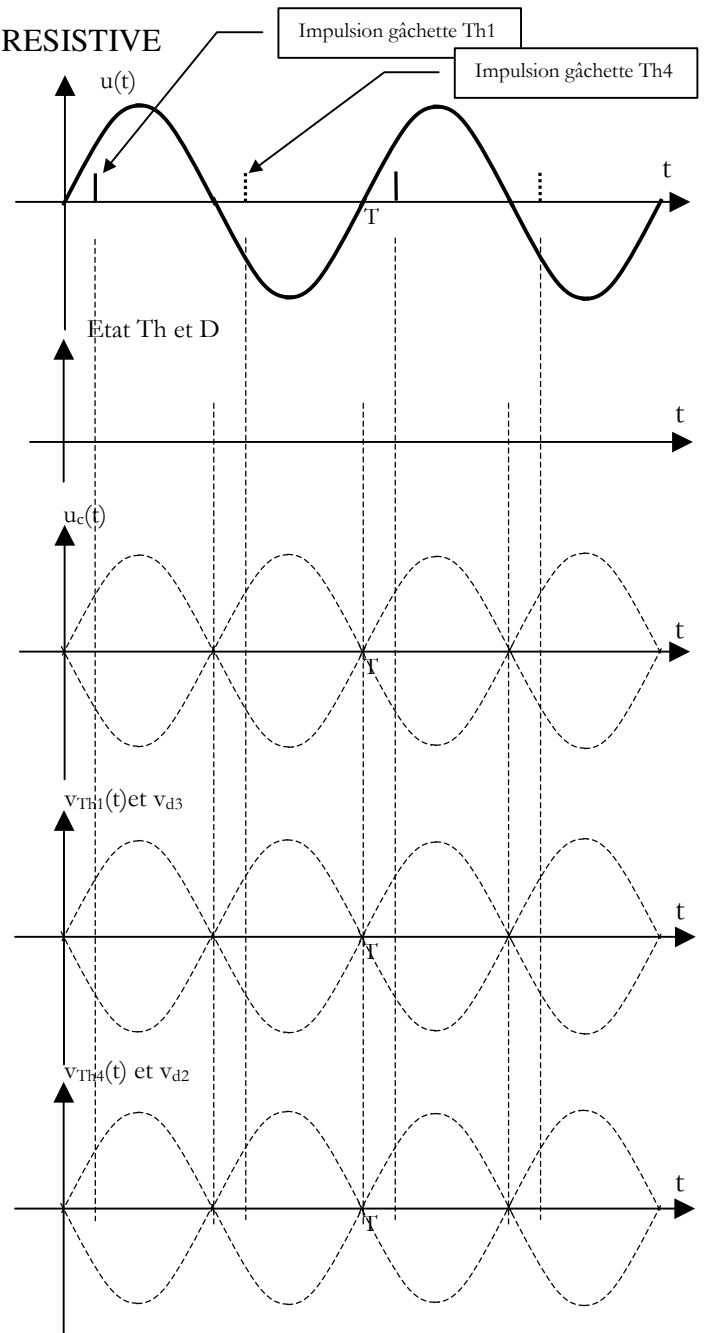
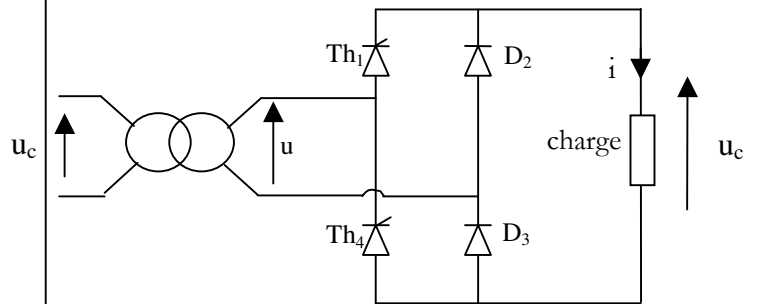


Chapitre 4 - REDRESSEMENT COMMANDE

I – PONT TOUT THYRISTORS



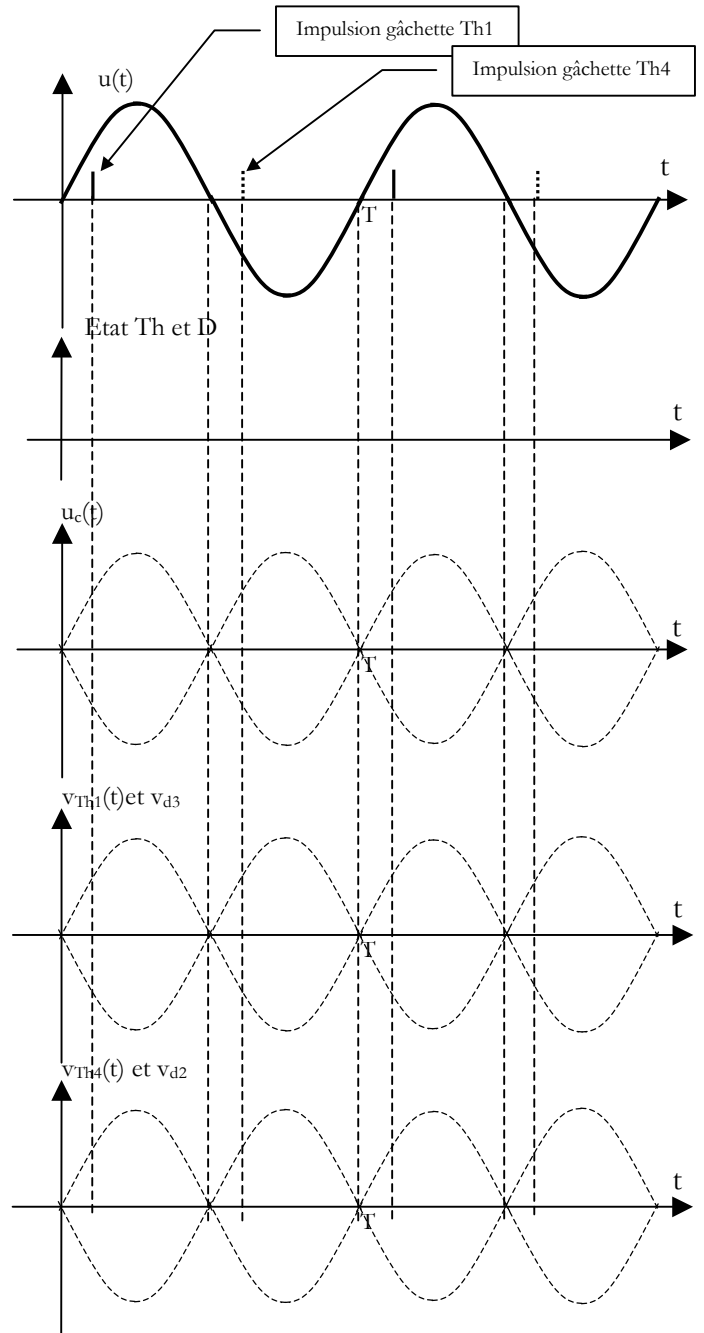
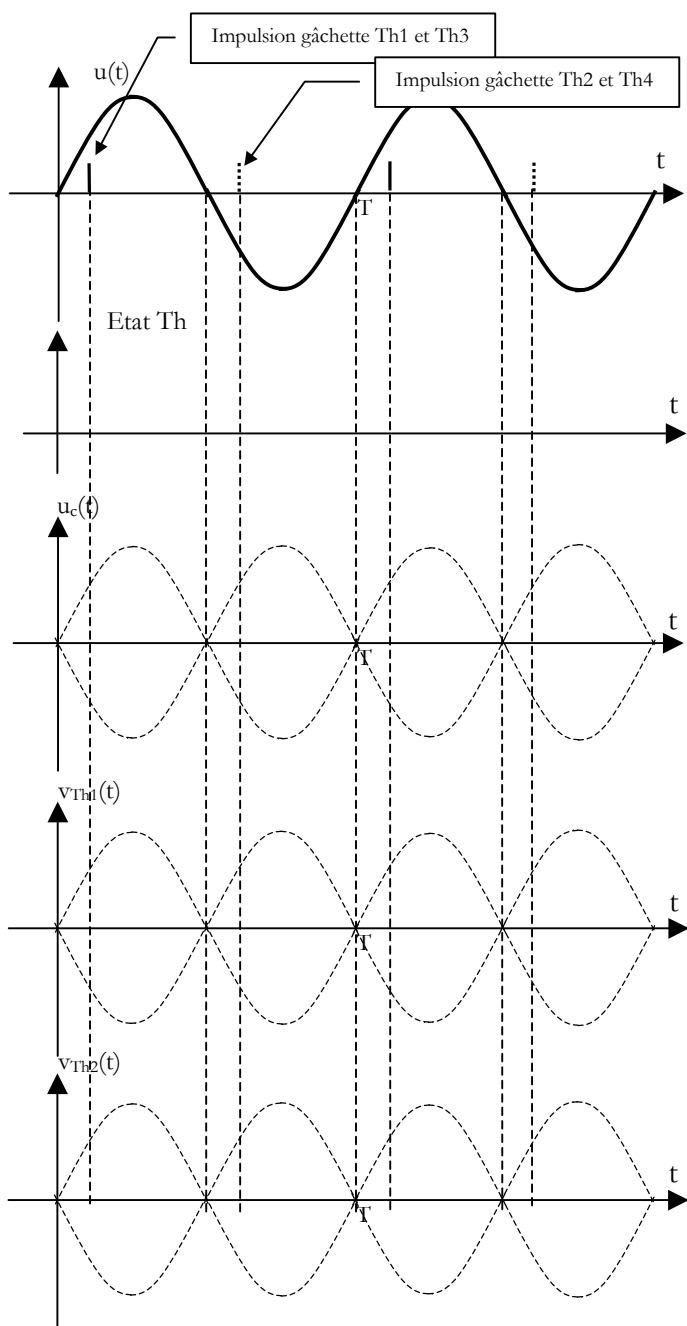
II – PONT MIXTE



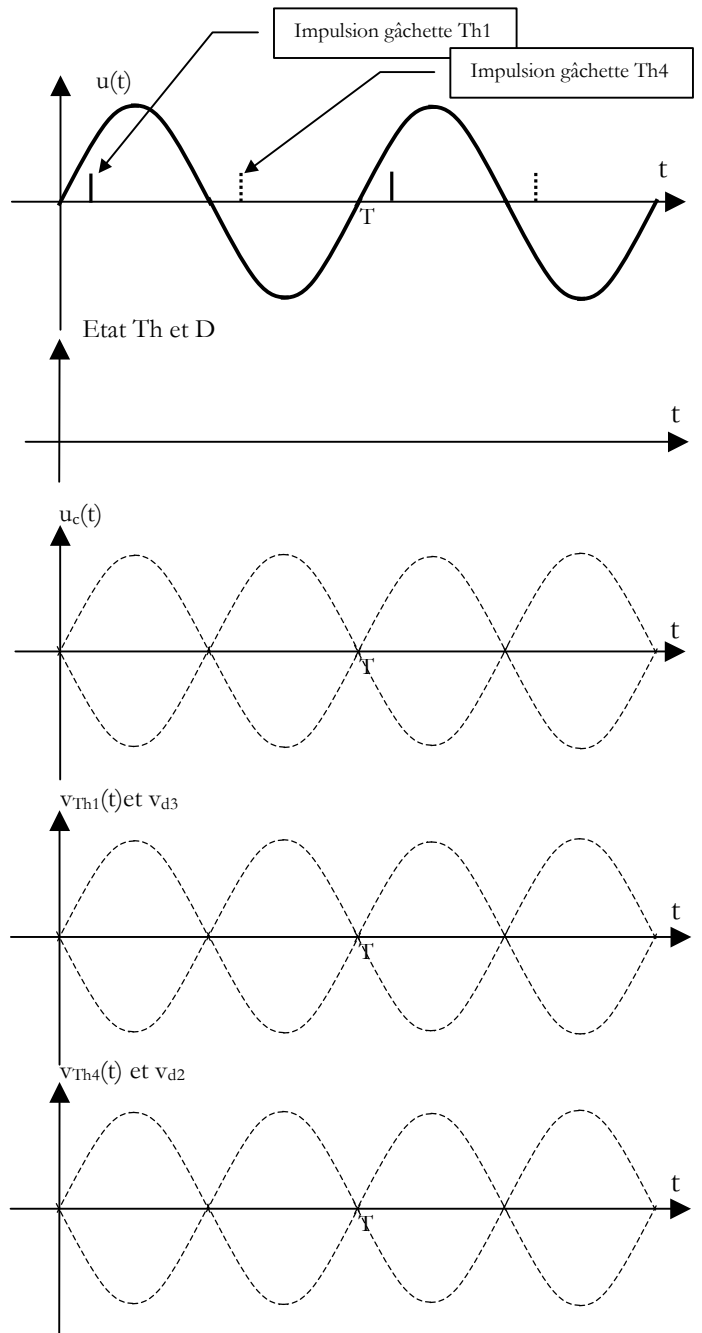
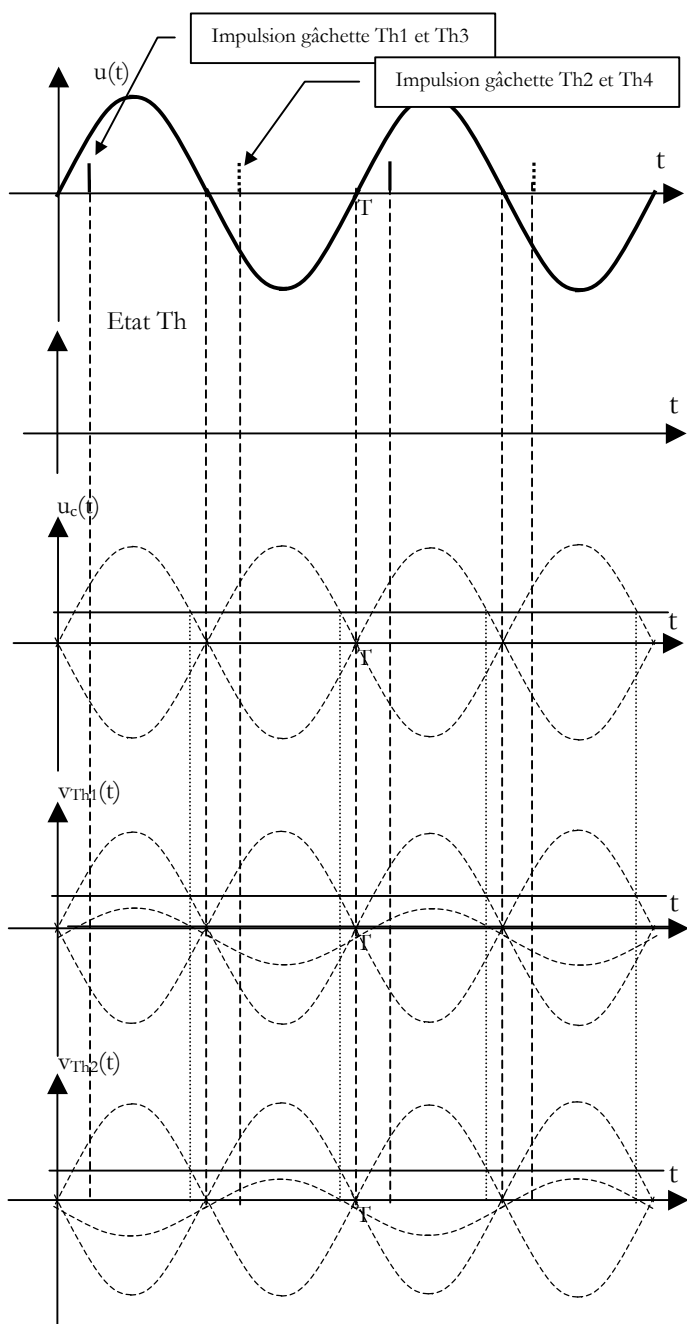
*Dessiner les schémas équivalents des différentes phases.
En déduire les expressions de u_c , v_{Tb1} et v_{Tb2} .*

Etablir l'expression de la valeur moyenne de u_c

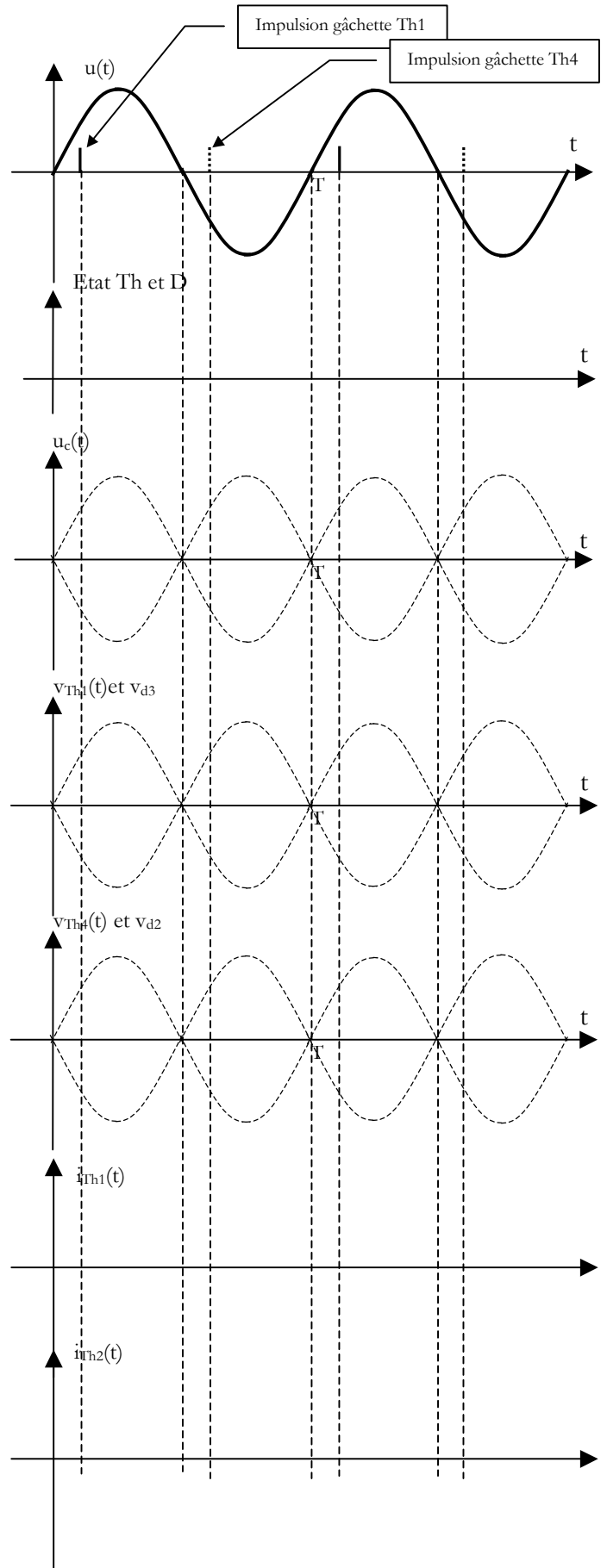
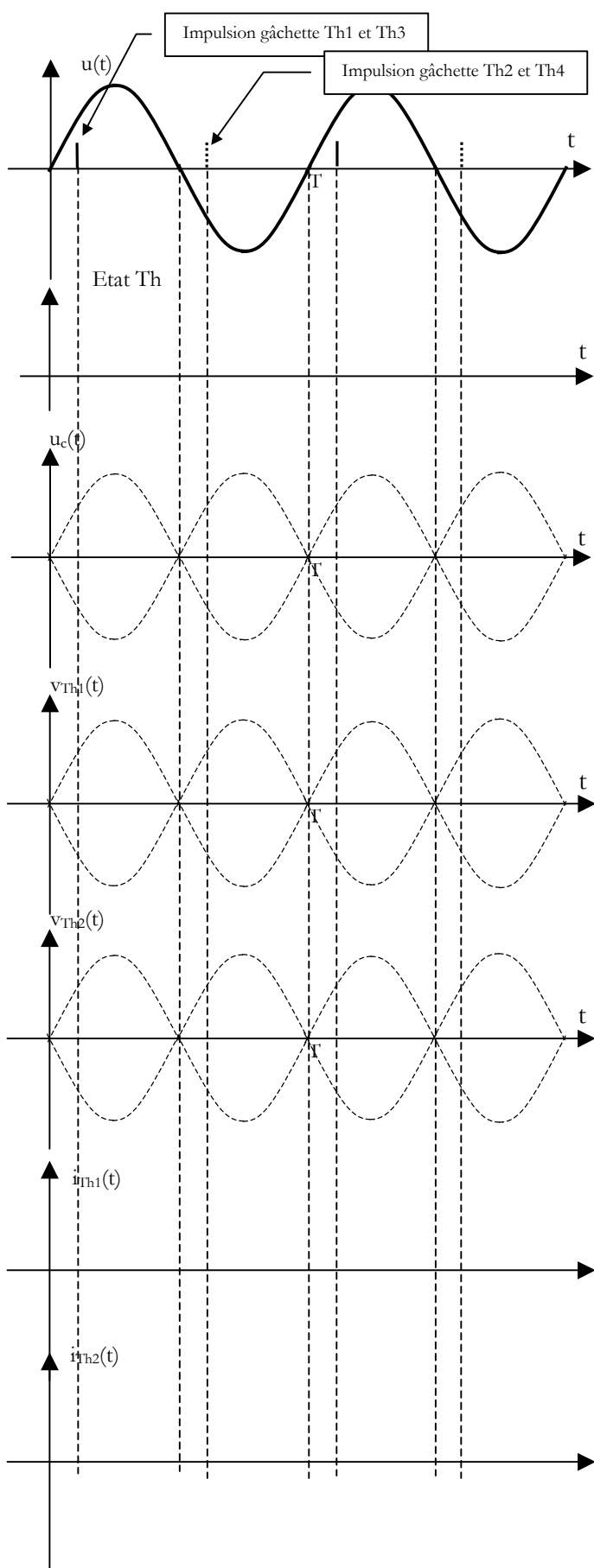
2°/ CHARGE R, L



3°/ CHARGE R, E



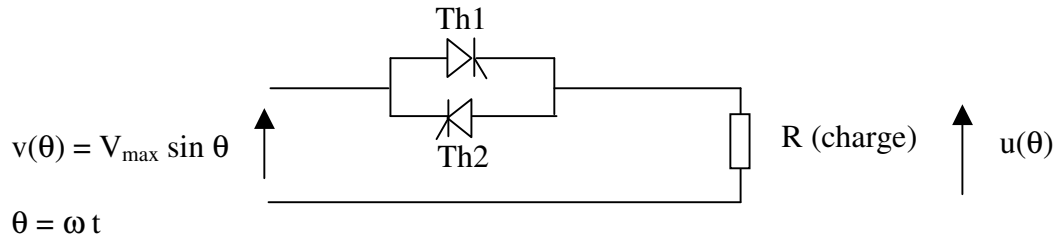
4°/ CHARGE R, L, E



Chapitre 5 - GRADATEUR

I – CHARGE RESISTIVE

On considère le montage suivant :



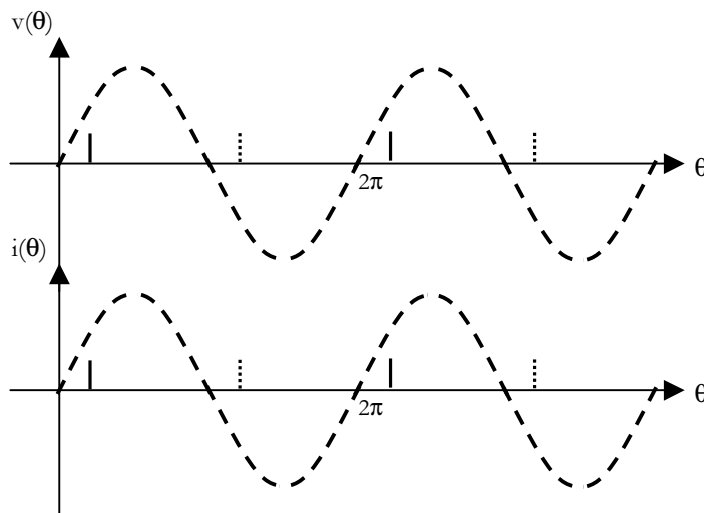
Th1 est amorcé sur l'alternance positive de v
Th2 est amorcé sur l'alternance négative de v .

L'angle d'amorçage, appelé α pour Th1, est tel que α est compris entre 0 et π .
L'angle d'amorçage de Th2 est $\pi + \alpha$.

1°/ Fonctionnement

- Exprimer u quand Th1 passant.
- Pour quelle valeur de θ , Th1 se bloque t-il ?
- Exprimer u quand Th2 est passant.
- Pour quelle valeur de θ , Th2 se bloque t-il ?

2°/ Représenter les chronogrammes superposés de v , u et i



3°/ Comparer les formes d'ondes de v , u et i

4°/ Quelle est la valeur moyenne de u et de i

5°/ Exprimer par calcul, la valeur efficace de u . Que devient-elle quand $\alpha=0$ et $\alpha = \pi$?

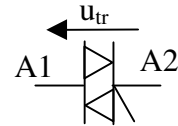
6°/ En déduire le rôle du gradateur

7°/ Exprimer la puissance active consommée par R . Que devient-elle quand $\alpha=0$, $\alpha = \pi/2$ et $\alpha=\pi$?

II – MONTAGE AVEC TRIAC

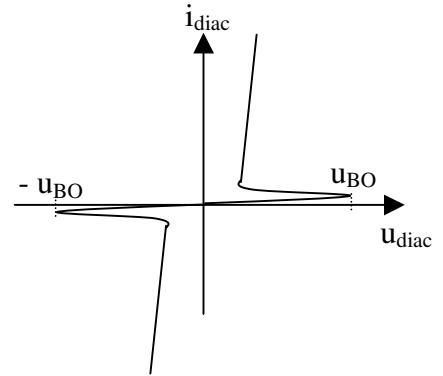
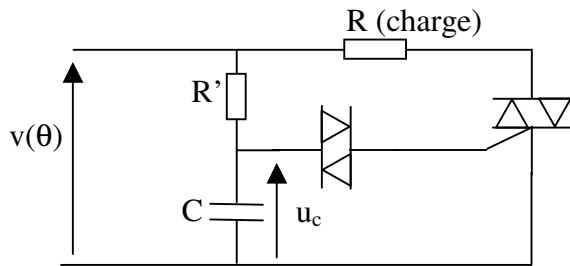
1°/ LE TRIAC

Le triac est un composant fonctionnant comme 2 thyristors en parallèle.



Une impulsion de gâchette positive ou négative amorce le triac quel que soit le signe de la tension à ses bornes.

2°/ CIRCUIT COMPLET



Le circuit d'amorçage est constitué du circuit R'C et d'un diac.

Le diac est un composant qui s'amorce spontanément quand la tension à ses bornes dépasse en valeur absolue une certaine valeur V_{BO} (Break Over). (Voir caractéristique ci-dessus)

Son amorçage est donc possible dans les deux sens.

3°/ FONCTIONNEMENT

1^{ère} phase : $0 < \theta < \pi \Leftrightarrow v(\theta) > 0$

- Comment évolue u_c ?
- Que se passe-t-il quand $u_c > u_{BO}$?
- Que devient l'état du triac ?
- Comment évolue alors u_c ?
- Pour quelle valeur de θ le triac se bloque-t-il ?

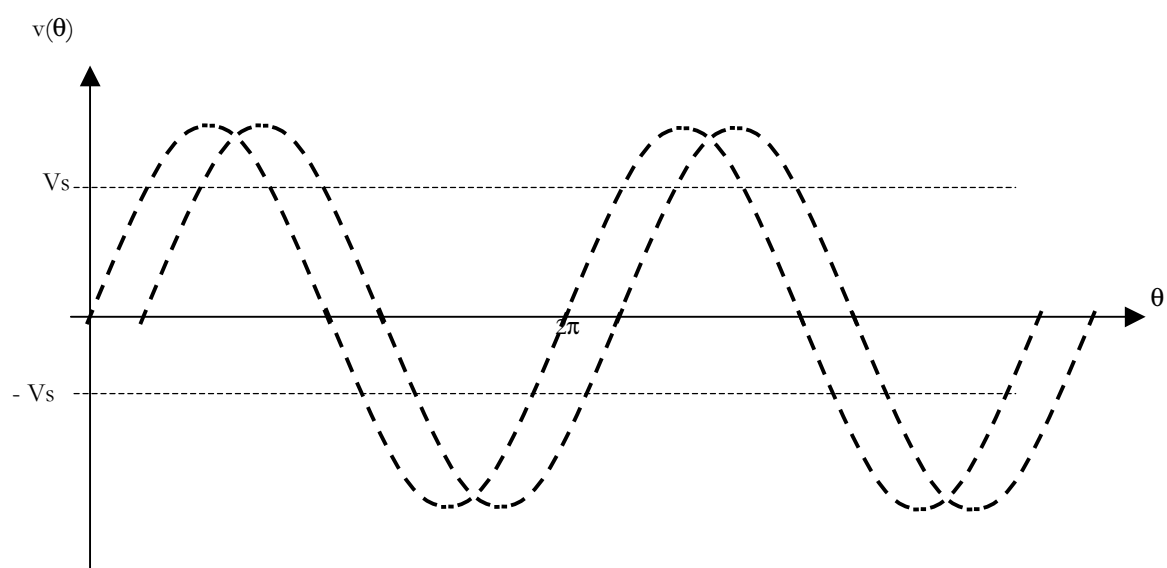
2^{ème} phase : $\pi < \theta < 2\pi \Leftrightarrow v(\theta) < 0$

- Comment évolue u_c ?
- Que se passe-t-il quand $u_c < -u_{BO}$?
- Que devient l'état du triac ?
- Comment évolue alors u_c ?
- Pour quelle valeur de θ le triac se bloque-t-il ?

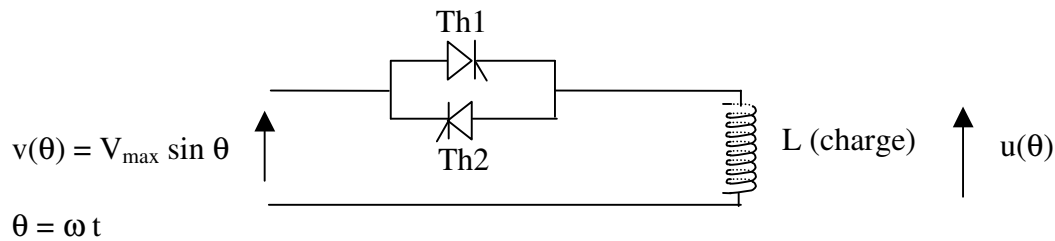
Par quel procédé peut-on régler l'angle d'amorçage ?

4°/ APPLICATIONS

Citer des applications de ce montage.



III – CHARGE INDUCTIVE



1°/ Exprimer $i(\theta)$ quand Th1 est amorcé en fonction de $V_{\max}$ et L .

2°/ Justifier que $i=0$ quand $\theta = \alpha$, c'est à dire quand le thyristor 1 vient juste de s'amorcer. En déduire la constante d'intégration. En déduire l'expression de $i(\theta)$.

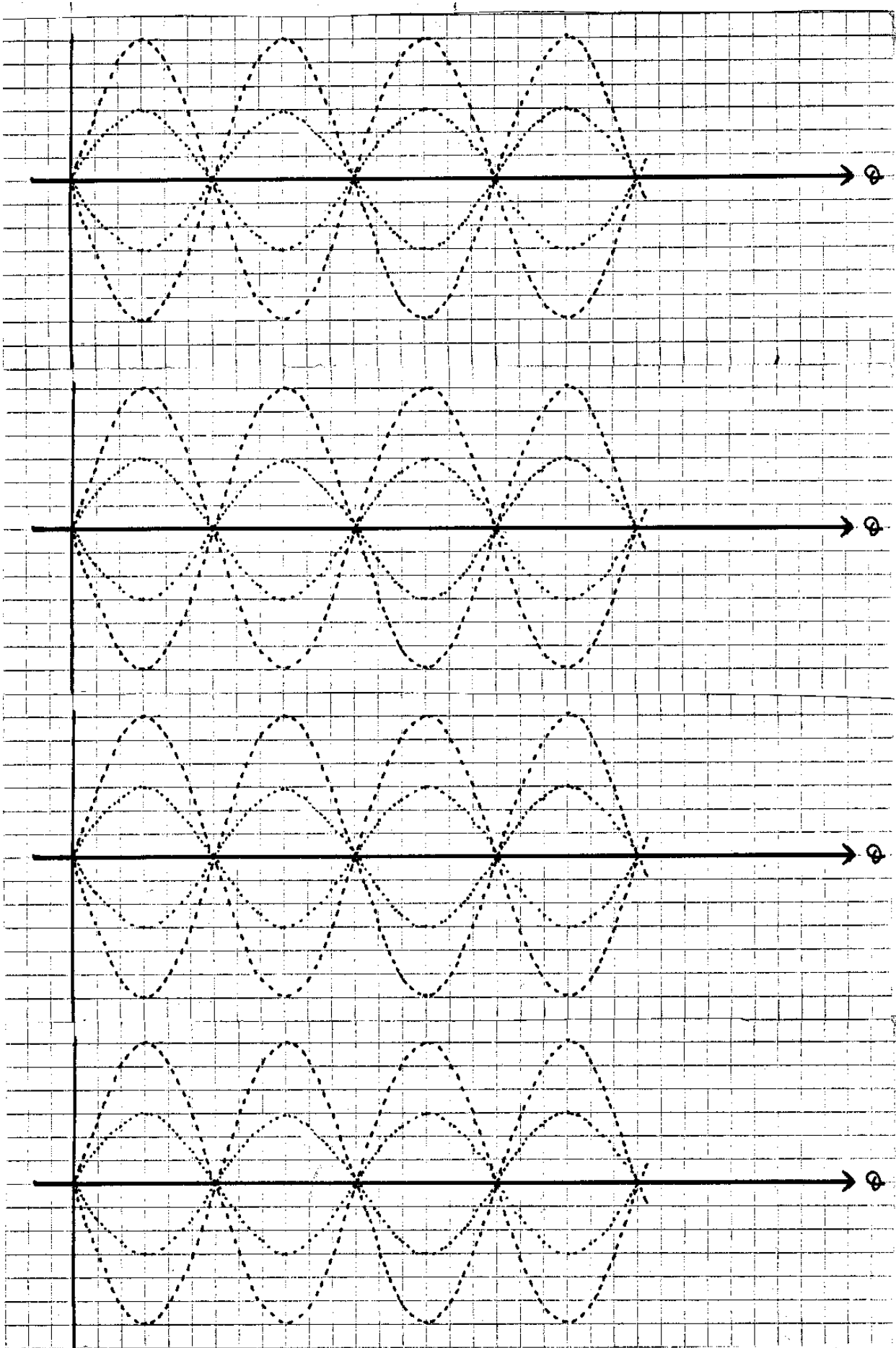
3°/ Pour $0 < \alpha < \pi/2$

- Représenter graphiquement sur le document annexe $v(\theta)$, $-V_{\max} \cos \theta / (L\omega)$ et $i(\theta)$.
- Le courant $i(\theta)$ est-il nul quand $\theta = \pi + \alpha$?
- Le thyristor 2 peut-il alors être amorcé ?
- En déduire une contrainte sur α

Pour $\pi/2 < \alpha < \pi$

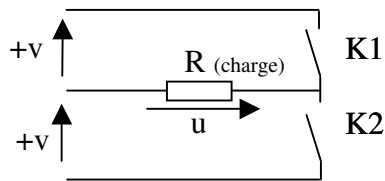
- Représenter graphiquement sur le document annexe $v(\theta)$, $-V_{\max} \cos \theta / (L\omega)$ et $i(\theta)$.
- Le courant $i(\theta)$ est-il nul quand $\theta = \pi + \alpha$?
- Le thyristor 2 peut-il alors être amorcé ?
- Préciser la phase de conduction de chaque thyristor sur le chronogramme.

Comment évolue l'amplitude de i quand α varie entre $\pi/2$ et π .
Quelles sont les valeurs extrêmes.



Chapitre 6 - ONDULEUR

I – MONTAGE A DEUX INTERRUPTEURS SUR CHARGE RESISTIVE

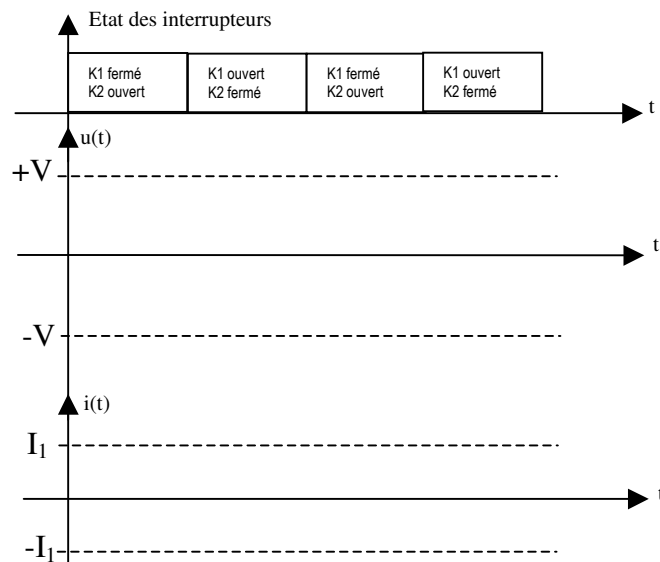


Ce montage nécessite une alimentation symétrique à point milieu. (alim double)

1°/ COMMANDE ADJACENTE (SYMETRIQUE)

Les deux interrupteurs sont alternativement fermés et ouverts sans temps mort

- $K1$ fermé et $K2$ ouvert, exprimer u et i
- $K2$ fermé et $K1$ ouvert, exprimer u et i
- Représenter le chronogramme de u et i ci-dessous

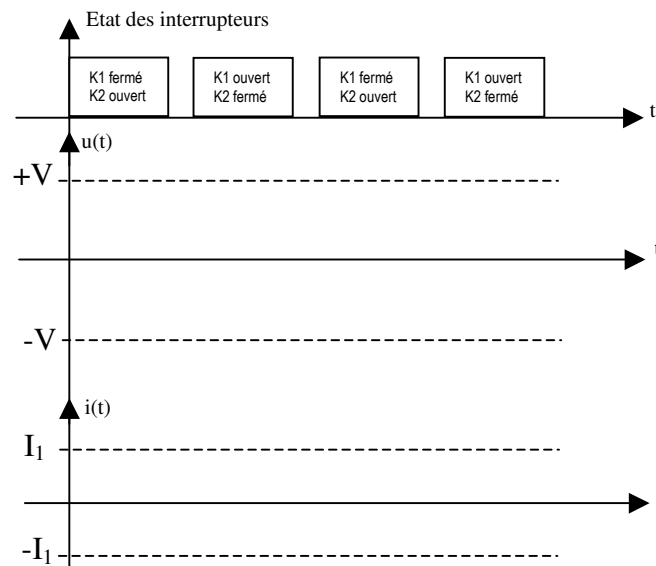


2°/ COMMANDE DECALEE

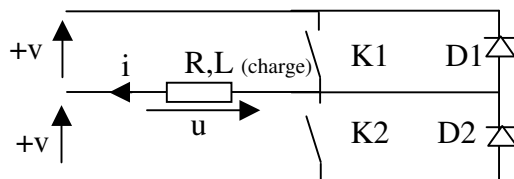
Les deux interrupteurs sont alternativement fermés et ouverts avec temps mort

- $K1$ fermé et $K2$ ouvert, exprimer u et i
- $K1$ et $K2$ ouverts, exprimer u et i
- $K2$ fermé et $K1$ ouvert, exprimer u et i

Représenter le chronogramme de u et i ci-dessous



II – MONTAGE A DEUX INTERRUPTEURS SUR CHARGE INDUCTIVE



1°/ COMMANDE DECALEE

Les deux interrupteurs sont alternativement fermés et ouverts avec temps mort, K2 ne devient passant qu'après annulation du courant i .

- K1 fermé et K2 ouvert, exprimer u et i

- K1 et K2 ouverts, à travers quel circuit, le courant peut-il continuer à circuler en diminuant ?

Quel est l'état de D2, en déduire u .
Exprimer i

A quel moment la diode D2 se bloque t-elle ?

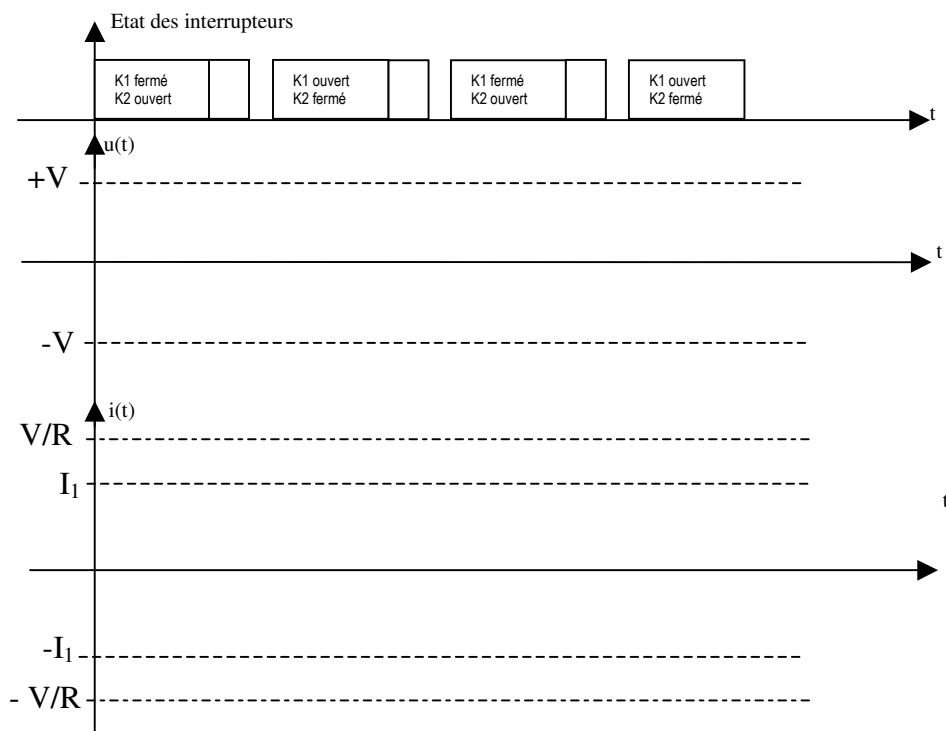
- K2 fermé et K1 ouvert, exprimer u , comment varie i ?

- K1 et K2 ouverts, à travers quel circuit, le courant peut-il continuer à circuler en augmentant ?

Quel est l'état de D1, en déduire u .

Comment varie i

Représenter le chronogramme de u et i ci-dessous



2°/ COMMANDE ADJACENTE

Les deux interrupteurs sont alternativement fermés et ouverts sans temps mort

- K1 fermé et K2 ouvert, exprimer u et i
- K1 ouvert, à travers quel circuit, le courant peut-il continuer à circuler en diminuant ?
K2 est-il en état de conduire (Cf thyristor) ?

Quel est l'état de D2, en déduire u .
Exprimer i

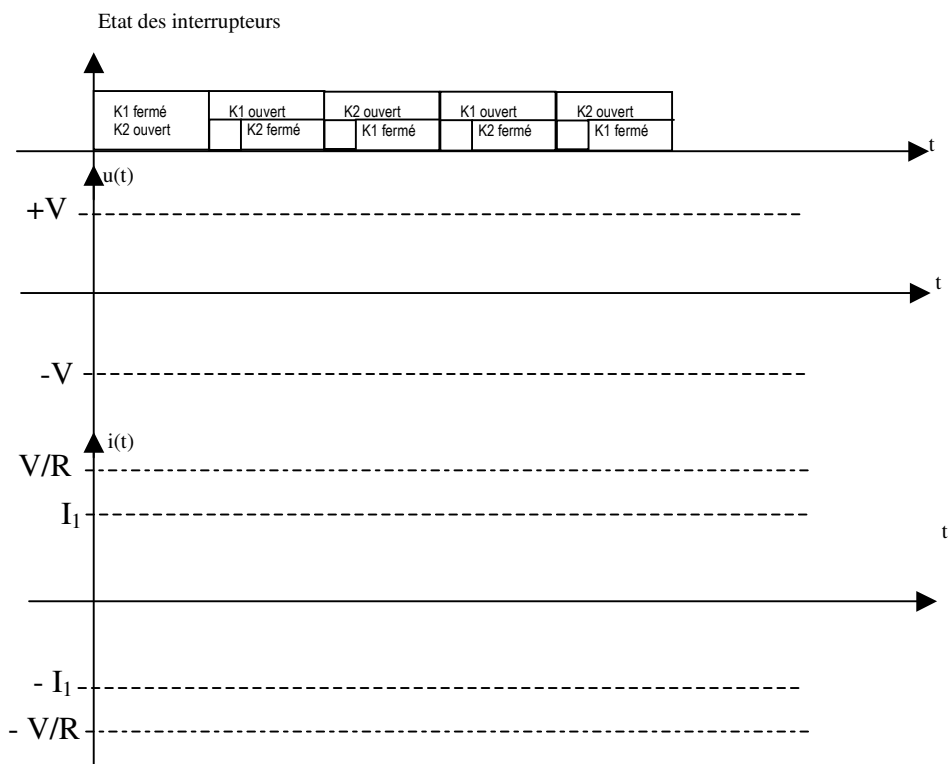
A quel moment la diode D2 se bloque t-elle ?

- K2 fermé et K1 ouvert, exprimer u , comment varie i ?
- K2 ouvert, à travers quel circuit, le courant peut-il continuer à circuler en augmentant ?
K1 est-il en état de conduire ?

Quel est l'état de D1, en déduire u .

Comment varie i ?

Représenter le chronogramme de u et i ci-dessous



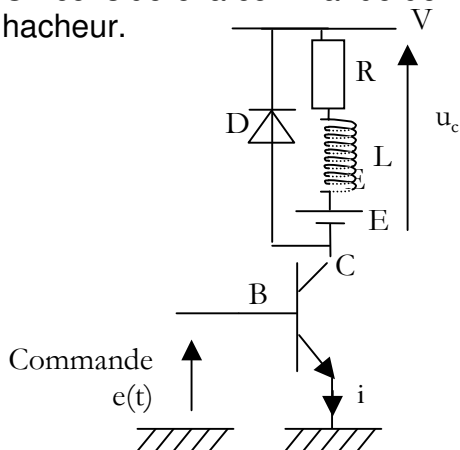
EXAMEN PARTIEL D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE n ° 1

Durée 30 min

Veuillez soigner la présentation. Documents interdits. Sortie interdite.

Exercice 1 –

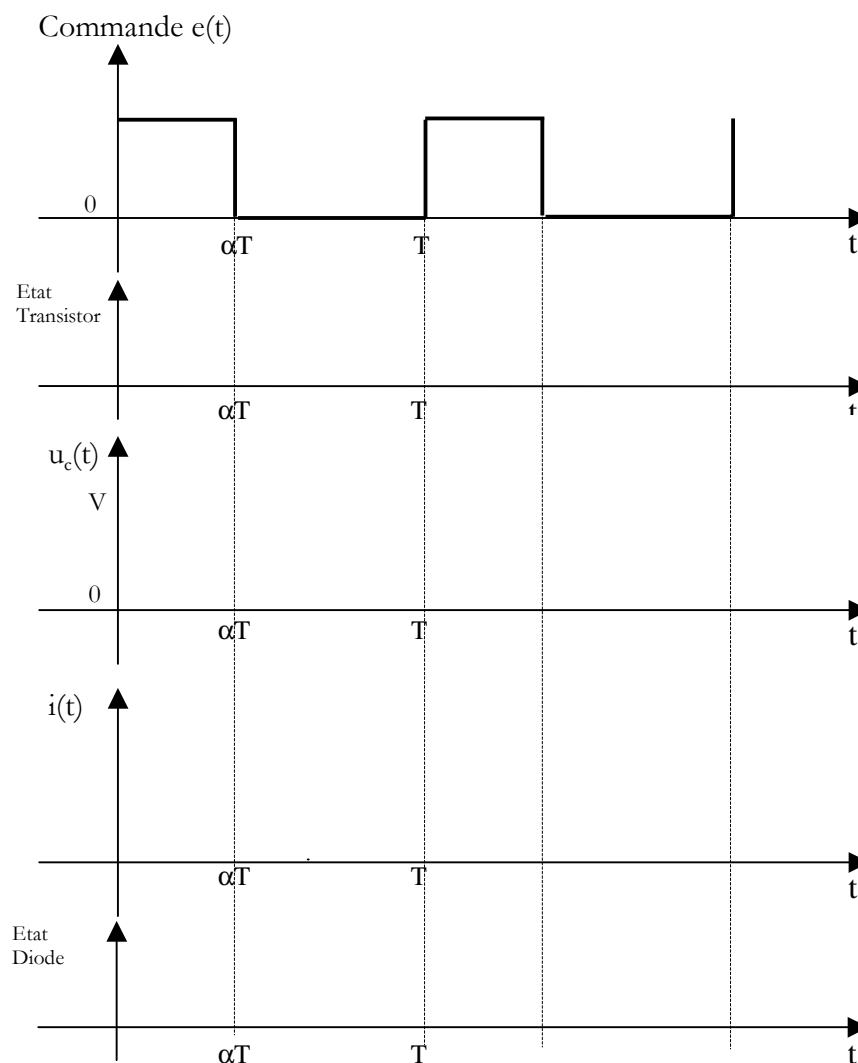
On considère la commande de vitesse de rotation d'un moteur à courant continu par hacheur.



Le transistor est supposé parfait et fonctionne en commutation. La diode D est parfaite.

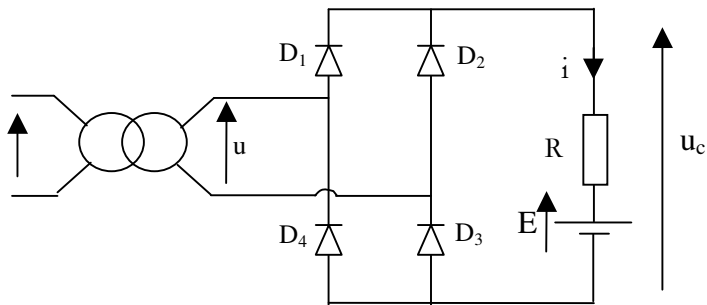
1 % Remplir les chronogrammes ci-dessous. On suppose l'inductance L telle que le courant i est continu.

2 % Exprimer la valeur moyenne de la tension u_c (justifier).

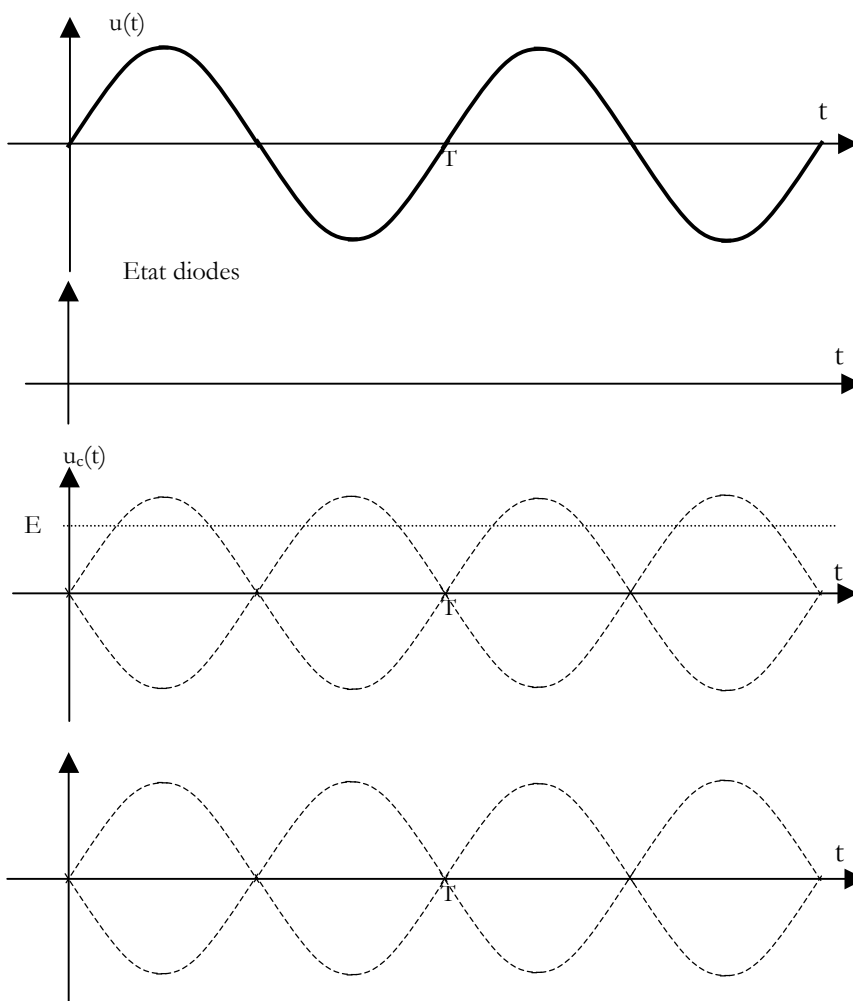


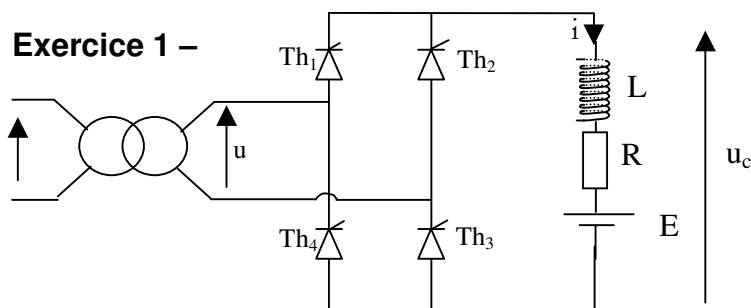
Exercice 2 –

On considère le chargeur de batterie ci-dessous :



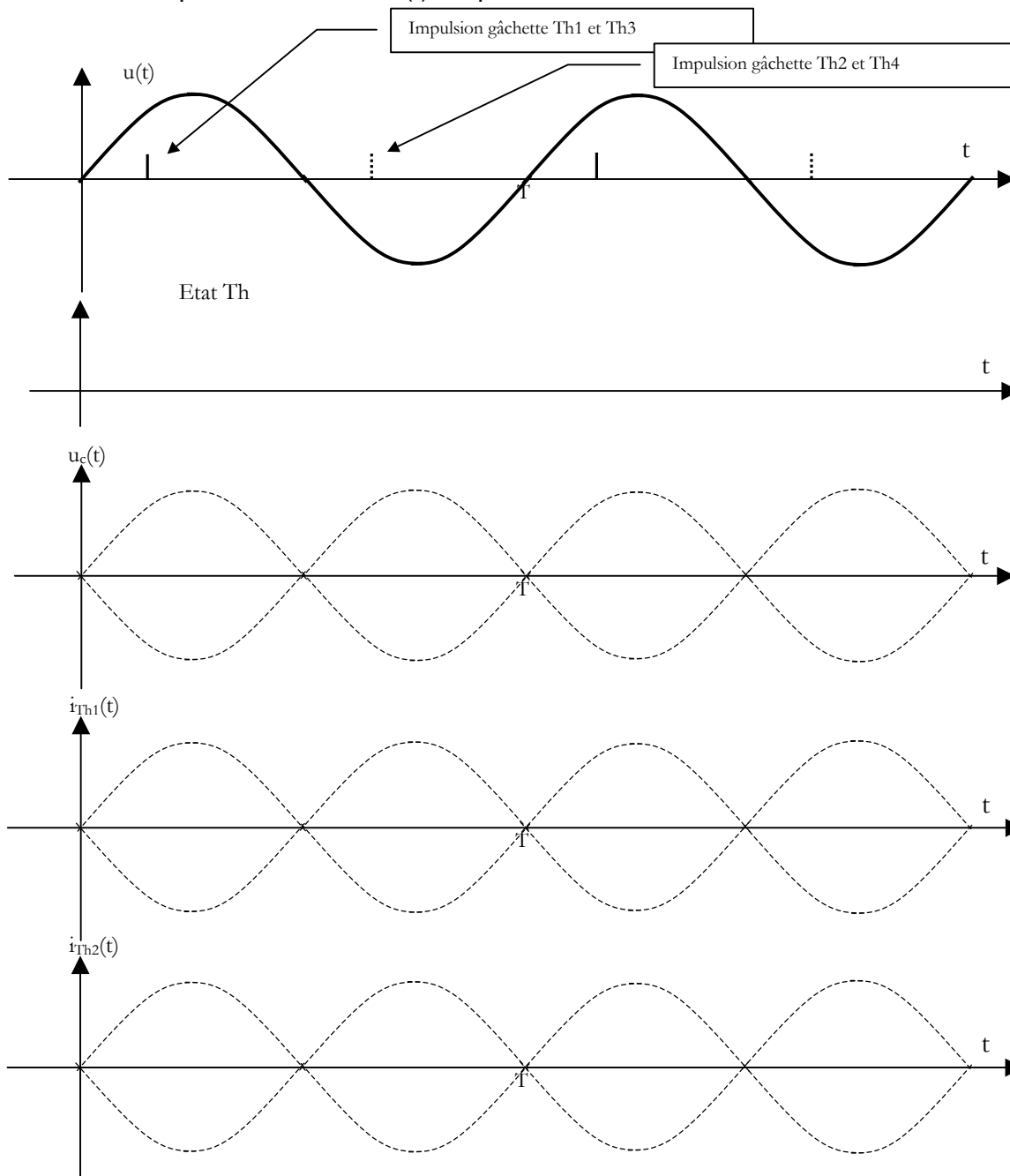
Remplir les chronogrammes ci-dessous



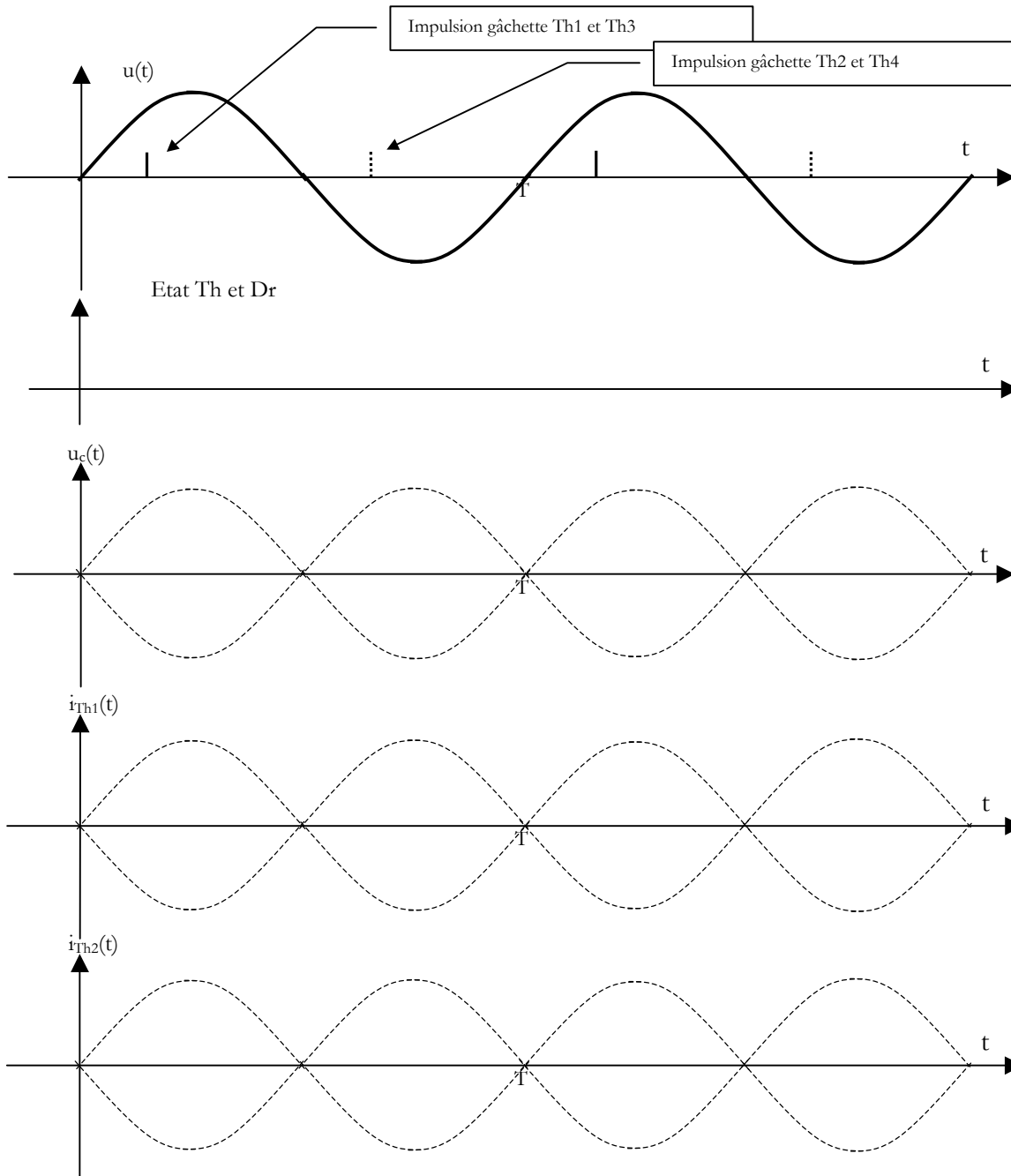
Exercice 1 –

On considère le montage ci-contre, pour lequel la charge est constitué d'une résistance R , d'une inductance L **très grande**, et d'une tension E .

1% Compléter les chronogrammes ci-dessous, sachant que L est telle que la conduction est ininterrompue et le courant $i(t) = I$ parfaitement lissé et donc continu.



2% On place une diode de roue libre en parallèle sur la charge R,L,E. Dessiner son sens de branchement sur le schéma et redessiner les chronogrammes ci-dessous.

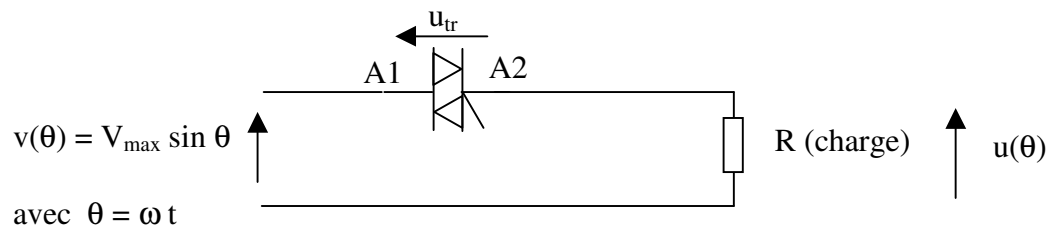


3% Si on utilise un pont mixte (Th2 et Th3 remplacés par des diodes), la diode de roue libre est-elle encore utile ? (justifier rapidement)

4% Donner la relation reliant $u_c(t)$ et i pour la charge R,L,E.

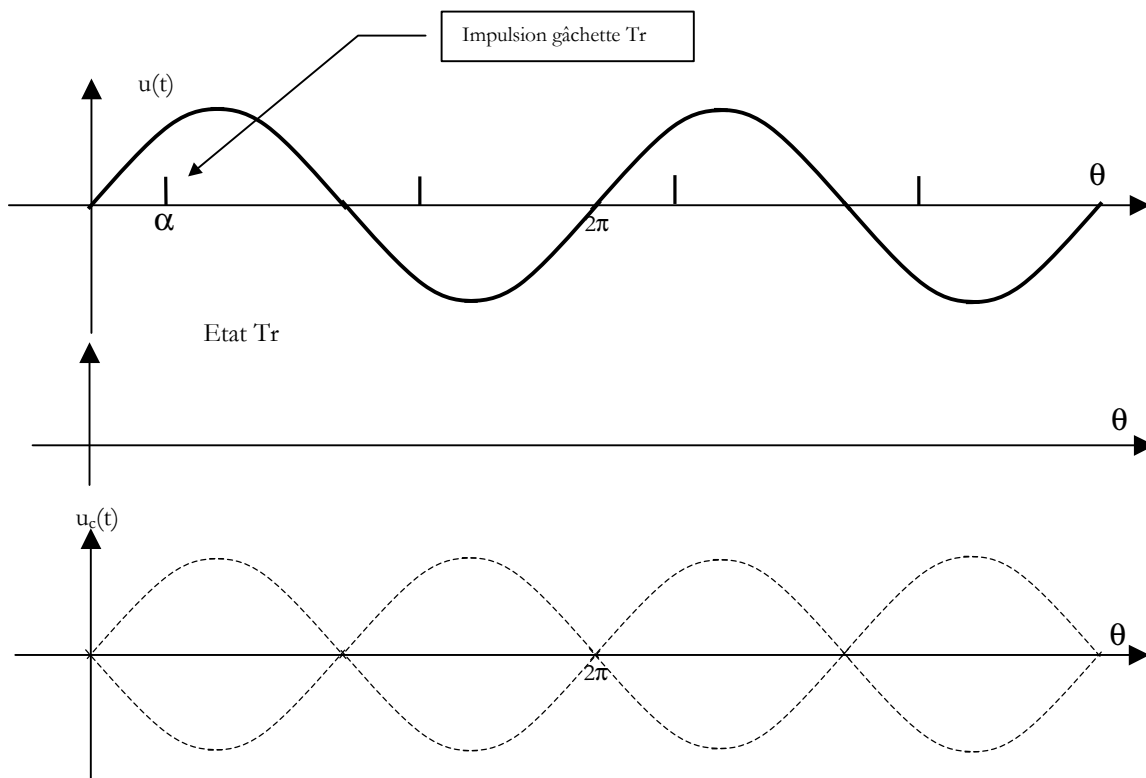
Exprimer U_{cmoy} en fonction de i . Justifier la relation.

Exercice 2 –



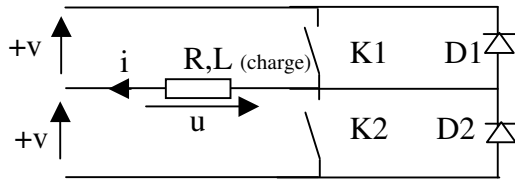
1% Rappeler brièvement le fonctionnement du triac et surtout la condition pour qu'il s'amorce.

2% La charge étant résistive, dessiner l'évolution de $u(\theta)$.



3% Exprimer la valeur efficace de $u_c(t)$ en fonction de l'angle d'amorçage α du triac.

Exercice 3 –



On considère l'onduleur sur charge R,L et avec une commande adjacente : Les deux interrupteurs sont alternativement fermés et ouverts sans temps mort

1° K1 fermé et K2 ouvert

exprimer u et i

2° K1 ouvert

A travers quel circuit, le courant peut-il continuer à circuler en diminuant ?

K2 est-il en état de conduire (Cf thyristor) ?

Quel est l'état de D2, en déduire u .
Exprimer i

A quel moment la diode D2 se bloque t-elle ?

3° K2 fermé et K1 ouvert

Exprimer u , comment varie i ?

4° K2 ouvert

A travers quel circuit, le courant peut-il continuer à circuler en augmentant ?

K1 est-il en état de conduire ?

Quel est l'état de D1, en déduire u .

Comment varie i ?

Compléter les chronogramme de u et i ci-dessous ainsi que l'état des diodes :

