



M1 E3A - VOIE ANDRÉ AMPÈRE

UE414

PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

À PARTIR D'ÉNERGIE RENOUVELABLES

Enseignant:

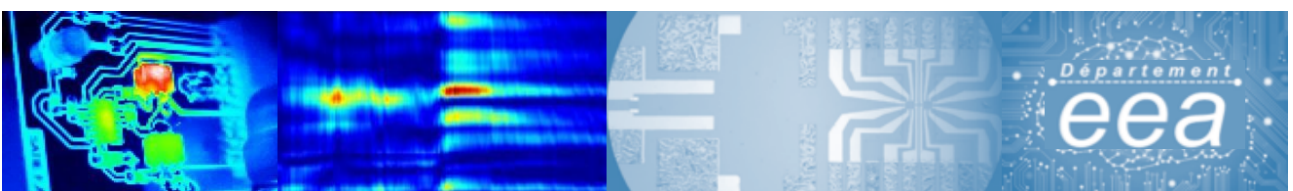
ANTHONY JUTON  
OLIVIER VILLAIN  
EMMANUEL HOANG

Rédigé par:

PIERRE-ANTOINE COMBY

école \_\_\_\_\_  
normale \_\_\_\_\_  
supérieure \_\_\_\_\_  
paris—saclay \_\_\_\_\_

université  
PARIS-SACLAY



# Table des matières

<b>1</b>	<b>La machine asynchrone</b>	<b>4</b>
1	Introduction . . . . .	4
2	Principe de la machine asynchrone . . . . .	4
2.1	Le stator triphasé . . . . .	4
2.2	Rotor à une spire en court circuit . . . . .	7
2.3	Rotor à 3 spires en court circuit . . . . .	8
3	Modélisation de la machine asynchrone . . . . .	8
3.1	Mise en équation . . . . .	9
3.2	Bilan de puissance . . . . .	12
3.3	Couple et puissance . . . . .	13
3.4	Alimentation par un onduleur . . . . .	15
4	La machine asynchrone a double alimentation . . . . .	16
5	La machine asynchrone en génératrice . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Production d'électricité d'origine non nucléaire</b>	<b>17</b>
1	Les différentes sources d'énergies pour l'électricité . . . . .	17
1.1	Rappels . . . . .	17
1.2	Les énergies non renouvelable . . . . .	17
1.3	Les énergies renouvelable . . . . .	18
2	L'hydroélectricité . . . . .	19
2.1	Sur terre . . . . .	19
2.2	En mer . . . . .	19
<b>3</b>	<b>L'éolien : principe physique</b>	<b>20</b>
1	Quelques chiffres . . . . .	20
2	Caractérisation du vent . . . . .	20
2.1	La rose des vents . . . . .	20
2.2	La distribution des vitesses . . . . .	20
2.3	Dépendances de la vitesse du vent avec l'altitude . . . . .	20
2.4	Énergie cinétique d'une colonne de vent . . . . .	21
2.5	Potentiel éolien d'un site . . . . .	21
2.6	Potentiel éolien en France . . . . .	22
3	Les différents types de turbines . . . . .	22
4	Conversion d'énergie cinétique, mécanique . . . . .	22
4.1	Limite de Betz . . . . .	22
4.2	Théorie Simplifiée de la pale . . . . .	24
4.3	Pale réelle . . . . .	28
4.4	Comparaison des différents types de turbines . . . . .	28
4.5	Réglage de la conversion . . . . .	28

4.6	Exemple de caractéristiques . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Physique de la conversion électrovoltaïque</b>	<b>29</b>
1	Origine de l'énergie solaire . . . . .	29
1.1	Constitution du Soleil . . . . .	29
1.2	Rayonnement produit et loi utiles . . . . .	29
1.3	Notion d'Air-Masse . . . . .	30
2	Principe de la conversion : la cellule photovoltaïque . . . . .	30
2.1	Historique . . . . .	30
2.2	La jonction PN . . . . .	31
2.3	Effet photovoltaïque . . . . .	31
2.4	La photodiode . . . . .	31
2.5	Devenir des photons . . . . .	32
2.6	Rendement . . . . .	33
2.7	Caractéristique du générateur . . . . .	33
3	Mise en oeuvre . . . . .	33
3.1	CAractéristique d'une cellule . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Éléments de modélisation d'un ensemble habitation individuelle – véhicule électrique – Réseau électrique</b>	<b>34</b>
1	Cours 1 - Introduction . . . . .	34
2	Cours 2 . . . . .	35
2.1	Convertisseur DC- AC . . . . .	36
2.2	Convertisseur DC-DC . . . . .	36
2.3	Synthèse de convertisseur . . . . .	37
3	Cours 4 . . . . .	38
4	Ressources intéressantes : . . . . .	38

# Chapitre 1

## La machine asynchrone

*Anthony Juton*

### 1 Introduction

*blabla ,les centrales nucléaire c'est 1GW , avec des machines synchrones. Les MCC sont pas utilisé en forte puissance. on préfère utiliser une machine synchrone ou une machine asynchrone (plus simple, moins cher,etc)* La machine asynchrone fonctionne en moteur ou en alternateur.

Premier brevet déposé en 1888 par Nicolas Tesla.

Utilisation des différentes technologies de moteur (brushless, bobinés) en automobile et industrie (80% des moteur de l'industrie sont des machines asynchrones)

### 2 Principe de la machine asynchrone

en anglais on parle de *Induction Motor*. On génère un champ magnétique tournant au stator  
Le courant électrique est induit dans le rotor , pas besoin de mettre des balais ou de bobinage au rotor.

#### 2.1 Le stator triphasé

##### 2.1.1 Champs tournant

On a le schéma suivant,  $n$  spires sont parcourues par un courant  $i_{sa}$ .

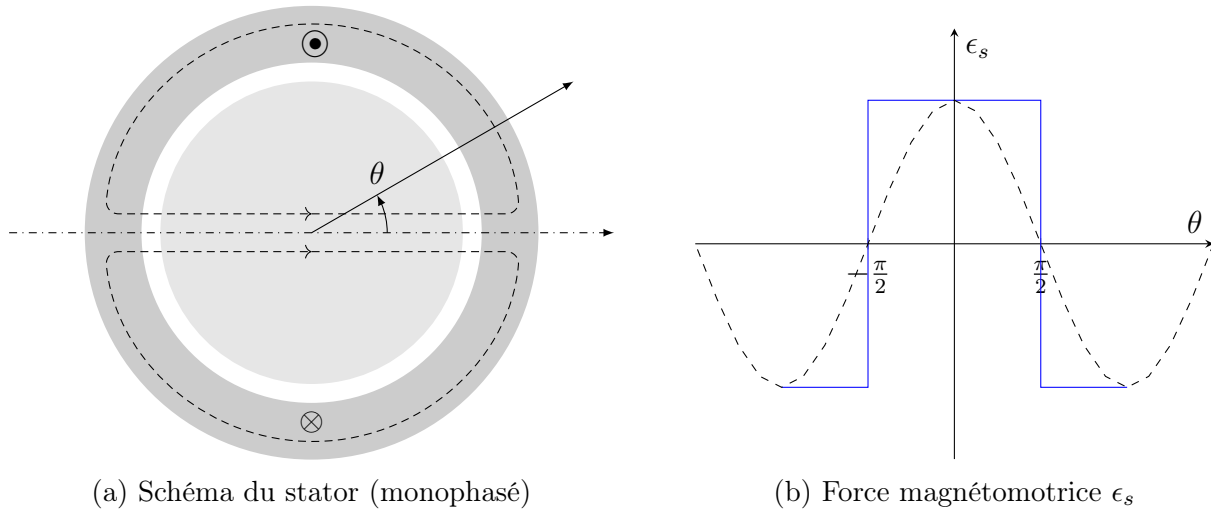


FIGURE 1.1 – Champ tournant dans le stator

Avec le théorème d'ampère on a :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = n_s i_s$$

$$\underbrace{\int H \cdot dl}_{H_{fer}} + \underbrace{2H_e e}_{H_e} = n_s i_s$$

Or on a :

$$H_{mat.fer} \ll H_{entrefer}$$

Donc on a la force magnétomotrice

$$\epsilon_s = H_e e = \frac{n_s i_s}{2}$$

On peut donc tracer :

La répartition des fils autour du rotor influence sur l'allure de la force magnétomotrice. Par exemple pour une répartition uniforme de  $n/3$  spires par encoche :

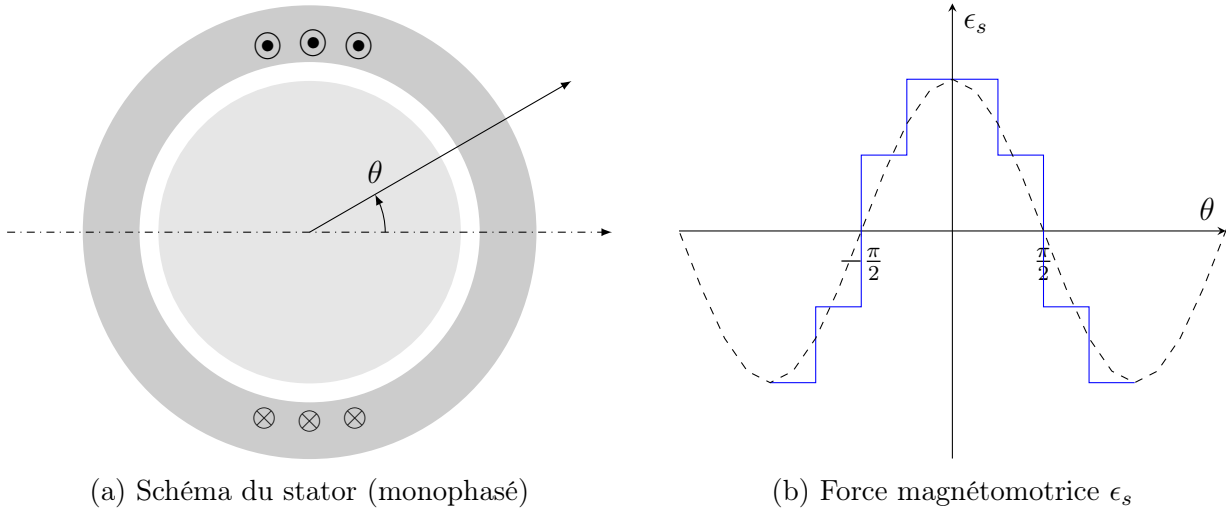


FIGURE 1.2 – Approximation sinusoïdale du champ tournant

en répartissant les bobinage sur le rotor de manière sinusoïdales, on peut générer une force magnétomotrice sinusoïdale également.

**Remarque:** On utilise des petits fils pour éviter l'effet de peau en alternatif, mais cela augmente la résistivité et la puissance dissipée par effet joule, rien n'est parfait.

En utilisant un courant  $i_s$  alternatif (à la pulsation  $\omega$ ) on a une onde pulsante :

$$\epsilon_s = \frac{n_s i_{max}}{2} \cos(\omega t)$$

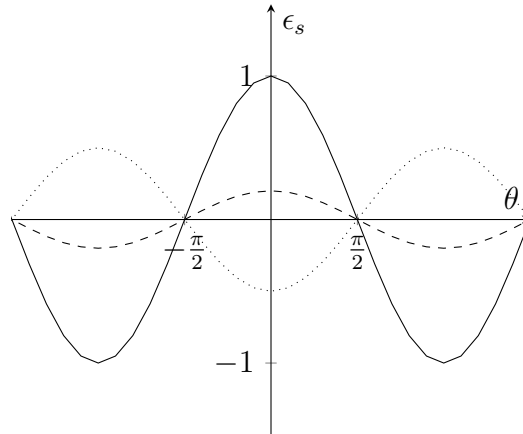


FIGURE 1.3 – Évolution d'une onde pulsante en fonction du temps

Dans le cas triphasé on répartit les enroulements de manière sinusoïdales (seul un tour de bobinage est représenté) parcourus par  $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  :

$$\begin{cases} i_{sa}(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t) \\ i_{sb}(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{sc}(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad \text{Soit} \quad \begin{cases} \epsilon_{sa}(t) = \frac{n_s i_s(t)}{2} \cos(\theta) \\ \epsilon_{sb}(t) = \frac{n_s i_s(t)}{2} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \epsilon_{sc}(t) = \frac{n_s i_s(t)}{2} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

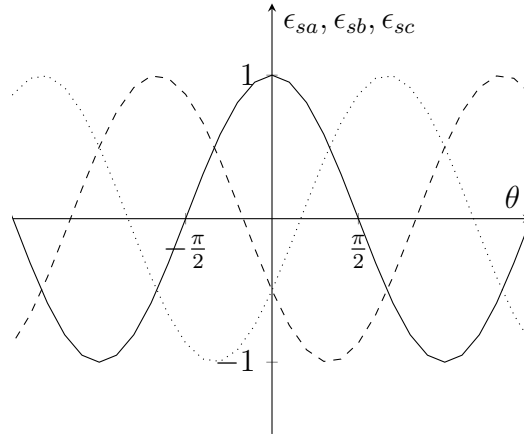


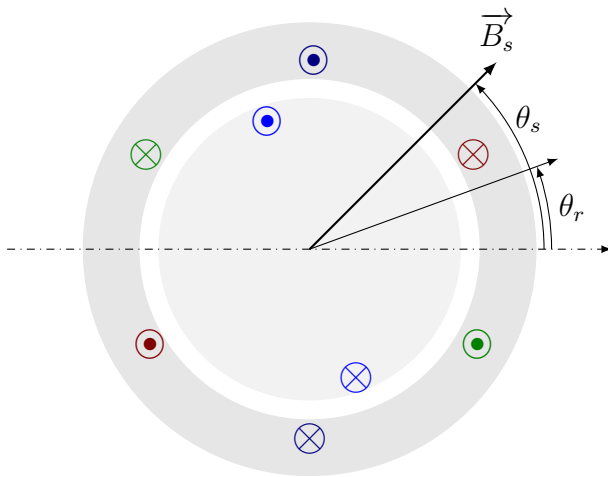
FIGURE 1.4 – Forces magnétomotrices en triphasé

Alors la force magnétomotrice totale vaut :

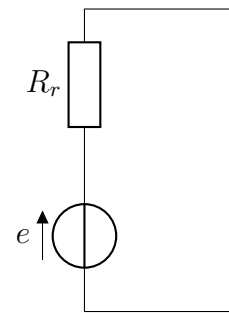
$$\begin{aligned}
 \epsilon_s &= \epsilon_a + \epsilon_b + \epsilon_c \\
 &= \frac{n_s I \sqrt{2}}{2} \left( \cos(\theta) \cos(\theta) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\
 &= \frac{3n_s I}{\sqrt{2}} \cos(\theta - \omega t)
 \end{aligned}$$

On a créé un champ tournant, avec trois bobinages, le module de la force magnétomotrice est constant, son argument balaye tout l'espace.

## 2.2 Rotor à une spire en court circuit



(a) Disposition du rotor (monophasé)



(b) Schéma électrique du rotor en court circuit

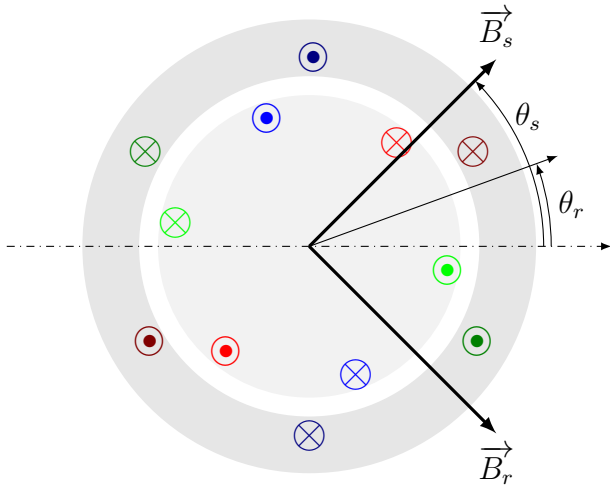
On a :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = R_r i_r = -L \frac{di_r}{dt} + B \cdot n_r S_r \frac{d\theta_s - \theta_r}{dt} \sin(\theta_s - \theta_r)$$

Pour  $\theta_s = \omega_s t$ , position du champs statorique et  $\theta_r = \Omega t + \theta_{r_0}$ , position du champ rotorique on a :

$$e = -L \frac{di_r}{dt} + B.n_r S_r (\omega_s - \Omega) \sin((\omega_s - \Omega)t + \theta_{r_0})$$

## 2.3 Rotor à 3 spires en court circuit



(a) Rotor triphasé

On a :

- Vitesse de rotation de  $\vec{B}_s$  :  $\omega_s$
- Vitesse de rotation du rotor  $\Omega$
- Vitesse de rotation de  $\vec{B}_s$  dans le repère du rotor :  $\omega_s - \Omega = \omega_r$
- Vitesse de rotation du champ  $\vec{B}_r$  induit dans le rotor dans le repère du stator :  $\omega_s$ .

### Proposition

Le champ induit dans le rotor et le champ du stator tournent à la même vitesse, appelé *la vitesse de synchronisme*

## 3 Modélisation de la machine asynchrone

On considère une machine triphasé au rotor et au stator à une paire de pôle :



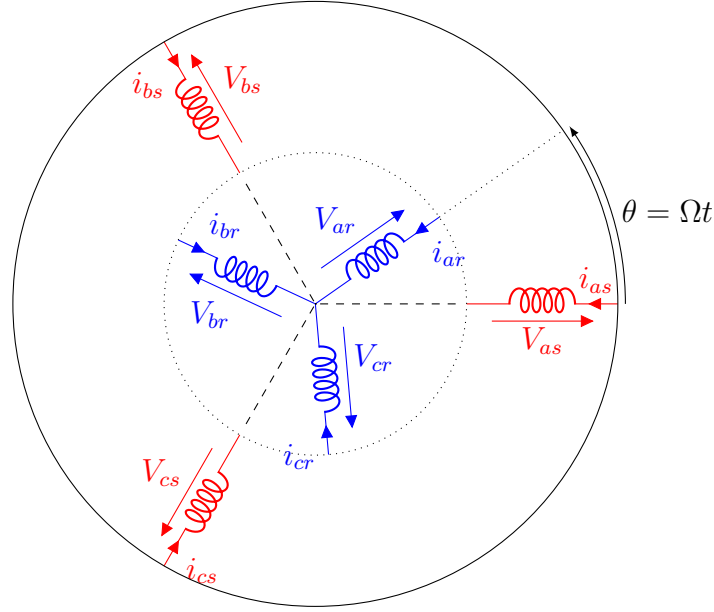


FIGURE 1.7 – Modèle électrique

### Hypothèses

- Alimentation sinus triphasé en Régime Permanent
- Rotor triphasé en court-circuit
- Couplage en étoile des enroulements équilibrés
- Fmm sinusoïdales, pas de saturation magnétiques

On note  $\omega_s$  pulsation des courants statorique  $\omega_r$  la pulsation des courants rotorique et  $\Omega$  la pulsation mécanique de la machine.

## 3.1 Mise en équation

### 3.1.1 Équation statorique

Chaque phase du stator possède un couplage magnétique avec les autres phases du stator (mutuelle  $M_s$ ) et avec les phases du rotor (mutuelle  $M_0$ ).

On a les équations suivantes pour le stator :

$$v_{as} = R_s i_{as}(t) + \frac{d\Phi_{as}(t)}{dt}$$

$$\Phi_{as}(t) = L_s i_{as} + M_s (i_{bs} + i_{cs}) + M_0 \left( \cos(\theta) i_{ar}(t) + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) i_{br}(t) + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) i_{cr}(t) \right)$$

$$\Phi_{as}(t) = (L_s - M_s) i_{as}(t) + \frac{3M_0 I_r}{\sqrt{2}} \cos(\theta + \omega_r t + \phi_r + \theta_0)$$

$$\Phi_{as}(t) = (L_s - M_s) i_{as}(t) + \frac{3M_0 I_r}{\sqrt{2}} \cos(\omega_s t + \phi_s)$$

On en déduit donc (Dans le formalisme complexe de l'ARQS)

$$\underline{V_{as}} = R_s \underline{I_s} + j L_{sc} \omega_s \underline{I_{as}} + j \frac{3}{2} M_0 \omega_s \underline{I_r}$$

$I_r$  est à la pulsation  $\omega_s$  !

### 3.1.2 Équations rotoriques

On fais les mêmes calculs pour le rotor :

$$v_{ar}(t) = R_r i_{ar}(t) + \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi_{ar}(t) = (L_r - M_r) i_{ar} + M_0 (\cos(\theta) i_{as}(t) + \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) i_{br}(t) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) i_{cr}(t))$$

$$\Phi_{ar}(t) = (L_r - M_r) i_{ar} + \frac{3M_0 I_s}{\sqrt{2}} \cos(\Omega t - \omega_s t + \theta_0 - \phi_s)$$

$$\Phi_{ar}(t) = L_{rc} i_{ar} + \frac{3M_0 I_s}{\sqrt{2}} \cos(\omega_r t + \phi'_s)$$

Donc on a dans le formalisme complexe de l'ARQS, avec le rotor en court-circuit :

$$\underline{V_{ar}} = R_r \underline{I_{ar}} + j L_{rc} \omega_r \underline{I_{ar}} + j \frac{3}{2} M_0 \omega_r \underline{I_s} = 0$$

On pose alors le *facteur de glissement* :

$$g = \frac{\omega_s - \Omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s}$$

### 3.1.3 Modèle par analogie

Dans le cas d'une machine à simple alimentation (on étudie l'usage d'une machine à double alimentation dans la partie 4) le rotor est en court circuit :

$$\frac{\underline{V_{ar}}}{g} = 0 = \frac{R_r}{g} + j L_{rc} \omega_s \underline{I_{ar}} + j \frac{3}{2} M_0 \omega_s \underline{I_s}$$

Le facteur de glissement permet d'exprimer toutes les grandeurs comme évoluant à la fréquence statorique.

Il y a un couplage magnétique entre le stator et le rotor, et on peut construire un modèle équivalent, avec  $L_{sc}$  et  $L_{rc}$  les inductances cycliques du stator et du rotor.

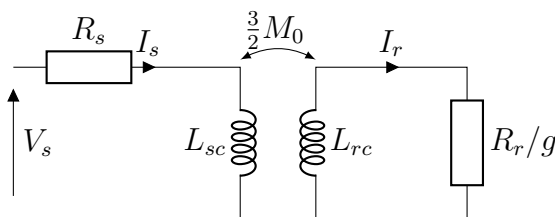


FIGURE 1.8 – Modèle électrique équivalent

Le couplage n'est pas parfait :  $\frac{3}{2}M_0 < \sqrt{L_{sc}L_{rc}}$ .

On fait l'analogie avec un transformateur parfait avec pertes :

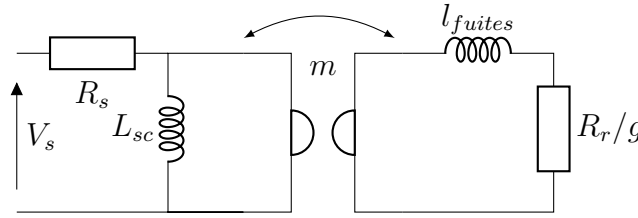


FIGURE 1.9 – Modèle électrique équivalent

L'inductance de fuite est la pour témoigné des fuites des lignes de champs qui ne circulent pas dans le rotor.

Avec  $m = \frac{M_0}{L_{sc}}$  et  $l_{fuites} = L_r - \frac{M_0^2}{L_1}$

On a donc l'impédance équivalente suivante à alimenter :

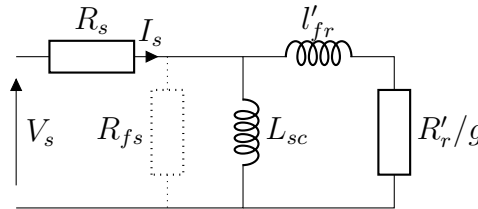


FIGURE 1.10 – impédance équivalente au stator

Avec :

- $l'_{fr} = \frac{l_{fuite}}{m^2}$
- $R'_r = \frac{R_r}{m^2}$ .
- $R_{fs}$  est ajoutable pour prendre en comptes les pertes fertes, qui pourrait alors être considérée linéaire.

#### Détermination des grandeurs du modèle équivalent :

- $R_s$  : Essai en courant continu , on mesure la resistance des bobinages d'une phase du stator.
- $L_{sc}/R_{fs}$  : Essai à vide au synchronisme.  
Lors d'un essai au synchronisme, le champ tournant et le rotor tournent à la même vitesse. Le glissement  $g$  est nul et  $1/g$  tend vers l'infini. Le modèle équivalent d'une phase de la machine devient :

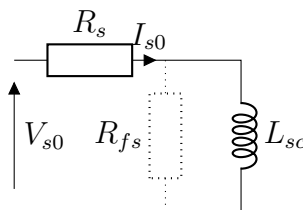


FIGURE 1.11 – Modèle au synchronisme

On mesure la puissance active  $P_0$  et la puissance réactive  $Q_0$  et les courants  $I_{s0}$  et  $V_{s0}$  on obtient les équations :

$$\begin{cases} P_0 = R_s I_{s0}^2 + \frac{V'^2}{R_{fs}} \\ Q_0 = \frac{V'^2}{L_{sc}\omega_s} \\ V' = V_{s0} \frac{R_{fs} L_{sc} \omega}{\sqrt{(R_s R_{fs})^2 + (L_{sc} \omega (R_F + R_s))^2}} \end{cases}$$

$R_s$  étant connue, on peut calculer les trois inconnues :  $R_f, L_{sc}, V'$  Le courant  $I_{s0}$  étant faible lors de l'essai au synchronisme, on peut généralement négliger la chute de tension due à la résistance statorique devant la tension  $V_{s0}$ . Les équations deviennent alors :

$$\begin{cases} P_0 = \frac{V_{s0}^2}{R_{fs}} \\ Q_0 = \frac{V_{s0}^2}{L_{sc}\omega_s} \end{cases}$$

Et on a :

$$\boxed{R_F = \frac{V_{s0}^2}{P_0}} \text{ et } \boxed{L_{sc} = \frac{V_{s0}^2}{Q_0 \omega}}$$

- $l_{fuites}/R_r$  : Essai en nominal, on connaît le glissement :

### 3.2 Bilan de puissance

$$\begin{aligned} P_{transmise} &= \frac{R_r}{g} I_r^2 \\ P_{Joules, rotor} &= R_r I_r^2 \\ P_{meca} &= P_{transmise} - P_{joules} = R_r I_r^2 \left( \frac{1}{g} - 1 \right) \end{aligned}$$

Dans le modèle équivalent on est à  $\omega_s$ . Or dans le rotor les courants sont à  $\omega_r$ . On a alors :  $\omega_r = g\omega_s$  Soit

$$\boxed{g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}}$$

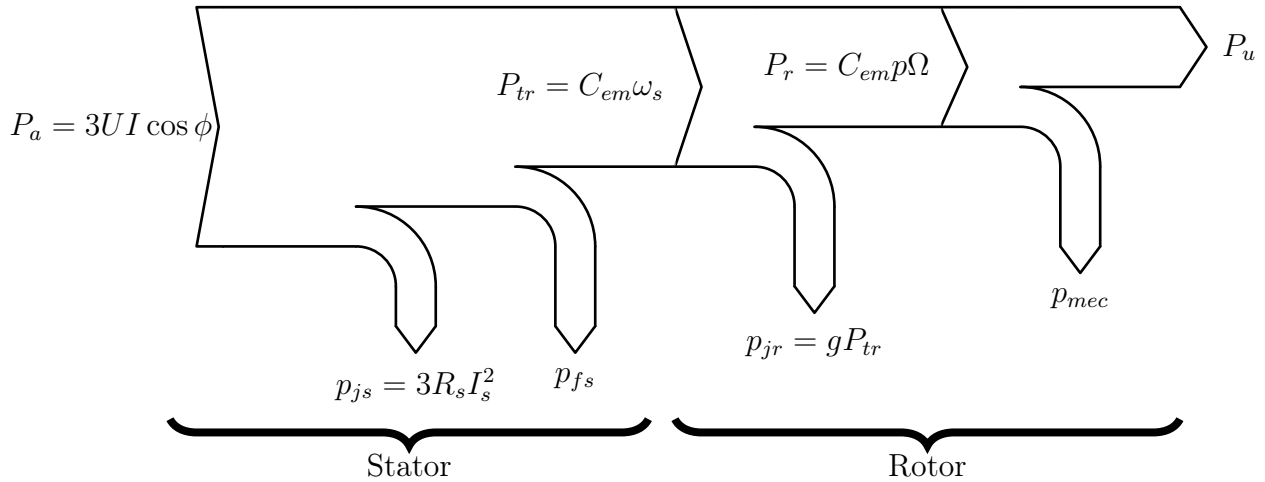


FIGURE 1.12 – Bilan de puissance

**Exemple:** Pour une machine asynchrone , 400V/690V ,1.5kW ,1425 tr/min :

1. La machines est cablé en triangle pour un réseau 400V (entre phase ,230V phase-neutre). Dans le cas d'un réseau 690V on cablera en étoile.
2. En continu on mesure entre deux phase  $R = 3.8 \Omega$ . Quel est la valeur de  $R_s$  ?
3. Pour une machine à vide  $Q_{0T} = 1100 \text{ VAR}$  et  $P_{OT} = 200 \text{ W}$ . Quelle est la valeur de  $L_{cs}$  et de  $R_{fs}$  ?
4. Au point nominal on mesure  $I = 2.9 \text{ A}$  ;  $P_T = 1500 \text{ W}$  ;  $Q_T = 1300 \text{ VAR}$ . Quelle est la valeur de  $l'_{fr}$  et  $R'_r$  ?

### 3.3 Couple et puissance

À partir du modèle déterminé précédemment on a en terme valeur efficaces :

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{g}\right)^2 + (l_{fuites}\omega_s)^2}}$$

#### 3.3.1 Couple en fonction du glissement

On étudie une MAS à  $p$  paire de poles :

$$\Omega = (1 - g) \frac{\omega_s}{p}$$

En faisant le bilan de puissance au rotor on a :

$$P_e = 3 \frac{R'_r}{g} I_r^2 = C_e \Omega$$

On en déduit alors le couple électromagnétique. *en négligeant la resistance du stator* :

$$\begin{aligned}
 C_{em} &= 3p \frac{V_s^2}{\omega_s} \frac{\frac{R'_r}{g}}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + (l_{fuites}\omega_s)^2} \\
 &= 3p \frac{V_s^2}{\omega_s} \frac{1}{\left(\frac{g(l_f\omega_s)^2}{R'_r}\right) + \frac{R'_r}{g(l_f\omega_s)^2}} \\
 &= \frac{3p}{l_f} \frac{V_s^2}{\omega_s^2} \frac{1}{\left(\frac{g(l_f\omega_s)^2}{R'_r}\right) + \left(\frac{R'_r}{g(l_f\omega_s)^2}\right)} \\
 &= 2C_{max} \frac{1}{\left(\frac{g}{g_{max}}\right) + \left(\frac{g_{max}}{g}\right)}
 \end{aligned}$$

Avec

$$\begin{cases} C_{max} = \frac{3p}{2l_f} \frac{V_s^2}{\omega_s^2} \\ g_{max} = \frac{R'_r}{l_f\omega_s} \end{cases}$$

La courbe représentative de l'expression du couple en fonction du glissement possède une symétrie par rapport à l'origine :

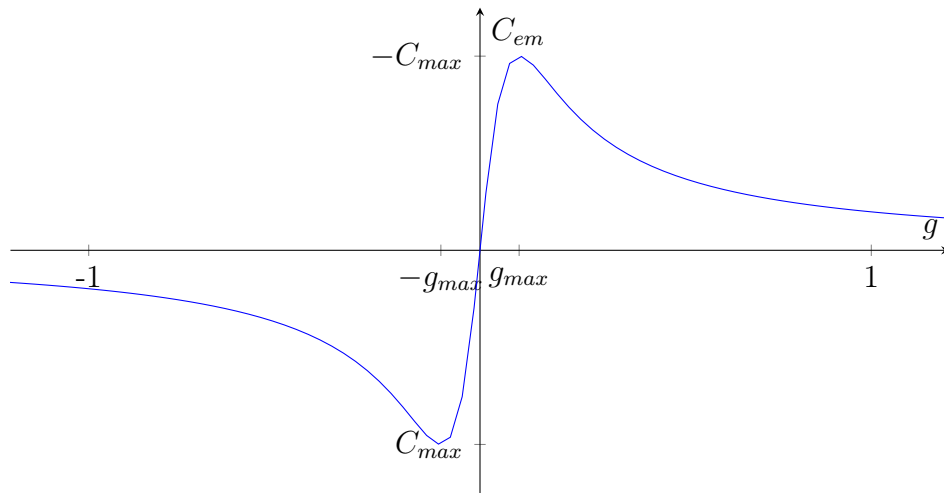


FIGURE 1.13 – Couple en fonction du glissement

Avec la relation glissement vitesse on a :

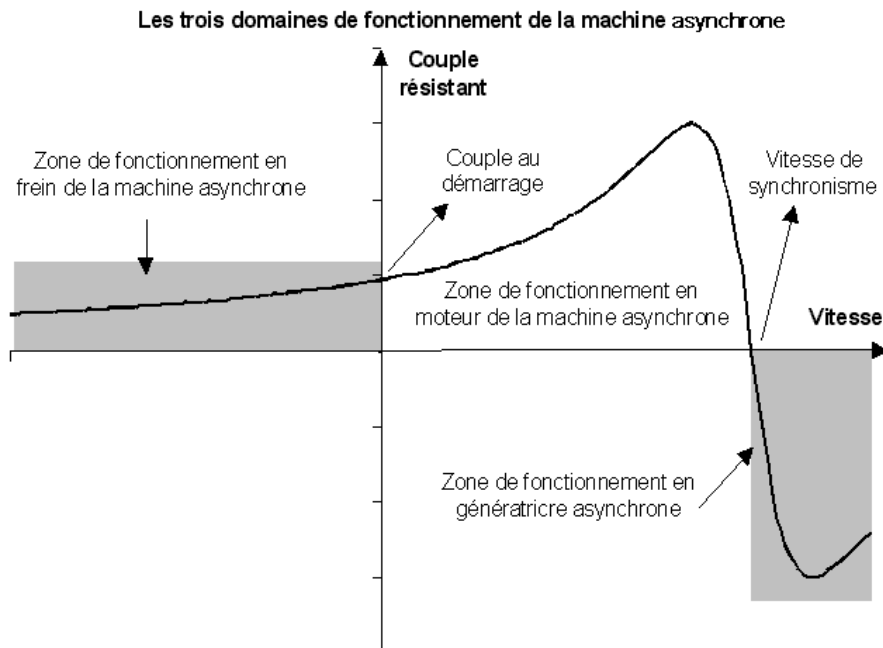


FIGURE 1.14 – Mode de fonctionnement de la MAS

### 3.4 Alimentation par un onduleur

*merci wikipedia*

Les onduleurs les plus répandus sont les onduleurs MLI (à modulation de largeur d'impulsion) dont le mode de commande permet de garder le rapport  $U_1/f$  constant et d'obtenir des courants quasiment sinusoïdaux.  $U_1$  étant la valeur efficace du fondamental.

#### 3.4.1 Commande en $U/f$

**Présentation** En régime sinusoïdal, la conservation du rapport  $U/f$  permet au circuit magnétique d'être dans le même état magnétique quelle que soit la fréquence d'alimentation. Autrement dit, la forme du cycle d'hystérésis parcouru par le circuit magnétique reste identique quelle que soit  $f$ . Ainsi, lorsque la fréquence diminue, la valeur efficace du fondamental de la tension diminuant dans les mêmes proportions, il n'y a pas de risque de saturation du matériau magnétique.

Ceci a pour conséquence qu'une commande qui maintient  $U_1/f$  constant, où  $U_1$  représente la valeur efficace du fondamental, permet de conserver la même courbe de couple en fonction du glissement pour n'importe quelle fréquence d'alimentation. Les autres harmoniques présents, multiples de 5 et 7, créent des couples pulsants dont la moyenne est nulle.

Pour cela, la machine asynchrone est alimentée par un onduleur délivrant une tension de fréquence  $f$  et dont la valeur efficace du fondamental  $V_1$  est telle que le rapport  $V_1/f$  est maintenu constant

**Mise en équation** On reprend l'équation générale du couple :

$$C_{em} = \frac{3p}{\mathcal{N}_r} \cdot \frac{V_S^2}{\omega_S^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g\mathcal{N}_r\omega_S}{R_r^*}\right) + \left(\frac{R_r^*}{g\mathcal{N}_r\omega_S}\right)}$$

On note  $C_{max}$  le couple maximal.

$$C_{max} = \frac{3p}{2 * \mathcal{N}_r} \cdot \frac{V_S^2}{\omega_S^2}$$

On réécrit la relation flux/tension afin de faire apparaître le flux.

$$\frac{d\Phi_A}{dt} = j\omega_S * \Phi_A = V_A$$

On note  $\Phi_s$  la valeur efficace du flux nominal.

$$C_{max} = \frac{3p}{2 * \mathcal{N}_r} \cdot \Phi_s^2$$

Si on garde le rapport  $\frac{V_S}{\omega_S}$  constant, il est donc possible de déplacer la vitesse à laquelle  $C_{max}$  est disponible. L'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{2C_{max}}{\left(\frac{g\mathcal{N}_r\omega_S}{R_r^*}\right) + \left(\frac{R_r^*}{g\mathcal{N}_r\omega_S}\right)}$$

Après un *développement limité* au premier ordre de  $C_{em}$  lorsque  $g$  tend vers 0, on obtient :

$$C_{em} = C_{te} \cdot g \cdot \omega_S = C_{te} \cdot (\omega_S - \omega) = C_{te} \cdot (n_S - n)$$

## 4 La machine asynchrone a double alimentation

Pour une machine asynchrone a double alimentation on injecte (ou récupère) des courants au rotor, qui n'est plus en court-circuit (mais connecté à un système de bague/balais). Le modèle électrique est alors :

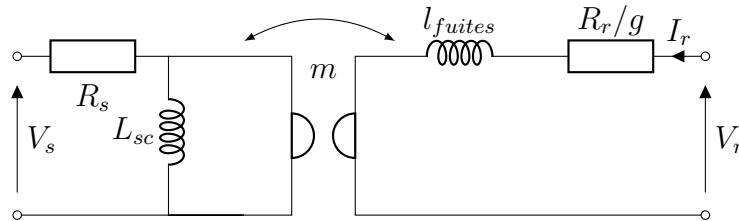


FIGURE 1.15 – Modèle électrique équivalent

## 5 La machine asynchrone en génératrice



# Chapitre 2

## Production d'électricité d'origine non nucléaire

*Dans ce chapitre on donne un état des différentes productions d'énergie électriques, pas de calcul, juste de la recopie de slides*

### 1 Les différentes sources d'énergies pour l'électricité

#### 1.1 Rappels

##### 1.1.1 Unités

##### Puissance

- 
- $1 \text{ ch} = 735 \text{ W}$

##### Énergie

- 1 tonne équivalente pétrole (tep) =  $11\,628 \text{ kWh} = 41.8 \text{ GJ} = 7.33 \text{ barils de pétroles}$
- 1 baril de pétrole =  $150 \text{ L} = 5.6 \text{ GJ} = 1580 \text{ kWh}$
- $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$
- $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

##### Conversion d'énergie

#### 1.2 Les énergies non renouvelable

##### Définition

Une énergie non renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle moins vite qu'on ne la consomme et de manière négligeable à l'échelle humaine.

### 1.2.1 Les énergies fossiles

Environ 80% de l'énergie consommée dans le monde est d'origine fossile. On distingue :

- le charbon (24%)
- le pétrole (35%)
- le gaz naturel(21%)

ces ressources permettent d'assurer la plupart des moyens de transports, le chauffage, et production d'électricité et de chaleur (avec éventuellement cogénération<sup>1</sup>)

### 1.2.2 Les énergies nucléaires

- Par des réactions de fissions 6% énergie primaire consommée dans le monde. 15% de la production mondiale.

**Remarque:** Une ressource potentiellement illimité avec des technologies de neutrons rapides (ex : super phénix en france)

- Par des réacteur de fusion , pour la fin du 21ème siècle.

### 1.2.3 Problématique actuelle

Un double problème :

1. Raréfaction des ressources et dépendance
  - Ressources carbonées fossiles : charbon
  - nucléaire : Uranium (neutrons lents) 200 ans. neutrons rapide, >5000 ans.
  - Problème géopolitique de la dépendance, 50% de l'énergie consommée au sein
2. Des conséquences écologiques à limiter
  - Limitation des émissions de gaz à effet de serre (380 ppm en 2008, >550 ppm en 2035) pour limiter le réchauffement climatique anthropique.
  - Gestion des déchets nucléaires

## 1.3 Les énergies renouvelable

C'est la suite du cours.

1. Énergie hydraulique
2. Énergie éolienne  
*étudié dans le chapitre 3*
3. Énergie solaire
  - a) Le chauffage solaire
  - b) Les centrales électriques solaires (thermodynamique, avec cogénération)
  - c) Le photovoltaïque (*étudié dans le chapitre 4*)
4. Géothermie

- 
1. récupération de la chaleur pour le réseau urbain d'eau chaude

- a) La production directe de chaleur (ex aquifère de Cachan)
- b) La production d'électricité
- c) Les pompes à chaleur

5. La biomasse

- a) Les bio-carburants
- b) Le biogaz
- c) Le bois

## 2 L'hydroélectricité

### 2.1 Sur terre

#### 2.1.1 Les prémices

#### 2.1.2 Les grandes centrales hydroélectriques

1. Avantages :

- Le caractère intermittent est contrôlé
- Inondation évitée en aval
- Irrigation
- Tourisme

2. Inconvénients :

- Vallée noyée (village et terre agricoles)
- Risque d'inondation catastrophique en aval si rupture
- Bloque la remontée des poissons
- Se remplit petit à petit
- Prive de sédiment le cours d'eau en aval

#### 2.1.3 La petite hydroélectricité

### 2.2 En mer

#### 2.2.1 Les marées : prémices

- Usine marémotrice de la rance ouverte en 1966 240 MW, 550 GWh/an
- Sihwa (Corée du Sud, 258 MW)

#### 2.2.2 Les courants permanents

#### 2.2.3 La houle

# Chapitre 3

## L'éolien : principe physique

### 1 Quelques chiffres

*Cf poly*

*Beaucoup de donnée disponible dans le poly, encore plus sur le site de RTE.*

#### Définition

Le *facteur de charge* ou facteur d'utilisation d'une centrale électrique est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période.

### 2 Caractérisation du vent

De façon à étudier le potentiel éolien d'un site il convient de connaître la source d'énergie : le vent. Ces renseignements sont donnés par :

- la rose des vents
- la distribution des vitesses
- La dépendance en fonction de l'altitude

#### 2.1 La rose des vents

#### 2.2 La distribution des vitesses

#### 2.3 Dépendances de la vitesse du vent avec l'altitude

Les frottement avec la surface terrestre font que la vitesse du vent varie en fonction de l'altitude. La loi empirique suivante permet de prendre en compte cette dépendance.

$$\frac{V}{V_{ref}} = \left( \frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha$$

Avec

**H** hauteur

$\alpha$  coefficient permettant de prendre en compte la rugosité du terrain.

Mer calme	$\alpha = 0,09$
prairie	$\alpha = 0,16$

## 2.4 Énergie cinétique d'une colonne de vent

L'énergie cinétique d'une colonne de vent de masse  $m$  se déplaçant à la vitesse  $V$  s'écrit :

$$E_c = \frac{1}{2}m.V^2$$

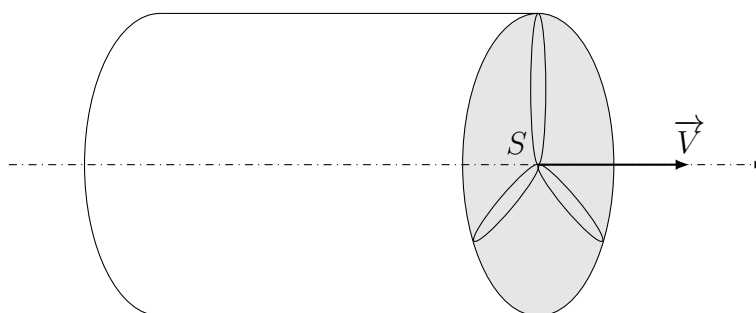


FIGURE 3.1 – Colonne de vent

En supposant qu'en sortie de l'éolienne la vitesse de cette colonne soit nulle, il serait possible de récupérer dans l'intervalle de temps  $dt$  l'énergie élémentaire :

$$dE_c = \frac{1}{2}dmV^2$$

où  $dm$  représente la masse ayant traversé la surface  $S$  pendant le temps  $dt$ . Soit  $dm = \rho SV dt$  avec  $\rho 1.225 \text{ kg/m}^3$  masse volumique de l'air dans les conditions normale de pression et de température.

$$dE_c = \frac{1}{2}\rho SV^3 dt$$

On fournit alors une puissance :

$$P_{E_c} = \frac{1}{2}\rho SV^3$$

## 2.5 Potentiel éolien d'un site

Connaissant l'histogramme des vitesses sur un site il est possible de calculer la contribution pour que chaque vitesse de vent à l'énergie cinétique sur 1 an. Le principe de calcul est le suivant :

- Un vent de  $5 \text{ m s}^{-1}$  souffle 22% du temps, soit 1927 h/an.
- La puissance par unité de surface s'écrit :  $\frac{P_{E_c}}{S} = \frac{1}{2}\rho V^3 = 76.5 \text{ W/m}^2$

- La contribution de cette vitesse à l'énergie est donc :

$$\left( \frac{W_{E_c}}{S} \right)_{V=5m/s} = 150 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

Pour avoir l'énergie théorique sur un an et par unité de surface, il suffit de sommer les différentes vitesses

$$\frac{W_{E_c}}{S} = 821 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$$

pour une éolienne balayant une surface de  $100 \text{ m}^2$ , l'énergie de la veine de vent sur un an serait  $W_{E_c} = 82\,100 \text{ kWh}$ . Comme le montrerons les parties suivantes, l'énergie convertie sera beaucoup faible et représentera environ 50% de l'énergie du vent.

## 2.6 Potentiel éolien en France

*bullshit.*

## 3 Les différents types de turbines

*bullshit*

## 4 Conversion d'énergie cinétique, mécanique

### 4.1 Limite de Betz

Dans le chapitre concernant le vent, nous avons montré en supposant qu'en sortie de l'hélice la vitesse de la colonne de vent soit nulle, qu'il serait possible de fournir une puissance :  $P_{E_c} = \frac{1}{2} : \rho S V^3$ . Les particules constituant l'air ne pouvant disparaître en sortie de l'hélice il y aura une limite à cette puissance. Albert Betz (1919) a démontré en supposant l'écoulement de l'air incompressible que le transfert est limité.

#### **Proposition (*Limite de Betz*)**

En considérant un écoulement incompressible sur la turbine on peut *au maximum* extraire de la puissance du vent :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{E_c}$$

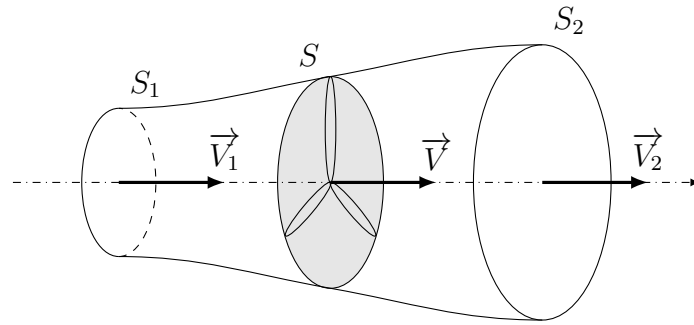
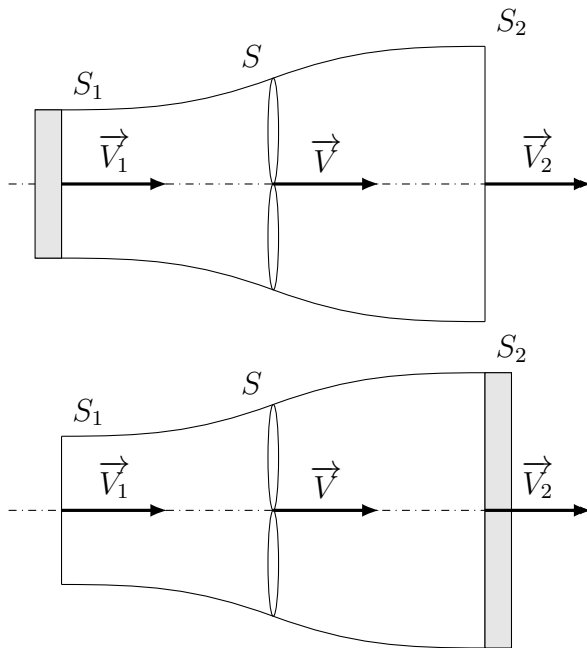


FIGURE 3.2 – Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur



- À l'instant  $t$  la quantité de mouvement de la veine de vent s'écrit :

$$\begin{aligned} p(t) &= p_{ABEF} + p_{BCDE} \\ &= d_n v_1(t) + p_{BCDE} \end{aligned}$$

- À l'instant  $t + dt$  la quantité de mouvement de la veine de vent s'écrit :

$$\begin{aligned} p(t) &= p_{CGDH} + p_{BCDE} \\ &= d_n v_2(t) + p_{BCDE} \end{aligned}$$

Le débit se conservant et l'écoulement étant supposé incompressible, la masse élémentaire  $dm$  est la masse qui traverse la surface  $S$  pendant  $dt$ . Soit :

$$\frac{dm}{dt} = \rho S v = \rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2$$

En régime permanent, la variation de la quantité de mouvement durant le temps  $dt$  s'écrit :

$$dp = p(t + dt) - p(t) = \rho S v dt (v_2 - v_1)$$

On en déduit que la puissance cédée à l'hélice est donnée par la relation :

$$P = \rho S v^2 (v_2 - v_1)$$

Cette puissance peut aussi être déterminée en effectuant un bilan d'énergie sur la veine de vent. La variation d'énergie cinétique entre les instants  $t$  et  $t + dt$  s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2)$$

Soit

$$P = \frac{\rho S v}{2} (v_2^2 - v_1^2)$$

En égalisant les deux expressions de la puissance transférée à l'hélice

$$\rho S v^2 (v_2 - v_1) = \frac{\rho S v}{2} (v_2^2 - v_1^2) \implies \boxed{v = \frac{v_1 + v_2}{2}}$$

On en déduit une autre expressions de la puissance ne faisant intervenir que les vitesses avant et après l'hélice.

$$P = \frac{\rho S}{4} (v_1 + v_2) (v_2^2 - v_1^2)$$

pour une vitesse  $v_1$  donnée cette puissance passe par un maximum quand  $\frac{dP}{dv_2} = 0$ . Et le maximum est donnée par l'expression :

$$P = -\frac{16}{27} \underbrace{\frac{\rho S v_1^3}{2}}_{P_{incident}} \text{ pour } v_2 = \frac{1}{3} v_1$$

## 4.2 Théorie Simplifiée de la pale

On considère une hélice constituée de pales formée de plaques. On note :

- $v$  la vitesse du vent réel.
- $\Omega$  la vitesse de rotation de l'hélice.

On cherche à déterminer la contribution à la puissance et au couple moteur de l'élément de pale situé à une distance  $r$  de l'axe de rotation.

Pour ce tronçon élémentaire, on note :

- $l$  : largeur
- $dr$  : longueur
- $\beta$  : angle de calage

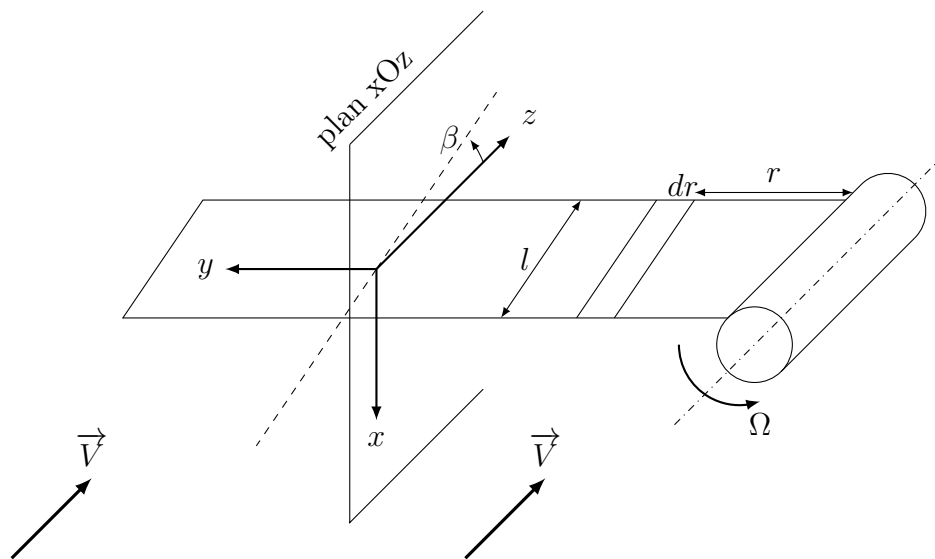


FIGURE 3.3 – hélice simplifiée



Cet élément est soumis au vent réel ( $\vec{V}$ ) et à un vent dû à la rotation de l'hélice ( $-\vec{V}_x$ ) avec  $v_x = \Omega r$ . La somme vectorielle de ces deux vents donne le vent apparent noté  $V_a$ .

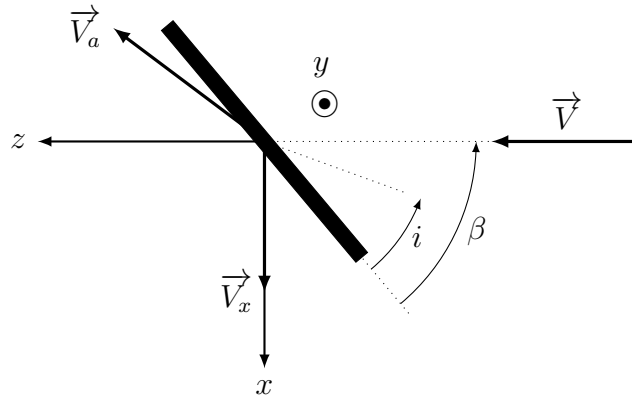


FIGURE 3.4 – Vue de l'élément de pale dans le plan xOz

On définit l'angle d'incidence  $i$  comme l'angle entre le vent vu par l'élément de pale ( $\vec{V}_a$ ) et la pale. Pour un angle de calage  $\beta$  donné, cet angle est fonction de la vitesse du vent et de la vitesse due à la rotation  $V_x$ . On a donc  $\vec{V}_a = \vec{V} - \vec{V}_x$  soit :

$$\begin{cases} V_a = \sqrt{V^2 + (r\Omega)^2} \\ i = \beta - \arctan\left(\frac{r\Omega}{V}\right) \end{cases}$$

On pose  $\lambda = \frac{r\Omega}{V}$  vitesse spécifique du tronçon et on a par exemple l'allure suivante :

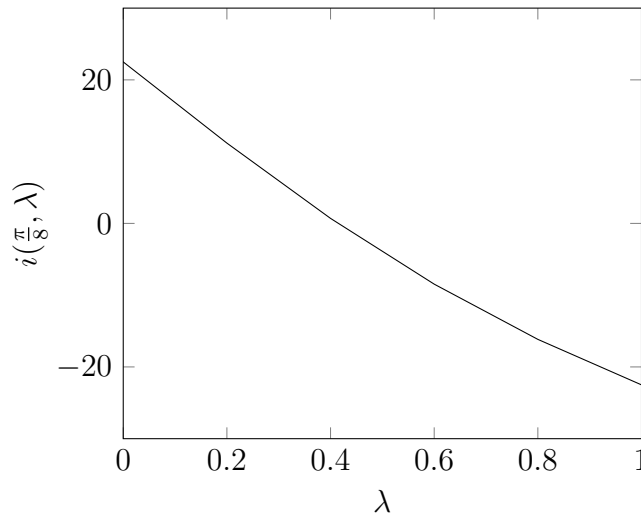


FIGURE 3.5 – Variation de l'angle d'incidence en degré en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour un angle de calage  $\beta = \frac{\pi}{8}$ .

La figure 3.5 représente l'évolution de l'angle d'incidence en fonction de la vitesse spécifique pour un angle de calage donnée. Pour un angle de calage donné et à vitesse de vent donnée, l'angle d'incidence diminue lorsque la vitesse de rotation ou le rayon augmente. Pour un angle de calage et une vitesse de rotation donnés, l'angle d'incidence augmente lorsque la vitesse du vent augmente.

**Proposition**

En négligeant les effets des frottements, il s'exerce sur cet élément une force de pression ( $dR$ ) perpendiculaire à la surface (analogue à la force de pénétration d'un véhicule dans l'air) dont le module s'écrit :

$$dR = kV_a^2 . dS'$$

où  $dS'$  représente la surface de la pale offerte au vent :

$$dS' = l . \sin(i) . dr$$

d'où :

$$dR = kV_a^2 . l \sin(i) dr$$

Il est d'usage de décomposer cette force ( $dR$ ) en :

- une force dans la direction du vent apparent ( $dT$ ) appelée traînée,
- une force perpendiculaire à la direction du vent apparent ( $dP$ ) appelée portance.

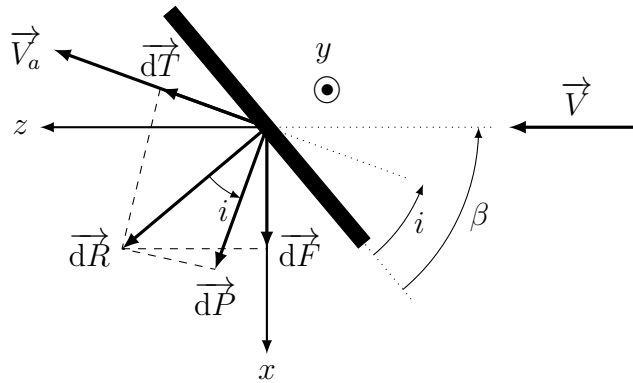


FIGURE 3.6 – Force motrice  $dF$

On en déduit :

$$\begin{cases} dT = dR \sin(i) = kV_a^2 . l \sin(i)^2 dr \\ dP = dR \cos(i) = kV_a^2 . l \sin(i) \cos(i) dr \end{cases}$$

On définit les coefficient de portance  $C_L$ <sup>1</sup> et de traînée  $C_D$ <sup>2</sup>

$$\begin{cases} dT = \frac{1}{2} \rho C_D V_a^2 l . dr \\ dP = \frac{1}{2} \rho C_L V_a^2 l . dr \end{cases}$$

1. L comme lift  
2. D comme drag

**Proposition**

Dans notre cas les coefficients de trainée et portance sont donc :

$$C_D = \frac{2k}{\rho} \sin(i)^2 \text{ et } C_L = \frac{2k}{\rho} \sin(i) \cos(i)$$

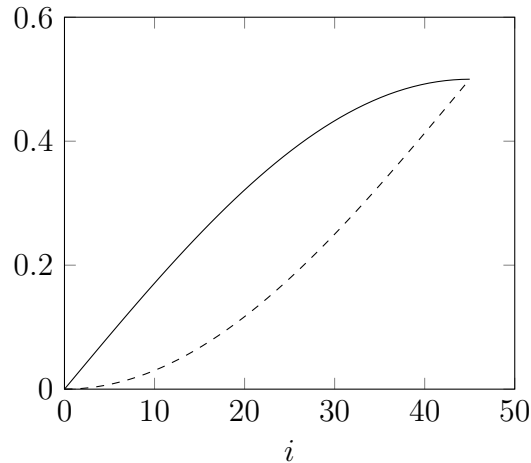


FIGURE 3.7 – Variation des coefficient de portance et de trainée en fonction de l'angle d'incidence

Les deux forces élémentaires  $dT$  et  $dP$  vont engendrer une force motrice  $dF$  et un couple élémentaire :

$$dC = r \cdot dF = r (dP \cdot \cos(\beta - i) - dT \cdot \sin(\beta - i))$$

On en déduit que la contribution de cet élément à la puissance mécanique est donnée par la relation :

$$dP_m = dC\Omega = \frac{1}{2} \rho r V_a^2 \Omega \cdot l (C_L(i) \cdot \cos(\beta - i) - C_D(i) \cdot \sin(\beta - i)) dr$$

où

$$V_a^2 = V^2 + (\Omega r)^2$$

et

$$i = \beta - \arctan\left(\frac{r\Omega}{V}\right)$$

La figure suivante représente l'allure de la contribution à la puissance mécanique de ce tronçon pour un angle  $y$  de calage et une vitesse de vent donnés.

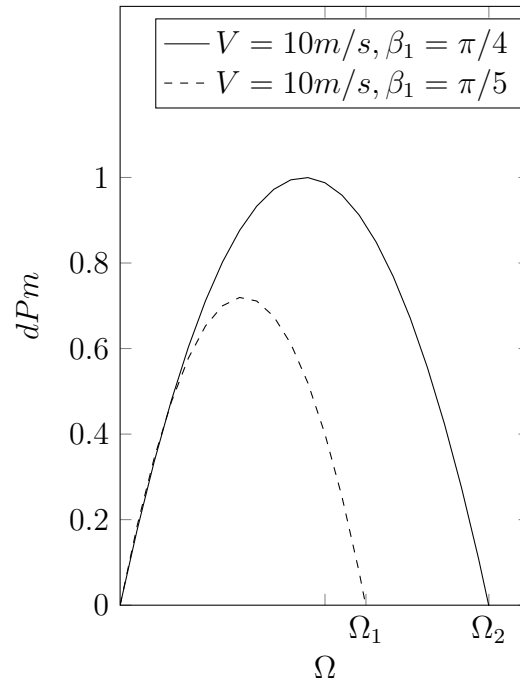


FIGURE 3.8 – Évolution de la puissance en fonction de la vitesse angulaire de rotation pour un angle de calage donné et deux vitesses de vent

À vitesse de vent donnée, la puissance passe par un maximum qui dépend de la vitesse du vent. Cette puissance s'annule pour un angle ( $i$ ) d'incidence nul, soit encore pour :  $\Omega = \frac{V}{r} \tan(\beta)$

**Remarque:**

- Il faudrait pouvoir adapter la vitesse de rotation de l'hélice à la vitesse du vent pour optimiser la conversion d'énergie cinétique en énergie mécanique.
- La vitesse angulaire correspondant au maximum de puissance dépend de la vitesse du vent mais aussi de  $r$  (position du tronçon de pale par rapport à l'axe de rotation). Il est donc nécessaire de vriller le profil de la pale ( $\beta$  est fonction de  $r$ ) pour optimiser la conversion.
- Le calcul de la puissance totale se fait en intégrant la puissance élémentaire de 0 à  $R$ , rayon de l'hélice :

$$P_m = \int_0^R dP_m$$

### 4.3 Pale réelle

### 4.4 Comparaison des différents types de turbines

### 4.5 Réglage de la conversion

### 4.6 Exemple de caractéristiques

# Chapitre 4

## Physique de la conversion électrovoltaïque

### 1 Origine de l'énergie solaire

L'énergie provient du rayonnement émis par le soleil après avoir parcouru jusqu'à la Terre distante de  $1.496 \times 10^{11}$  m.

#### 1.1 Constitution du Soleil

Le soleil (de rayon  $R_s = 1.392 \times 10^9$  m) peut se décomposer en trois couches :

**1. Le coeur :**

C'est là qu'a lieu la réaction nucléaire de fusion qui libère (beaucoup) d'énergie. Cette zone occupe un quart du rayon solaire, et possède une température de 15 millions de Kelvin. On estime que 4.26 tonnes de matière y sont consommées chaque seconde pour  $383 \times 10^{15}$  GW de puissance. C'est un processus autorégulé (le soleil ne va pas s'effondrer ou exploser dans les années qui viennent).

**2. La zone de radiation :**

La zone de radiation entre 0.25 et 0.7 du rayon solaire, très dense (98% de la masse du soleil). Les atomes d'hydrogène et hélium ionisés émettent des photons absorbés par d'autres ions par convection thermique.

**3. La zone de convection :** Échange thermique par convection amenant la chaleur vers l'extérieur, on passe de 2 millions à 5800 K. La photosphère produit le rayonnement solaire, épaisse d'environ 400 km et de température moyenne 5781 K.

#### 1.2 Rayonnement produit et loi utiles

Le rayonnement produit par le soleil a les caractéristiques d'un corps noir :

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(\beta h\nu) - 1} \text{ ou encore } B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\beta hc/\lambda) - 1}$$

Ces expressions se simplifient en faisant des hypothèses sur les niveaux d'énergies :

- Loi de Rayleigh-Jeans  $h\nu \ll kT$  :  $B_\nu^{RJ}(T) = \frac{2\nu^2}{c^2} kT$
- Loi de Wien  $h\nu \gg kT$  :  $B_\nu^W(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \exp(-\frac{h\nu}{kT})$

La puissance surfacique reçue en fonction de la température est elle d'après la loi de Boltzmann :

$$P_s = \sigma T^4$$

### 1.3 Notion d'Air-Masse

#### Définition

On nomme *air-masse* l'épaisseur atmosphérique effectivement traversée normalisée à l'épaisseur traversée jusqu'au niveau de la mer pour un soleil au zénith, en condition normale de pression:

$$m = \frac{P}{1013} \frac{1}{\sin(\alpha)} \exp\left(\frac{-z}{7.8}\right)$$

- $P$  : Pression atmosphérique en hPa ou millibar
- $\alpha$  : élévation du soleil sur l'horizon
- $z$  : altitude en km (7.8 km est l'épaisseur moyenne de l'atmosphère)

On définit alors les conditions d'ensoleillement par les lettres AM suivi de  $m$  :

- AM0 correspond aux conditions hors atmosphère
- AM1 au sol lorsque le soleil est au zénith
- AM2 au sol lorsque le soleil est à  $30^\circ$  sur l'horizon.

En pratique le flux reçu ne dépasse  $1000 \text{ W/m}^2$  ( $1367 \text{ W/m}^2$  pour AM0). Les conditions standard de qualification des cellules sont un spectre AM1.5, une puissance incidente de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

*blabla sur le rayonnement direct et indirect*

## 2 Principe de la conversion : la cellule photovoltaïque

### 2.1 Historique

Le développement de l'exploitation de l'énergie solaire s'est fait au long des découvertes scientifiques majeures du XIXème et XXème siècle :

**1839** Découverte de l'effet photovoltaïque par Antoine Becquerel sur un couple électrochimique

**1877** 1ère cellule PV au sélénium

**1954** 1ère cellule PV au silicium rendement de 4,5% à 6%.

**1955** 1ère commercialisation de cellule PV 14mW (2%).

**1958** Satellite Vanguard-1 avec des cellules PV qui fonctionnent pendant 8 ans.

**Années 60** Montée des rendements et puissances.

**1963** Japon : 242 W sur une maison

**1970** Mission Solar One (Université du Delaware)

**1981** Premier avion Solaire "Solar Challenger" Paris-Manston (Angleterre) 262km.

## 2.2 La jonction PN

*cf UE 232*

## 2.3 Effet photovoltaïque

Un photon suffisamment énergétique peut créer une paire électron/trou dans la zone de transition, contribuant ainsi à augmenter le courant inverse (contribution du courant de génération-recombinaison).

Il faut pour cela que l'énergie du photon soit supérieure à l'énergie de gap (Pour le silicium  $E_g = 1.1\text{eV}$ ).

## 2.4 La photodiode

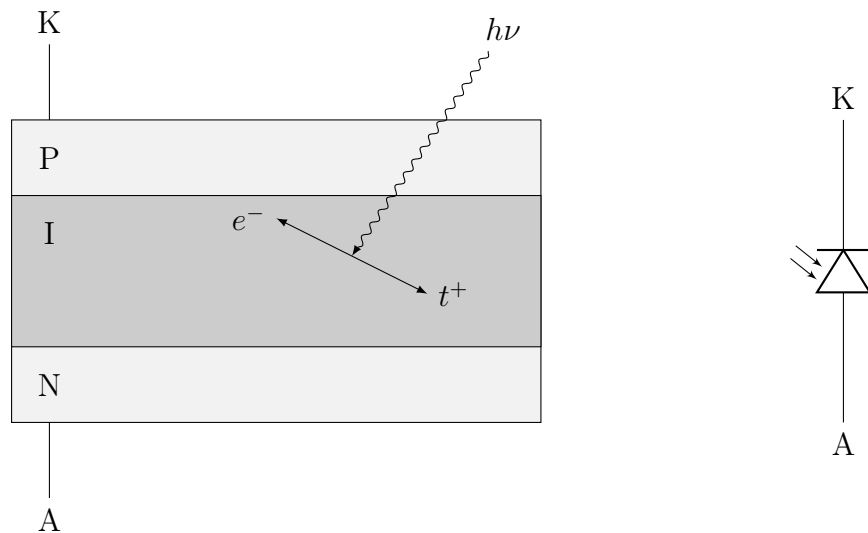


FIGURE 4.1 – Schéma de la photodiode

Pour des photon d'énergie  $E = h\nu$  on crée un courant :

$$I_{ph} = q_e \eta \phi_p = q_e \eta \frac{\lambda}{hc} \phi_e$$

où

- $q_e$  charge électrique.
- $\eta$  rendement quantique.
- $\phi_p$  flux de photon reçu par la photodiode.

### 2.4.1 Caractéristique courant-tension

#### Proposition (*Rappel sur la diode*)

- Une étude théorique (développé dans le cours UE 232 de Saphire) permet de montrer que la caractéristique de la diode en convention générateur :

$$I_d = -I_s \left( \exp \left( \frac{q_e V}{kT} \right) - 1 \right)$$

On a typiquement  $I_s = 10 \times 10^{-12} \text{ A cm}^{-2}$  et  $k = k_B = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

- En ajoutant le courant issus de la création de la paire électron trou on a le courant d'une photodiode :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{q_e V}{kT} \right) - 1 \right)$$

### 2.4.2 Schéma équivalent d'une photodiode

On peut construire le schéma équivalent :

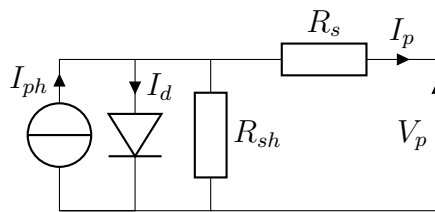


FIGURE 4.2 – Schéma équivalent

Avec :

- Résistance de contact et connexion :  $R_s = 5 \text{ à } 20 \text{ m}\Omega$
- Fuite de courant aux bords de la jonction :  $R_{sh} = 20 \text{ à } 200 \Omega$

## 2.5 Devenir des photons

quand un photon frappe un matériaux de silicium il peut se produire trois phénomènes :

- Le photon peut traverser le silicium (photon à faible énergie)
- Le photon peut se réfléchir sur la surface (30% silicium, descend à 3% avec une couche anti reflet)
- Le photon peut être absorbé par le matériau. Si l'énergie du photon est supérieur à l'énergie de gap celui ci génère une paire électron trou et un échauffement.

**Remarque:** Les photons UV ne génère qu'une seule paire d'électron-trou, le reste de l'énergie est convertie en chaleur. Ce qui représente environ 28% de perte de l'énergie incidente.



## 2.6 Rendement

La répartition spectrale de la puissance émise par le soleil est telle qu'elle est constituée majoritairement de photon possédant une énergie supérieure à la bande interdite du silicium (1.1eV). L'énergie en excès est convertie en chaleur (photons : AM1.5 25% en théorie).

Le rendement maximal théorique est de 50% à AM1.5.

### **Proposition**

En pratique 25% de l'énergie du rayonnement solaire est convertie en électricité utile.

## 2.7 Caractéristique du générateur

### **Définition**

La cellule photovoltaïque est un générateur élémentaire à courant continu qui convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

La tension est basse car inférieure à la tension de polarisation directe de la jonction (0.5 V à 0.8V pour le silicium)

### **Proposition**

La puissance crête pour une cellule 10cm x 10cm est de l'ordre du Watt : 0.6V , 5A soit 3W pour du silicium monocristallin.

## 3 Mise en oeuvre

On assemble différents éléments photovoltaïque en série et parallèle pour augmenter la tension et (resp.) le courant disponible.

Les cellules solaires utilisent des matériaux sous différentes formes, avec de différents rendements :

### 3.1 Caractéristique d'une cellule

# Chapitre 5

## Éléments de modélisation d'un ensemble habitation individuelle – véhicule électrique – Réseau électrique

*Cette partie du cours est construit collaborativement avec M. Hoang et les élèves de l'UE 414.*

### Construction du plan du cours

On s'intéresse d'abord au réseau électrique

- Smart grid
- Gestion du réseau
  - pertes
  - Transfert P Q
  - Équilibrage (phase, tension, courant)
- (adaptation des lois de Kirchhoff)
- DC vs (et ?) AC

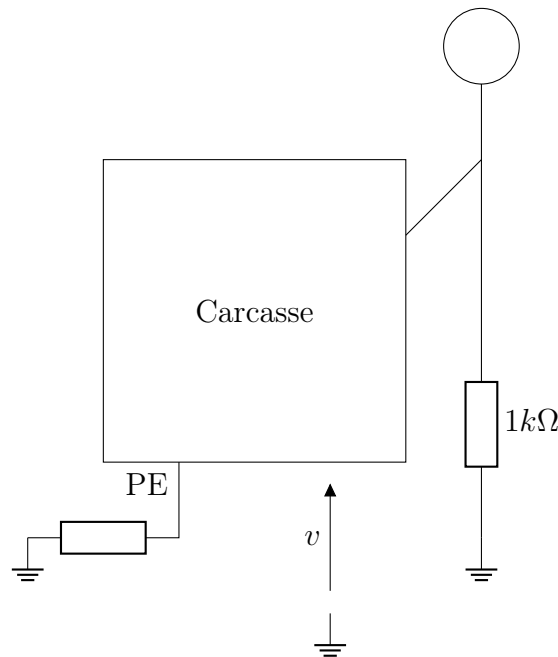
Lien de recherches :

- <http://server.idemdito.org/electro/elec/gen/couplage.htm>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A9\\_de\\_Park](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A9_de_Park)
- 

**Objectif du cours :** Pouvoir comprendre et expliquer ce qui constitue le schéma distribué.

### 1 Cours 1 - Introduction

*Beaucoup de questions et de réponses pour cerner les besoins et interrogations de la classe*



**La terre électrique**

## 30 mA : courant mortel pour l'homme

*E. H est très chagriné que nous quittions le département EEA avec nos faibles connaissances en conversion d'énergie que nous constatons aujourd'hui*

**De la création de l'alternatif** Tesla, Westing House, Edison, L'alternatif a pris le dessus, notamment grâce à l'industrialisation de la fabrication des transformateurs, qui permettent de convertir (abaisser ou élever) tensions et courants de manière simple et reproductible. L'alternatif a également un intérêt pour l'ouverture/fermeture des interrupteurs.

**De la création du neutre** dessin à rajouter. La création du neutre a lieu dans les transformateurs d'adaptation du réseau :

- primaire : triphasé "triangle" .
- secondaire : triphasé étoile avec un 4ème fil qui ressort : le neutre.

**Des voitures électriques** C'est le futur. Beaucoup d'application de l'EEA (traitement du signal prédiction ). Technologies à suivre : Vehicule2Grid Vehicule2Home.

**De l'importance des TP** Les TP ont pour but de vérifier expérimentalement les notions théoriques vues en cours, les comparer, chercher à étudier la différence entre modèle théoriques, simulation numériques et relevé expérimentaux. + suite du cours 2

## 2 Cours 2

**Problématique** Quelles sont les propriétés du courant au abords des maisons ? Comment modéliser le réseau alternatif basse tension (réseau domestique) ?

Il n'y a pas ou peu de capteur de courant sur le "réseau". Le réseau : 220 000 transformateurs "domestiques" , on alimente les foyers français en boucle ouverte. Il existe aussi 4000 poste

sources (très haute tension vers moyenne haute tension) Sur le réseau l'enjeu est de connaître en temps réel l'état du système pour adapter la gestion de puissance .

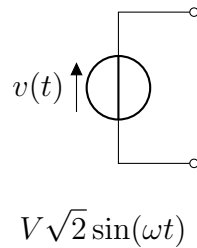


FIGURE 5.1 – Réseau alternatif BF

## 2.1 Convertisseur DC- AC

Comment transfère l'énergie d'une batterie au réseau ? *cf cours de 411 (NB : le poly de 411 n'est pas encore fini)*

Un convertisseur d'électronique de puissance ne permet que de relier des sources de natures différentes (cf règle d'associations des sources)

schéma onduleur. schéma bloc asservissement

Structure de commande : Hysteresis (en TP) ou autre

## 2.2 Convertisseur DC-DC

*cf cours de 233 pour plus d'équations*

Application : convertisseur panneau photovoltaïque / bus DC

Il existe deux grandes familles de structures selon la nature "électrique" des sources et des charges.

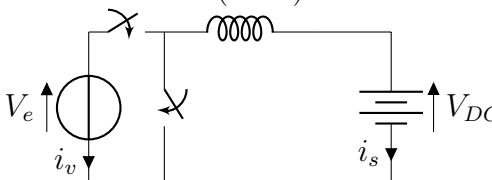
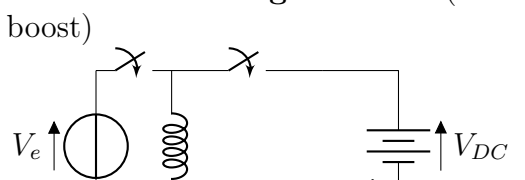
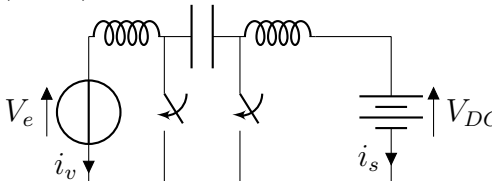
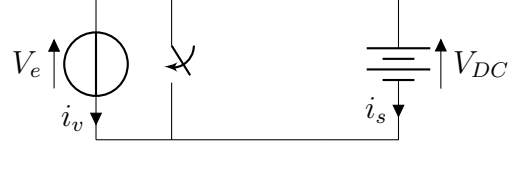
- **Structure à transfert direct d'énergie**

On associe deux "sources" de nature différentes (source de tension et de courant ou l'inverse).

- **Structure à transfert indirect d'énergie**

On associe deux "sources" de même natures. L'énergie de la première "source" est stockée dans un élément de stockage puis destockée dans la deuxième "source".

## 2.3 Synthèse de convertisseur

E/S	courant	tension
tension	<b>hacheur série (buck)</b>  $V_{DC} \leq V_e$	<b>Hacheur à stockage inductif (Buck-boost)</b>  $ V_{DC}  < V_e \text{ ou } > V_e$
courant	<b>Hacheur à stockage capacitif (Cuck)</b>  $ V_{DC}  < V_e \text{ ou } > V_e$	<b>hacheur parallèle (boost)</b>  $V_{DC} \geq V_e$

### Remarque:

Si la cellule de commutation est non réversible en courant (association transistor+diode), il existe deux mode de fonctionnement (mode de conduction) :

- Conduction continue (CC)
- Conduction discontinue (CD)

**Remarque:** Dans notre étude la charge est remplacée par une *batterie*, connecté à un bus DC, ainsi la tension  $V_{DC}$  est imposée!  $R \simeq 0$ .

### 2.3.1 Hacheur (buck)

#### Proposition

Dans le cas d'un hacheur buck on a :

$$\langle V_e \rangle = \frac{V_{DC}}{\alpha}$$

### 2.3.2 Hacheur (boost)

**M. Hoang** sort du cours a 9h10 pour 10min pour que nous decidions ce que l'on doit faire. 9h33 il n'est toujours pas la

**Proposition**

Dans le cas d'un hacheur boost on a :

$$\langle V_e \rangle = (1 - \alpha)V_{DC}$$

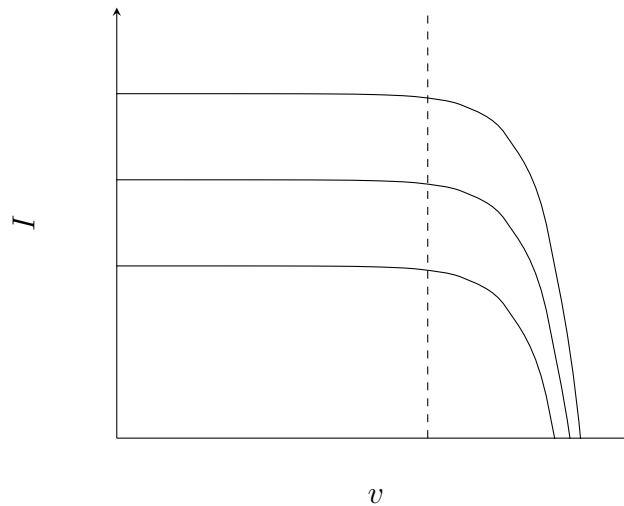


FIGURE 5.2 – Point de fonctionnement

### 3 Cours 4

### 4 Ressources intéressantes :

- <http://www.epsic.ch/cours/electronique/techn99/elnthcircuit/cidectxt.html>
- Podcast France culture mercredi 20/03 : “la méthode scientifique”
- Équilibrage du réseau :  
[http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier\\_gabriel/Electrotechnique/Chap4.pdf](http://www8.umoncton.ca/umcm-cormier_gabriel/Electrotechnique/Chap4.pdf)
- Des éclairs, Jean Echenoz
- Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, Leon Freris, Dabid Infield, Dunod