

# MP21 – PRODUCTION ET CONVERSION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

30 mars 2016

Nicolas Auvray & Samuel Boury

*Une légère baisse de tension, mais un rendement élevé!*  
UN TRANSFORMATEUR

## Niveau : L3

## Commentaires du jury

**2014** : Le principe de fonctionnement des dispositifs utilisés (moteurs, tachymètres, variateurs, ...) doivent être connus afin que la présentation illustre pleinement le sujet et ne se limite pas à des mesures de rendement. D'autre part, lors de l'étude de dispositifs de production et de conversion d'énergie électrique, la notion de point de fonctionnement nominal est importante; en particulier, des mesures de puissance de l'ordre du mW ne sont pas réalistes. Enfin, les modèles utilisés pour décrire ces dispositifs ne doivent pas être trop simplifiés, au risque d'obtenir des écarts excessifs entre les modèles et les systèmes réels.

**2013** : La production d'énergie, par divers moyens, a été ajoutée à ce montage. Jusqu'en 2013, le titre était : Conversion de puissance électrique-électrique.

**2013** : Comme l'an dernier, le jury regrette de ne pas voir plus souvent de réelles mesures de puissance et de rendement, pour des convertisseurs utilisés en régime nominal. Dans ce montage, des mesures de puissance de l'ordre du mW ne sont pas réalistes.

**2012** : Suite aux remarques des années précédentes l'utilisation du régime nominal de fonctionnement a été plus répandue cette session. Le transformateur n'est pas le seul dispositif pouvant être présenté dans ce montage.

**2011** : Suite aux remarques des années précédentes l'utilisation du régime nominal de fonctionnement a été plus répandue cette session.

**2010** : Comme l'an dernier, le jury regrette de ne pas voir plus souvent de réelles mesures de puissance et de rendement, pour des convertisseurs utilisés en régime nominal.

**2009** : Le jury souhaiterait voir de réelles mesures de puissance, pour des convertisseurs utilisés en régime nominal.

## Bibliographie

⚡ *Électrotechnique*, Bréal

⚡ *Dictionnaire de la physique*, Quaranta IV

→ Tout sur la machine à courant continu et le transfo.

→ Les grandes lignes.

## Prérequis

- Électricité (Ohm, condensateur, diodes, ...)
- Électromagnétisme (induction pour transfo)

## Expériences

- ☞ Machine à courant continu
- ☞ Transformateur (maison & commercial)
- ☞ Ligne haute-tension
- ☞ Redresseur
- ☞ Hacheur

## Table des matières

|   |                                                                  |   |
|---|------------------------------------------------------------------|---|
| 1 | Génératrice à courant continu : la dynamo                        | 2 |
| 2 | Conversion alternatif/alternatif & transport : le transformateur | 3 |
| 3 | Conversion alternatif/continu : le redresseur                    | 6 |
| 4 | Conversion continu/continu : hacheur                             | 6 |

## Introduction

L'énergie électrique est devenue un élément central du monde moderne avec la multiplication des machines et des systèmes électriques. On cherche donc des solutions efficaces pour produire cette énergie et l'acheminer des lieux de production (centrale) jusqu'aux lieux de consommation (usines, maisons, etc). Par ailleurs, il faut très souvent convertir l'énergie électrique afin qu'elle soit adaptée aux conditions normales d'utilisation des systèmes électriques, précisées par les grandeurs nominales. Le problème sous-jacent est alors celui du rendement : on va chercher à minimiser les pertes de puissance dans les dispositifs de production et de conversion d'énergie électrique. C'est ce que nous allons voir tout au long de ce montage.

### Un petit mot :

On peut mettre beaucoup de manip dans ce montage et passer beaucoup de temps sur chacune d'elles. Les manip "incontournables" des dernières années sont : la machine à courant continu et l'étude du transformateur. Pour la dynamo et le transfo je vous renvoie au *Bréal* d'électrotechnique, tout y est traité. Pour les manip de conversion alternatif/continu et continu/continu, je les ai montées sans livre mais elles sont assez simples dans le principe et il y a quelques boîtiers déjà faits dans la collection, après il faut ajuster un peu les composants.

La plupart des manip fonctionnent aussi à faible puissance (par exemple le redresseur pour la conversion alternatif/continu) mais après en avoir discuté avec les encadrants il est préférable de travailler le plus possible en électronique de puissance pour les montages d'électrotechnique pour montrer que ça ne nous effraie pas (pourtant ça marche aussi bien à faible puissance et c'est souvent moins dangereux, mais bon). Par contre, il faut éviter les plaquettes et branchements apparents si on monte en puissance pour être le plus possible dans des conditions de sécurité ...

Le poly est un peu plus complet que ce que je présente, il y a plusieurs manip que je ne fais pas par manque de temps et parce que je voulais présenter les conversions alternatif/continu et continu/continu, par exemple les pertes sur le transformateur, ou le bilan de puissance sur la ligne haute tension (je vous conseille de regarder la doc, elle est très courte et très bien faite si vous voulez faire la manip complète), mais je les ai toutes essayées et elles fonctionnent !

## 1 Génératrice à courant continu : la dynamo

Une solution (historique) pour produire une énergie électrique est la machine à courant continu, donc le principe repose sur l'induction de Maxwell-Faraday. Une machine à courant continu peut être décrite de façon très générale par :

- Un inducteur, dont le rôle est de créer un champ magnétique (souvent fixe – stator – et créant un champ constant) ; et
- Un induit, qui génère un courant électrique ou un mouvement de rotation (partie mobile – rotor – parcourue par des courants induits).

La machine à courant continu est réversible et peut être utilisée en moteur (alimentation électrique de l'induit et de l'inducteur pour récupérer une énergie mécanique) ou en dynamo (alimentation électrique de l'inducteur et mécanique de l'axe du rotor pour récupérer une énergie électrique sur l'induit).

À noter que si l'énergie électrique est très souvent issue d'une conversion mécanique-électrique (comme ici) ce n'est pas toujours le cas.



### Machine à courant continu



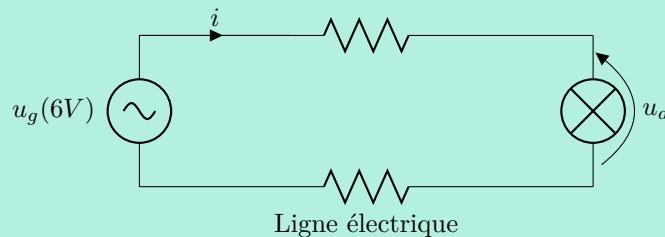
- **Principe** : machine alternative avec redresseur mécanique (balais).
- **Montage** : banc moteur – dynamo : on branche les inducteurs en parallèle, l'induit moteur sur l'alimentation réglable, l'induit dynamo sur une charge.
- **Étude électrique de l'induit** : tracer la tension d'induit en fonction de la vitesse de rotation de l'axe :  $U_{ind}(\omega) = k\phi\omega - rI$ . Régression linéaire :  $k\phi$ ,  $rI$ , puis (éventuellement) une étude électrique séparée pour trouver  $r$ .
- **Étude mécanique de la dynamo** : change la charge  $R_C$ , on trace le couple  $\Gamma = k\phi I$  ; vérifier la cohérence avec l'étude électrique (même coefficient  $k\phi$ ).
- **Rendement** :  $\eta = \mathcal{P}_U / \mathcal{P}_C$  à tracer en fonction de  $\mathcal{P}_U$  (puissance utile) ; commenter par rapport aux valeurs nominales.

Avec la machine à courant continu, on peut donc produire un courant continu aux bornes de l'induit. En fait, il est souvent plus simple et plus fiable d'utiliser des machines produisant un courant alternatif (ce qui est le cas pour les centrales électriques). Il faut donc arriver à acheminer ce courant alternatif jusqu'aux lieux de consommation.

## 2 Conversion alternatif/alternatif & transport : le transformateur



### Ligne électrique simple



- **Ligne électrique simple** : brancher la ligne électrique simple, la lampe ne s'allume pas (justifier par la faible puissance transmise à cause des dissipations par effet joule).

Pour diminuer la dissipation dans les fils électriques lorsqu'on transporte l'énergie électrique sur de grandes distances, on utilise généralement des lignes à haute tension (tension de l'ordre de la centaine de kV voire du millier de kV) bien que le courant délivré pour les usages domestiques soit à une tension bien inférieure (220V !) : comment élève-t-on ou abaisse-t-on la tension ?

L'élévation ou l'abaissement de la tension d'un courant alternatif se fait grâce à un transformateur, système basé sur l'induction et la loi de Faraday, constitué d'enroulements de fils conducteurs et d'un support magnétique. On le caractérise par son rapport de transformation  $m$ .



## Rapport de transformation



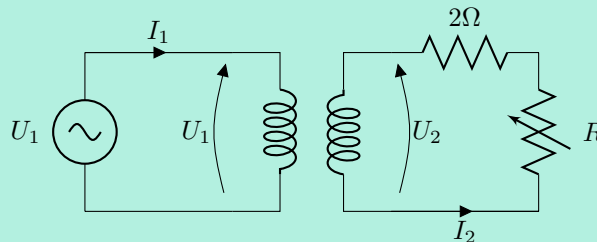
- **Bobine "maison" :** cadre ferromagnétique, et deux bobines de 1000 spires en vis-à-vis (les brancher en 1000 et 500 spires) ; phénomène de mutuelle induction. Définir le primaire et le secondaire.
- **Rapport en tension :** à vide, faire varier la tension du primaire  $U_1$  et tracer  $U_2$  en fonction de  $U_1$  (droite de pente  $m = N_2/N_1 \approx 1/2$ ).
- **Rapport en intensité :** avec une charge variable, tracer  $I_2$  en fonction de  $I_1$  (droite de pente  $1/m = N_1/N_2 \approx 2$ , vérifier avec le résultat précédent).
- **Pertes :** justifier que le rapport de transformation n'est pas rigoureusement égal à celui prévu en théorie à cause des pertes (pertes joule, pertes fer).

Le transformateur présenté a un certain nombre de pertes, que l'on va estimer par la suite, et un faible rapport de transformation. Qualitativement, on remarque tout de même que la puissance est transportée quasiment intégralement du primaire au secondaire et que le transformateur est un dispositif qui présente un bon rendement.

Qualitativement, la puissance est transmise quasiment intégralement du primaire au secondaire : le transformateur est un dispositif qui présente un bon rendement. Sur ce transformateur, les pertes sont importantes (pertes joule, pertes fer) et ce sont ces pertes qui diminuent le rendement. Généralement, un transformateur dispose d'indications sur sa plaque signalétique, les grandeurs nominales, qui précisent ses conditions normales d'utilisation. Intéressons-nous au rendement d'un transformateur commercial en fonction des conditions d'utilisation.



## Rendement du transformateur



- **Montage :** on alimente le primaire, on met deux rhéostats sur le secondaire (l'un peut varier, l'autre est fixe à 2 pour servir de sécurité et ne pas mettre le transformateur en court-circuit). On branche les wattmètres au primaire et au secondaire pour pouvoir calculer les puissances au primaire, au secondaire, et la valeur de la charge.
- **Rendement :** avec le transformateur 48V/6V, faire varier le rhéostat  $R$  et tracer la courbe du rendement  $\eta = (U_1 I_1)/(U_2 I_2)$  en fonction de la puissance utile  $U_1 I_1$  ; existence d'un maximum de rendement.

Le rendement du transformateur est donc assez bon et présente un maximum, i.e. des conditions d'utilisations dans lesquelles on va chercher à se placer pour maximiser la puissance transmise. Un transformateur n'est donc optimal que pour un environnement bien défini. Cependant, ce rendement maximum n'est pas égal à 1, ce qui signifie qu'il y a toujours des pertes.



## Estimation des pertes



- **Pertes fer :** à vide,  $\mathcal{P}_{fer} \approx \mathcal{P}_1$  (se placer à tension nominale pour cette mesure).
- **Pertes joule :** en court-circuit,  $\mathcal{P}_j \approx \mathcal{P}_1$  (se placer à intensité nominale pour cette mesure).
- **Bilan de puissance :** au point de fonctionnement choisi (nominal), on a :  $\mathcal{P}_C = \mathcal{P}_U - \mathcal{P}_{fer} - \mathcal{P}_j$ .

### Pertes fer et pertes joule <sup>a</sup> :

Le rendement du transformateur n'est pas rigoureusement de 1, ce qui signifie qu'une partie de la puissance envoyée au primaire est dissipée dans le transformateur et n'est pas restituée au secondaire. On peut identifier deux sources principales de dissipation :

- Les pertes fer  $\mathcal{P}_{fer}$  : dissipation énergétique dans la partie ferromagnétique du transformateur (soit par courants de Foucaults, soit par hystérésis) ; et
- Les pertes cuivre  $\mathcal{P}_j$  : dissipation par effet joule dans le bobinage du transformateur.

La conservation de la puissance électrique permet de dire qu'en valeur moyenne la puissance au primaire  $\mathcal{P}_1$  est répartie entre le secondaire  $\mathcal{P}_2$  et les différentes pertes :

$$\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_2 + \mathcal{P}_{fer} + \mathcal{P}_j.$$

La **mesure des pertes fer** s'effectue à vide : on branche le secondaire directement sur le voltmètre, l'intensité délivrée au secondaire est alors nulle (résistance infinie) donc la puissance au secondaire est nulle. L'intensité dans le bobinage peut elle aussi est considérée nulle, donc il n'y a pas de pertes joule, et finalement : à vide,  $\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_{fer}$ .

La **mesure des pertes joule** s'effectue en court-circuit : on branche le secondaire en court-circuit (en série avec un ampèremètre pour mesurer l'intensité) donc la tension à ses bornes est nulle, et la puissance au secondaire également. La puissance distribuée au primaire est alors entièrement dissipée par effet joule et : en court-circuit,  $\mathcal{P}_1 = \mathcal{P}_j$ . Pour faire cette mesure on se place à faible tension au primaire (sinon on grille le transformateur).

On peut montrer que les pertes fer varient comme le carré de la tension au primaire, et que les pertes joule varient comme le carré de l'intensité au secondaire. Avec une série de mesures et une extrapolation, on est donc en mesure de déterminer les pertes fer et les pertes joule dans n'importe quelle situation.

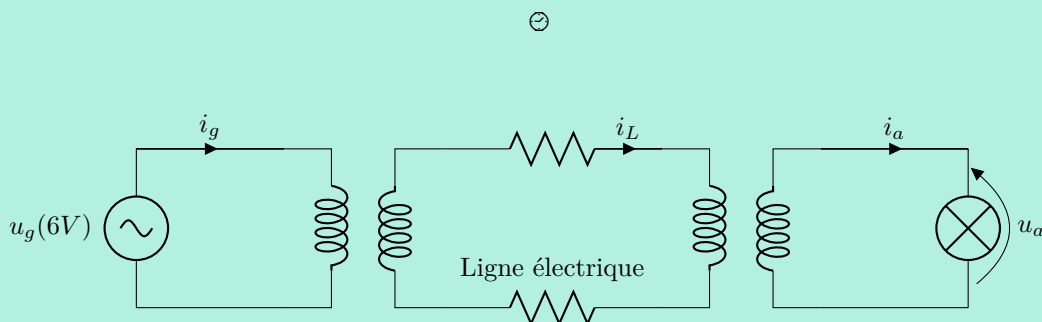
La **méthode des pertes séparées** permet alors de connaître la puissance délivrée par le secondaire, par une mesure indirecte : au lieu de mesurer la puissance directement sur le secondaire, on la calcule en enlevant les pertes (fer et joule) de la puissance envoyée au primaire :

$$\mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_1 - \mathcal{P}_{fer} - \mathcal{P}_j$$

a. Comme on m'a demandé ce que j'avais compris sur les pertes fer et pertes joule, je mets un petit résumé ici ; elles ont tout à fait leur place dans ce montage (c'était fait il y a deux ou trois ans je crois) mais je n'avais ni le temps ni l'envie de les traiter en détail !

Ainsi, le transformateur permet de modifier la tension (et l'intensité) d'un courant alternatif quasiment sans perte de puissance. On peut donc comprendre son intérêt pour alimenter certains systèmes électriques (nécessitant un courant alternatif d'une tension déterminée) mais pourquoi élever la tension pour le transport électrique sur de longues distances ?

### Ligne haute-tension



- **Ligne électrique haute tension** : brancher la ligne électrique haute tension (avec transformateurs) : la lampe s'allume car le transfert de puissance est plus efficace (moins de dissipation par effet joule).

## Rendement de la ligne haute-tension

- **Ligne basse-tension** : brancher la ligne électrique simple, la lampe ne s'allume pas ou peu ; calculer le rendement  $\eta = u_a/u_g$ .
- **Ligne haute-tension** : brancher la ligne électrique avec les transformateurs, la lampe s'allume correctement ; calculer le rendement  $\eta = (u_g i_g)/(u_a i_a)$ . Commenter avec la puissance dissipée par effet joule dans la ligne et calculer l'ordre de grandeur.

Le transport d'énergie électrique par des lignes à haute tension permet donc de diminuer les pertes, notamment dues à la dissipation par effet joule. Dans la grande majorité des cas, on transporte l'énergie électrique sous forme alternative à haute tension, mais ce n'est pas toujours le cas : le transport s'effectue parfois en courant continu à haute tension (cas des grands effets capacitifs, câbles sous la Manche par exemple).

## 3 Conversion alternatif/continu : le redresseur

Après avoir été transporté, le courant doit encore être converti : d'une part pour abaisser la tension (transformateur), d'autre part pour s'adapter à des usages en courant continu (moteurs, etc). Pour cette étape, une solution simple est d'utiliser un redresseur (ou pont de Graetz) associé à un filtre passe-bas.

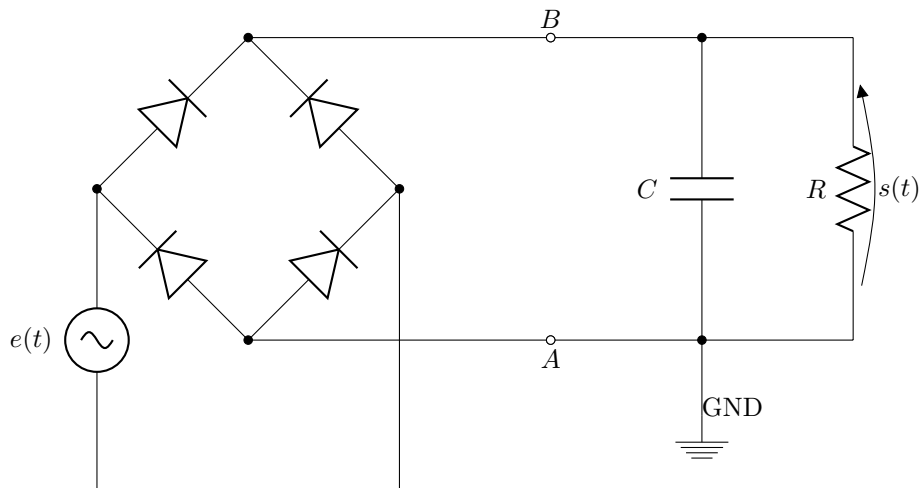


FIGURE 1 – Schéma du pont de diodes avec filtre.

## Conversion alternatif/continu

- **Pont de diodes** : conserve les alternances positives d'un signal sinusoïdal (visualiser à l'oscilloscope).
- **Filtre** : lisse la tension en sortie du pont pour avoir une tension continue (visualiser à l'oscilloscope).
- **Rendement** : regarder la puissance en entrée et en sortie du dispositif (bon rendement).
- **Taux d'ondulation** : rapport  $\delta = s_{eff}/s_{moy}$  (mesurer  $s_{eff}$  en AC et  $s_{moy}$  en DC).

## 4 Conversion continu/continu : hacheur

Suivant les spécifications d'un système électrique, notamment ses grandeurs nominales de fonctionnement, la tension continue utilisée pour l'alimenter doit être ajustée. Par exemple, on peut chercher à avoir une tension fixe bien déterminée : une solution simple est alors d'utiliser un diviseur de tension, soit en pratique de mettre une résistance en série avec le dipôle étudié. Cette solution est peu avantageuse, d'une part parce que son rendement est mauvais (puisque la puissance non consommée par le dipôle est entièrement perdue par effet joule), d'autre part parce que

certaines applications nécessitent de faire varier la tension délivrée (par exemple pour faire varier la vitesse d'un moteur à courant continu) ce qui est impossible avec ce système.

Une autre solution est d'utiliser un hacheur, avec un transistor commandé en tension. L'idée est de découper la tension en créneaux à une fréquence suffisamment élevée pour ne pas être perçue par le dipôle, qui ne voit qu'une tension moyenne.

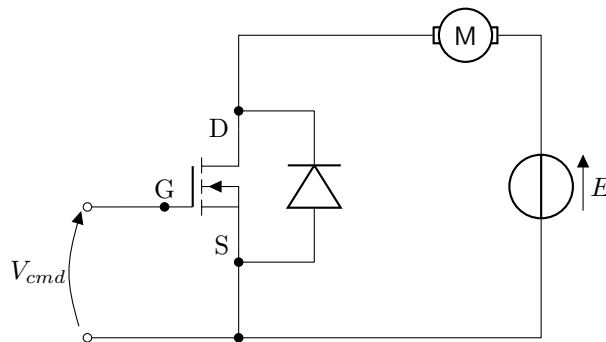


FIGURE 2 – Schéma du hacheur.

## Hacheur

- **Principe :** "hachage" de la tension  $E$  en utilisant le mosfet en commutation.
- **Commande :** varier la tension de commande  $V_{cmd}$  (créneaux) : la vitesse du moteur change, il perçoit une tension continue qui est la valeur moyenne de  $E$  "hachée" à la fréquence  $V_{cmd}$ .

### Remarque :

Le hacheur que je présente utilise un transistor à effet de champ (mosfet) qui s'utilise en électronique de puissance, il se comporte comme un interrupteur commandé en tension (à tension de commande  $V_{cmd}$  nulle le courant ne passe pas, à  $V_{cmd} = 5V$  le courant passe). Sur la commande ( $G$ ) l'intensité est nulle donc aucune puissance n'est perdue. La diode en dérivation sert à protéger le mosfet.

### Remarque : conversion continu/alternatif

Avec la même idée, en utilisant un pont en H et quatre mosfets commandés en tension, il est possible de convertir une tension continue en tension alternative.

## Conclusion

En conclusion, on a vu la chaîne complète de la production et de la conversion d'énergie électrique :

- Sa production, avec la machine à courant continu ;
- Sa conversion alternatif/alternatif, avec le transformateur ;
- Son transport sur de longues distances, avec la ligne haute tension ;
- Sa conversion alternatif/continu, avec le redresseur ; et
- Sa conversion continu/continu, avec le hacheur.

D'autres méthodes existent pour produire de l'énergie électrique (centrales solaires par exemple, qui n'utilisent pas une conversion mécanique-électrique, ou machines alternatives) mais aussi d'autres conversions (continu/alternatif par exemple, avec un onduleur).