

## CHAPITRE 1

### MODÉLISATION DE L'ÉOLIENNE

#### 1.1 Les différentes configurations et composantes du système éolien isolé

Les systèmes éoliens étudiés sont ceux utilisés pour produire de l'électricité. Il existe également des éoliennes actionnant mécaniquement des pompes à eau, mais leurs caractéristiques diffèrent. Les éoliennes étudiées sont généralement utilisées pour alimenter des installations isolées, trop éloignées du réseau de distribution électrique pour y être connectées. Elles permettent de recharger des batteries afin de disposer d'électricité en tout temps.

Le système éolien utilisé en réseau isolé est composé d'un *rotor* et d'un *alternateur*, généralement à entraînement direct et à aimants permanents, d'un *redresseur* permettant de transformer le courant triphasé alternatif en courant continu, d'une *batterie d'accumulateurs* ainsi que d'une *charge électrique*. Si les appareils électriques à alimenter demandent un courant alternatif, un *onduleur* est nécessaire. L'onduleur est la composante qui permet de transformer un courant continu en courant alternatif afin d'avoir une fréquence fixe. On retrouve également un *contrôleur de charge* ainsi qu'une *charge de délestage*. Le contrôleur de charge coupe la recharge de la batterie lorsqu'elle est pleine, pour la protéger de toute surcharge, et connecte la charge de délestage afin de dissiper l'énergie captée par l'éolienne. La charge de délestage peut être composée de simples résistances électriques. Elle permet d'éviter que l'éolienne ne fonctionne à vide ; le rotor prendrait ainsi trop de vitesse, ce qui pourrait être dommageable pour les parties mécaniques de l'éolienne. Bien souvent, le redresseur, le contrôleur de charge et l'onduleur font partie d'un même module, d'un même appareil.

D'autres sources d'énergie peuvent être également utilisées en parallèle avec le système éolien. On parle alors de systèmes hybrides. En plus de l'éolienne, on peut retrouver des panneaux solaires ou encore un groupe électrogène, permettant ainsi de fournir de l'énergie lorsque le vent ne suffit pas. L'utilisation de génératrices diesel demande des systèmes de contrôle plus sophistiqués. On retrouve également de plus en plus de petites éoliennes reliées directement au réseau du distributeur d'électricité. Ces systèmes d'autoproduction

permettent de faire du "retour sur réseau". Ils sont semblables aux systèmes isolés, puisque l'on peut voir le réseau du distributeur comme étant une batterie de capacité infinie. Ces systèmes ne demandent pas l'ajout de batterie, réduisant ainsi les coûts. Avec le retour sur réseau, le réseau du distributeur absorbe les surplus de production d'électricité et fournit de l'électricité lorsque le vent ne répond pas à la demande. Ces installations demandent cependant un onduleur différent, capable de se synchroniser avec le distributeur. Le schéma présenté à la figure 1 montre les différentes composantes du système.

Afin d'évaluer le fonctionnement et les performances du système éolien en réseau isolé, les composantes sont étudiées séparément, dans les prochaines sections, pour en faire la modélisation. Les trois composantes qu'il est nécessaire d'examiner sont le rotor, l'alternateur et la batterie d'accumulateurs. Pour chacune de ces composantes, on fait d'abord une revue plus générale, pour ensuite en étudier le fonctionnement et ainsi permettre l'élaboration d'un modèle mathématique adéquat.

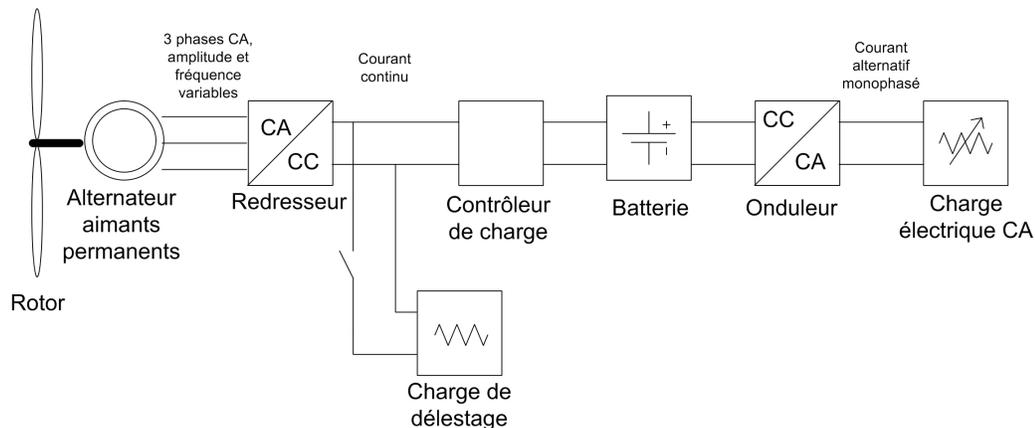


Figure 1 Système éolien avec charge électrique à courant alternatif

## 1.2 La modélisation du rotor

Le rotor de l'éolienne est la composante du système qui permet de capter une partie de l'énergie cinétique de la masse d'air en déplacement. Cette énergie mécanique peut être ensuite transformée en énergie électrique par l'alternateur. Afin d'interfacer avec le modèle de l'alternateur, le modèle du rotor doit permettre d'obtenir la puissance mécanique ou le couple mécanique qui est transmis à l'arbre de l'alternateur en fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Le modèle ne doit caractériser que le fonctionnement du rotor et non le fonctionnement complet de l'éolienne. Il pourra ensuite être couplé aux modèles des autres composantes du système afin d'étudier les performances du système entier. La façon la plus simple de caractériser le rotor est d'utiliser la courbe du coefficient de puissance, appelée courbe  $C_p$ . Comme on le verra, le calcul de la courbe  $C_p$  est basé sur la géométrie du rotor et les principes d'aérodynamique des pales et de conservation de quantité de mouvement. Tout d'abord, on passera en revue les différents types de pales, pour ensuite présenter le fonctionnement général du rotor ainsi que la méthode de calcul de la courbe  $C_p$  et son utilisation dans le cadre de notre modélisation.

### 1.2.1 Les types de pales et la régulation de puissance

Il existe une multitude de rotors différents. La figure 2 présente différents rotors et machines à vent qui ont été développés au courant de l'évolution du domaine de l'énergie éolienne. De nos jours, on classe les éoliennes modernes en deux catégories principales : les éoliennes à axe de rotation horizontal et les éoliennes à axe de rotation vertical (figure 3). Ensuite, on retrouve deux types de pales : les pales utilisant principalement la traînée (figure 4) et les pales profilées, comme les ailes d'avion, utilisant la portance, que l'on étudiera plus loin. La presque totalité des éoliennes modernes sont à axe horizontal, avec des pales profilées, afin d'utiliser la portance et extraire un maximum d'énergie du vent. Le nombre de pales a un impact sur la quantité d'énergie captée. Les éoliennes actuelles en ont généralement trois, présentant un compromis entre le coût, le poids, l'énergie captée, l'équilibre des charges mécaniques et l'esthétisme.

La majorité des petites éoliennes sont également à axe horizontal et tripale. Une différence importante réside dans le mode de régulation de puissance et dans le mécanisme d'orien-

tation dans le vent. Les grandes éoliennes ont bien souvent des moteurs, reliés aux pales, permettant de modifier l'angle de calage et de réguler la puissance et d'autres reliés à la nacelle permettant d'orienter le rotor dans le vent. Les petites éoliennes ont des systèmes passifs d'orientation et de régulation de puissance. On retrouve des éoliennes qui ont un dispositif passif, utilisant la force centrifuge, venant modifier l'angle de calage de la pale en fonction de la vitesse de rotation. D'autres systèmes de régulation positionnent le rotor en effacement avec l'augmentation de la poussée sur le rotor (figure 5). L'utilisation d'un gouvernail, ou d'un rotor sous le vent, permet d'orienter le rotor dans le vent. Le mode de régulation peut influencer grandement le rendement de l'éolienne. Par exemple, avec la mise en drapeau du rotor, où le rotor est effacé du vent avec l'augmentation de la poussée sur le rotor, si le temps de recouvrement est trop long lorsque le vent baisse, une quantité d'énergie n'est pas capté, puisque le rotor n'opère pas dans la position idéale. La modélisation du mode de régulation mécanique est complexe et sort du cadre du projet. Il faudra cependant en tenir compte lors de l'analyse de la production.

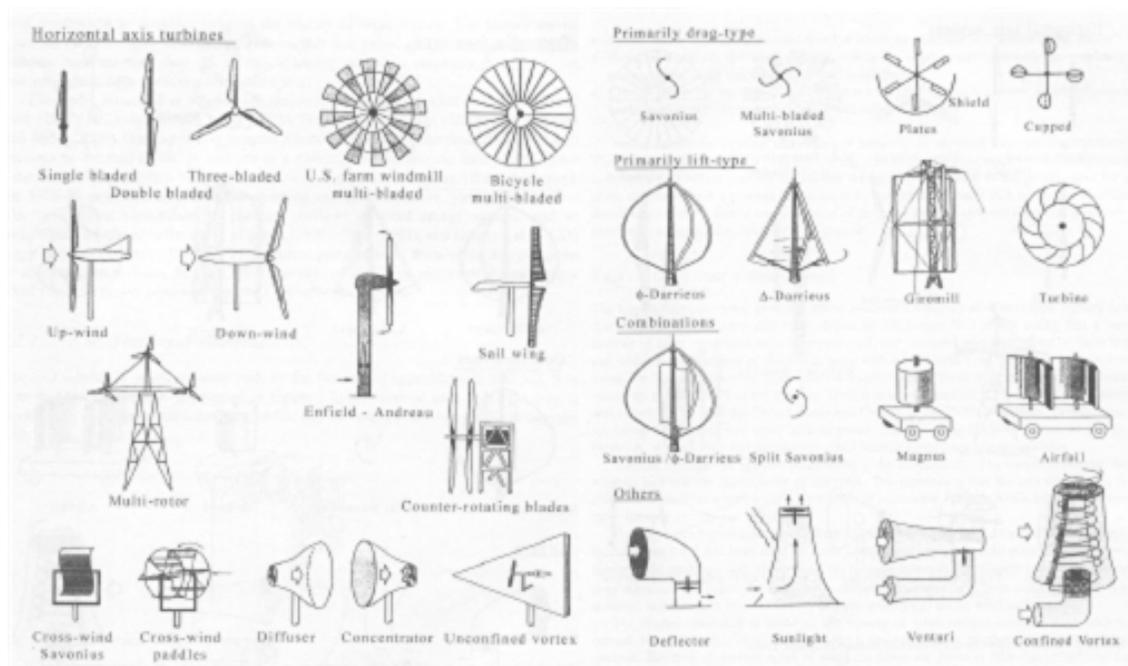


Figure 2 Différents types de rotor [8]



Figure 3 Éoliennes à axe horizontal et vertical utilisant la portance

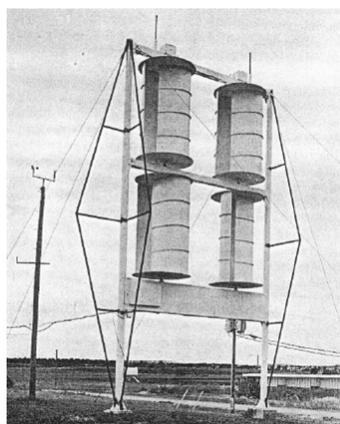


Figure 4 Éolienne à trainée de type Savonius [9]

### 1.2.2 La puissance du vent

Il est possible d'obtenir la puissance du vent traversant une surface à partir de l'énergie cinétique de la masse d'air en déplacement. La figure 6 représente la section balayée par le rotor. L'énergie cinétique  $E_c$  d'une masse  $m$  voyageant à une vitesse constante  $U$  est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2}mU^2 \quad (1.1)$$

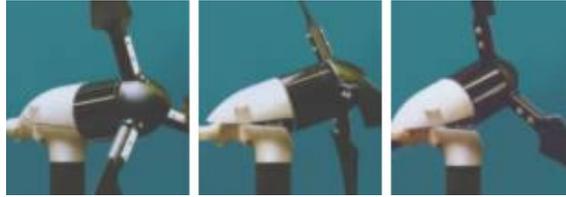


Figure 5 Système de régulation de puissance de la Whisper100 de Southwest Wind-power [10]

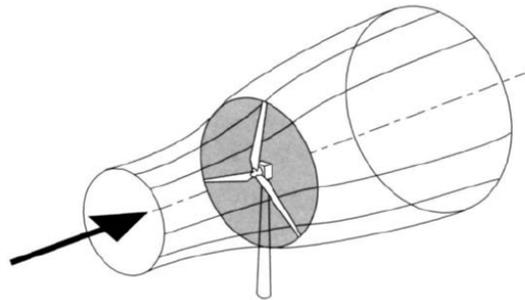


Figure 6 Surface balayée par le rotor de l'éolienne [11]

D'après les équations de mécanique des fluides, le débit massique de l'air passant à travers une surface  $A$  est fonction de sa densité  $\rho$  et de sa vitesse  $U$  :

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (1.2)$$

Puisque la puissance est le taux de variation de l'énergie cinétique, à partir des équations (1.1) et (1.2), on obtient l'expression de la puissance du vent à travers une surface :

$$P_{vent} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (1.3)$$

Où  $P_{vent}$  est la puissance du vent ( $W$ ),  $A$  l'aire de la surface d'intérêt ( $m^2$ ),  $\rho$  la densité de l'air ( $kg/m^3$ ),  $U$  la vitesse du vent ( $m/s$ ),  $m$  la masse ( $kg$ ) et  $E_c$  l'énergie cinétique ( $J$ ).

### 1.2.3 Le coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance du rotor ( $C_p$ ) comme étant le pourcentage de la puissance du vent ( $P_{vent}$ ), traversant la surface balayée par le rotor ( $A$ ), qui est capté par le rotor ( $P_{mec}$ ).

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{vent}} = \frac{P_{mec}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (1.4)$$

Si on isole  $P_{mec}$ , la puissance mécanique captée par le rotor, on trouve :

$$P_{mec} = \frac{1}{2}\rho AU^3 C_p \quad (1.5)$$

De façon intuitive, on peut s'imaginer qu'il est impossible de capter 100% de l'énergie du vent. En effet, si le rotor retirait toute l'énergie du vent, il n'y aurait plus déplacement de la masse d'air à l'arrière du rotor et il y aurait alors accumulation d'air. Il a été démontré par Betz [8] que le pourcentage maximum théorique de puissance du vent qu'il est possible d'extraire est de  $16/27$ , soit environ 59%. Ainsi, en déterminant de façon analytique le coefficient de puissance d'un rotor et en connaissant la puissance disponible dans le vent, on pourra alors obtenir la puissance mécanique qui est captée par le rotor et transmise à l'arbre de la génératrice en utilisant l'équation (1.5).

### 1.2.4 Calcul du coefficient de puissance d'un rotor

Le calcul du coefficient de puissance d'un rotor est basé sur sa géométrie et ses dimensions, ainsi que sur des principes d'aérodynamique et de mécanique des fluides. On représente le plus souvent le coefficient de puissance par une courbe à laquelle on réfère en tant que courbe  $C_p$ . La figure 7 présente les courbes  $C_p$  typiques pour différents types d'éoliennes.

La méthode utilisée pour calculer la courbe  $C_p$  ne sera pas explicitée. Plusieurs ouvrages le font très bien [11, 13, 8]. Mentionnons simplement que le calcul est basé sur l'idée que l'éolienne absorbe une partie de l'énergie cinétique de la masse d'air en déplacement,

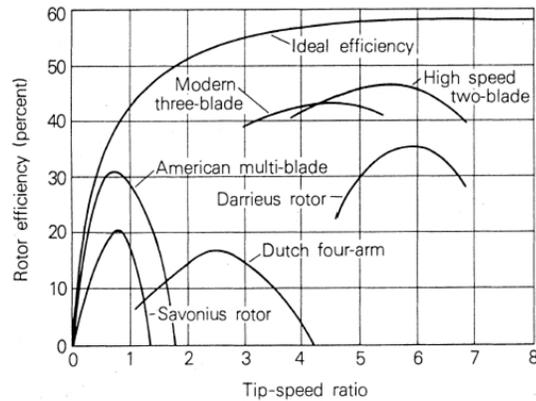


Figure 7 Courbes  $C_p$  de différents types d'éoliennes [12]

occasionnant un ralentissement de la masse d'air, et qu'il doit y avoir conservation de la quantité de mouvement. La pale est alors décomposée en plusieurs sections, dont on connaît la géométrie, permettant de calculer la contribution de chaque section au ralentissement de la masse d'air (figure 8).

À partir du nombre de pales, de sa longueur, des polaires des différents profils aérodynamiques, de la longueur de corde de chaque élément, ainsi que du vrillage, il est possible de déterminer la courbe  $C_p$  du rotor. La courbe  $C_p$  est donnée en fonction de la vitesse spécifique et non pas en fonction de la vitesse du vent. Car, comme le montre la figure 9, le vent vu par la pale est un vent relatif, ayant une composante dans le sens de l'axe de rotation du rotor occasionnée par la masse d'air en déplacement, et une composante en quadrature avec l'axe de rotation occasionnée par le déplacement de la pale. On ne peut donc pas calculer les performances du rotor pour un vent donné, puisque la pale voit un vent qui dépend de la vitesse de rotation. On ne peut donc calculer les performances du rotor qu'en fonction de l'angle d'incidence du vent relatif. La vitesse spécifique ( $\lambda$ ) est ainsi une grandeur adimensionnelle ; étant le rapport de la vitesse tangentielle du bout de la pale  $\omega r$  sur la vitesse du vent  $U$ , où  $r$  est la longueur de la pale en mètre,  $\omega$  la vitesse de rotation du rotor en radian par seconde et  $U$  la vitesse du vent en mètre par seconde.

$$\lambda = \frac{\omega r}{U} \quad (1.6)$$

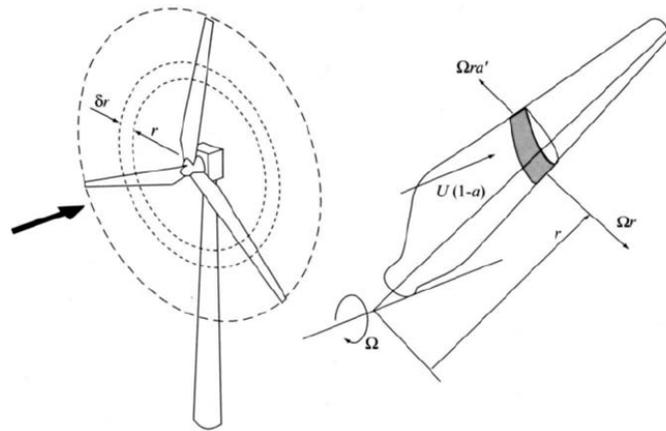


Figure 8 Représentation des éléments de pale du rotor [11]

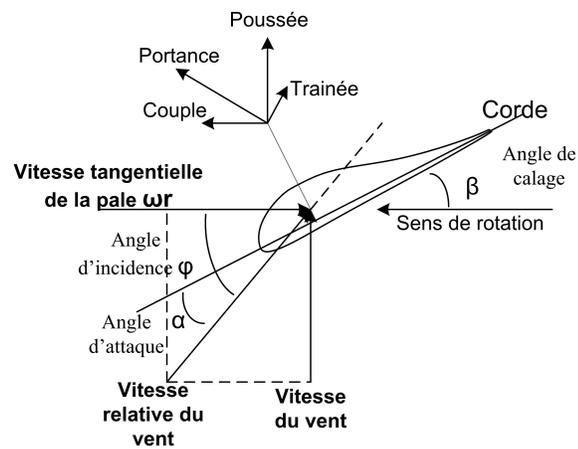


Figure 9 Profil aérodynamique d'une section de pale

Ainsi, à partir des caractéristiques physiques de la pale, il est possible de calculer les performances aérodynamiques du rotor. La courbe du coefficient de puissance peut être obtenue directement du fabricant ou calculée si on dispose de suffisamment d'information sur le rotor ; longueur de la pale, nombre de pales, profil aérodynamique, polaire des profils, distribution de la corde et vrillage de la pale.

### 1.2.5 Puissance et couple mécanique du rotor

Si on dispose de la courbe  $C_p(\lambda)$  d'un rotor, en utilisant l'équation (1.5), il est possible de tracer la courbe de la puissance mécanique du rotor en fixant la vitesse du vent ou la vitesse de rotation. Dans le cas d'une éolienne à axe horizontal, la surface balayée  $A$  de l'équation (1.5) est donnée par  $\pi r^2$  où  $r$  est le rayon du disque, c'est-à-dire la longueur de la pale. Pour des éoliennes de grande taille, on doit considérer le moyeu du rotor, en additionnant son rayon à  $r$ , mais en soustrayant sa surface de l'aire obtenue. La figure 10 montre un exemple d'une courbe  $C_p$ . La figure 11 donne la puissance mécanique du rotor en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent. Chaque courbe est calculée pour une vitesse de vent différente. Pour chaque vitesse de vent, il y a une vitesse de rotation optimale permettant au rotor de fonctionner au coefficient de puissance maximal. À ce moment, l'angle d'incidence du vent relatif permet d'avoir l'angle d'attaque idéal. De la même façon, la figure 12 donne la puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent pour différentes vitesses de rotation du rotor.

Pour obtenir le couple mécanique appliqué à l'arbre de rotation du rotor, on divise la puissance captée par le rotor par sa vitesse de rotation  $T_{mec} = P_{mec}/\omega$ , où  $T_{mec}$  est newton-mètre,  $P_{mec}$  en watts et  $\omega$  en radians par seconde. Ainsi, en utilisant la courbe  $C_p$  d'un rotor, en connaissant la vitesse du vent et la vitesse de rotation, on peut obtenir le couple mécanique transmis à l'alternateur. La méthode de modélisation est complexe et demande de connaître la géométrie exacte de la pale, mais une fois que l'on a obtenu la courbe  $C_p$ , son utilisation est simple. Le modèle présente cependant des limites ; il n'est valide qu'en régime permanent, pour un écoulement uniforme et non turbulent. Il ne peut donc pas fournir le couple de démarrage appliqué à l'arbre et il ne tient pas compte de l'aéroélasticité du rotor.

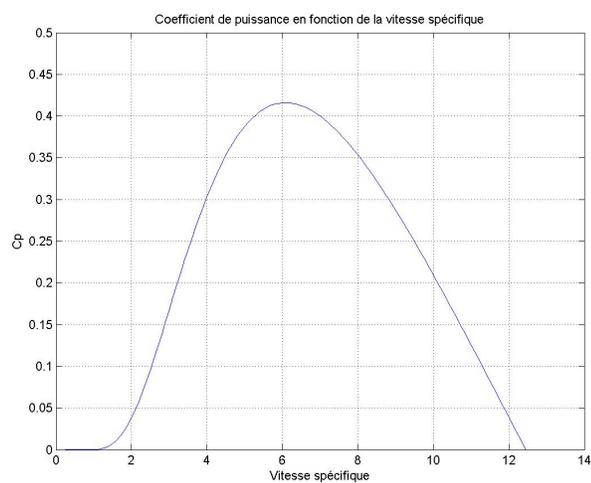


Figure 10 Exemple d'une courbe  $C_p$ , donnant le coefficient de puissance d'un rotor en fonction de la vitesse spécifique

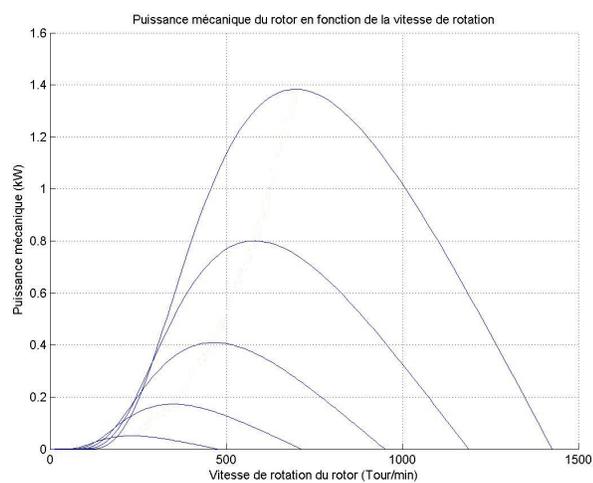


Figure 11 Exemple de courbes de puissance mécanique d'un rotor en fonction de la vitesse de rotation, pour différentes vitesses de vent

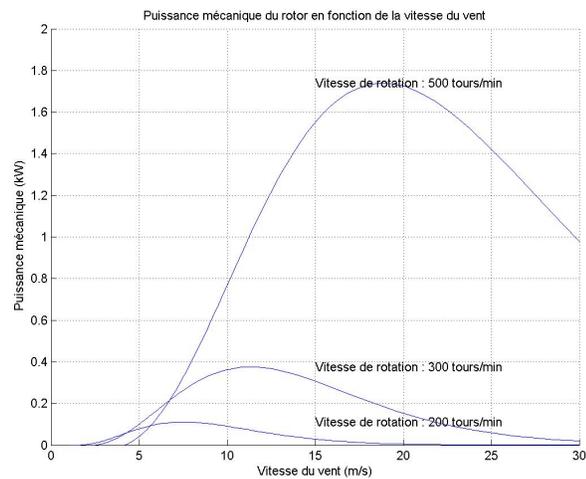


Figure 12 Exemple de courbes de puissance mécanique d'un rotor en fonction de la vitesse du vent, pour différentes vitesses de rotation

Ainsi, on a pu constater que pour un rotor donné, la puissance mécanique varie en fonction de la vitesse du vent, mais également en fonction de la vitesse de rotation. Puisque le rotor peut opérer à toutes les vitesses de rotation, la vitesse de rotation sera déterminée par la partie électrique de l'éolienne. On retrouve des éoliennes dont la vitesse de rotation est fixe et d'autres dont la vitesse de rotation est variable. Il sera montré plus loin comment est réalisé le couplage entre le rotor et l'alternateur afin d'établir la courbe de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

### 1.3 La modélisation de l'alternateur

Cette section décrit la démarche suivie pour réaliser la modélisation de l'alternateur de l'éolienne. Un rappel des principes d'électromagnétisme intervenant dans le fonctionnement de l'alternateur est d'abord présenté, pour ensuite établir les équations de la partie électrique et mécanique de la machine. Dans un premier temps, les équations électriques du système sont définies dans un référentiel stationnaire, puis la transformation de Park est utilisée afin de définir les équations dans un cadre référentiel tournant avec le rotor, permettant de linéariser le système d'équations et d'enlever une dépendance liée à la position angulaire du rotor.

#### 1.3.1 Principes fondamentaux d'électromagnétisme

##### 1.3.1.1 Magnétisme

*Champ magnétique  $\vec{H}$*

Si on déplace une boussole autour d'un aimant, le pôle nord de l'aimant repousse le pôle nord de la boussole. On peut alors constater que l'aiguille s'oriente selon une infinité de lignes reliant le pôle sud et le pôle nord de l'aimant. Ces chemins portent le nom de "lignes de force magnétomotrice" ou "lignes de flux". Ces lignes représentent la densité et la direction du flux magnétique. Elles sortent du pôle nord et aboutissent au pôle sud de la source. Le champ magnétique est une quantité vectorielle représentée par le symbole  $\vec{H}$  et est exprimé dans le système international (SI) en ampère par mètre ( $A/m$ ). Elle donne en un point la force magnétomotrice exercée par unité de longueur. Le nom de champ magnétique représente ainsi une grandeur précise, mais de façon plus générale, elle représente également la région de l'espace traversée par des lignes de force. Un champ magnétique est établi autour d'un conducteur parcouru par un courant électrique ou par un aimant naturel.

*Flux magnétique  $\phi$  et densité de flux magnétique  $\vec{B}$*

Le flux magnétique à travers une surface donnée est l'ensemble des lignes de force qui traversent cette surface. L'unité SI de flux magnétique  $\vec{\phi}$  est le weber ( $Wb$ ). L'unité SI de

la densité de flux magnétique est le tesla ( $T$ ). Elle est égale à un weber par mètre carré ( $1T = 1Wb/m^2$ ). Le flux est donné par  $\vec{\phi} = \vec{B} \bullet \vec{A}$ , où  $\vec{A}$  représente la surface traversée par le flux magnétique en mètre carré. La relation entre le champ magnétique et la densité du flux magnétique est donnée par  $\vec{B} = \mu\vec{H}$ , où  $\mu$  désigne la perméabilité magnétique.

### 1.3.1.2 Principes d'électromagnétisme

#### *Principe I, loi d'Ampère*

Un courant circulant dans un conducteur crée un champ magnétique autour de celui-ci. Dans le cas d'un solénoïde, d'un enroulement de fil, le produit du nombre de spires par le courant s'appelle la force magnétomotrice d'une bobine (FMM) et l'unité SI est de la force magnétomotrice est l'ampère ( $A$ ). La FMM représente la différence de potentiel magnétique produit par un courant d'un ampère circulant dans une spire. Si la bobine est reliée à un circuit magnétique de longueur  $l$ , le champ magnétique est alors de  $H = FMM/l$ .

#### *Principe II, loi de Lorenz*

Lorsqu'un conducteur qui porte un courant est orienté convenablement dans un champ magnétique, il est soumis à une force de l'on appelle force électromagnétique.

#### *Principe III, loi de l'induction électromagnétique de Faraday, tension induite*

Lorsque l'on déplace un conducteur dans un champ magnétique de façon à couper les lignes de force, il apparaît une différence de potentiel à ses extrémités. L'intensité de la tension induite dans le conducteur est proportionnelle au nombre de lignes de force coupées par seconde. Elle dépend ainsi de l'intensité du champ magnétique et de la vitesse de déplacement du conducteur.

$$E = \frac{d\phi}{dt} \quad (1.7)$$

*Principe IV, loi de l'induction de Faraday, induction électromagnétique*

Si l'intensité du flux à l'intérieur d'une boucle varie avec le temps, une tension est induite entre ses bornes et la valeur de cette tension est proportionnelle au taux de variation du flux. Si le circuit est fermé, il apparaît un courant induit dont le sens est tel qu'il tend à s'opposer à la variation de flux qui l'a fait naître (loi de Lenz). La tension induite est proportionnelle au nombre de spires  $N$  de l'enroulement.

$$E = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.8)$$

### **1.3.2 Les différents types de machines tournantes**

Les machines tournantes peuvent fonctionner en mode moteur, convertissant ainsi l'énergie électrique en énergie mécanique ou bien en mode génératrice, convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique. Il existe trois principaux types de machines tournantes :

- a. la machine à courant continu;
- b. la machine asynchrone;
- c. la machine synchrone.

Pour une éolienne, on cherche évidemment à utiliser la machine en mode génératrice et on évite d'opérer en mode moteur. La génératrice à courant continu, comme son nom l'indique, fournit une tension continue à ses bornes. Son principe de fonctionnement est semblable à celui de la machine synchrone, mais la tension alternative est redressée mécaniquement, par une série de balais et de collecteurs. Ces composantes mécaniques s'usent en raison du frottement, demandant des entretiens fréquents et coûteux, ce qui constitue son principal inconvénient.

La génératrice asynchrone fournit une tension alternative à ses bornes. Mais la fréquence de la tension et la vitesse de rotation de l'arbre ne sont pas dans un rapport constant. De fabrication et d'utilisation plus simple, cette machine est robuste et moins coûteuse que la machine synchrone. Cependant, pour fonctionner, elle nécessite d'être reliée au réseau de distribution afin de créer le champ tournant. Il est possible d'auto exciter la génératrice

asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les sur-tensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation. Elle n'est donc pas adaptée à priori aux systèmes autonomes. La génératrice asynchrone est le type de génératrice le plus répandu pour les éoliennes de grandes dimensions.

Le troisième type, la génératrice synchrone, fournit également une tension alternative à ses bornes, mais la fréquence de la tension induite et la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice sont toujours dans un rapport constant. Cette génératrice, ne nécessitant pas le réseau de distribution ou de condensateurs pour magnétiser le rotor, est adéquate pour les éoliennes destinées aux réseaux isolés. Ce sont des génératrices synchrones que l'on retrouve dans la plupart des installations conventionnelles de production d'électricité : barrages hydroélectriques, centrales thermiques et centrales nucléaires.

### **1.3.3 Description de la machine synchrone**

La machine synchrone utilisée pour produire de l'électricité se nomme alternateur. L'alternateur est composé de deux parties : une partie tournante, nommée rotor, et une partie fixe, nommée stator. Son principe de base est simple : un flux magnétique relié au rotor est mis en rotation de façon à induire une tension dans les enroulements répartis autour du stator. Le champ magnétique est créé de deux façons : par un électro-aimant ou encore par des aimants permanents. Le circuit où la tension est induite se nomme "induit" et est composé de trois séries d'enroulements identiques réparties autour du stator, décalées dans l'espace. Le circuit servant à produire le champ magnétique se nomme "circuit inducteur". En plus de ces deux circuits, les alternateurs de grande dimension ont des enroulements électriques en court-circuit, appelés "enroulements amortisseurs", afin d'amortir les oscillations de vitesse lors de perturbations. Ils ne portent un courant que lors d'une perturbation; lorsque les trois courants des trois phases sont débalancés. Les alternateurs utilisés pour les petites éoliennes n'ont pas de tels enroulements amortisseurs.

Pour les petites éoliennes, pour des raisons de simplicité et de robustesse, on utilise des aimants permanents pour créer le champ d'excitation. Les alternateurs à aimants permanents sont plus efficaces, puisqu'il n'y a pas de perte associée à la création du champ magnétique. Ils sont également plus compacts et plus simples à contrôler. Cependant, les aimants coûtent cher et ne permettent pas de réguler l'intensité du champ d'excitation afin

d'ajuster la tension de sortie et la puissance réactive débitée par l'alternateur. Les aimants sont fixés au rotor de l'alternateur et tournent avec le rotor de l'éolienne.

Le principe de fonctionnement est simple : la force mécanique appliquée à l'arbre du rotor fait tourner le rotor et le flux magnétique qui lui est relié. Le champ d'excitation du rotor est d'amplitude constante, mais puisque qu'il tourne, les enroulements de l'induit se trouvent traversés par un champ magnétique variant dans le temps, ce qui induit une différence de potentiel aux bornes de ceux-ci, en vertu du principe d'induction électromagnétique. Comme les trois enroulements de l'induit repartis autour du stator sont décalés dans l'espace, les trois voltages induits aux bornes de ceux-ci sont déphasés d'un angle électrique de 120 degrés. La fréquence de la tension induite est donc proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor. S'il y a plus d'une paire de pôles, la fréquence de la tension et la vitesse de rotation du rotor sont reliées par la relation  $f = pn/60$  où  $f$  est la fréquence de la tension au stator en hertz (Hz),  $p$  le nombre de paires de pôles et  $n$  la vitesse de rotation du rotor en tour/min. L'amplitude de la tension induite est fonction de la vitesse de rotation et de l'intensité de flux magnétique produit pas les pôles; plus la vitesse de rotation est élevée, plus  $d\phi/dt$  est élevé, plus la tension sera également élevée. Si on relie les bornes de la génératrice à une charge électrique, un courant circulera dans les trois enroulements. Ces courants vont créer à leur tour un champ magnétique tournant dans le même sens que le rotor, mais décalé dans l'espace. C'est l'interaction de ces deux champs magnétiques qui opposera un couple électromagnétique au couple mécanique appliqué à l'arbre de la génératrice. Un équilibre dynamique est atteint lorsque les deux couples ont la même amplitude.

#### 1.3.4 Équations de la machine synchrone dans un référentiel fixe

Les équations générales de la machine synchrone avec un enroulement inducteur au rotor sont d'abord établies. Les équations de la machine à aimants permanents seront présentées subséquentment. La machine synchrone comprend trois enroulements identiques distribués au stator et un enroulement au rotor. Ces quatre enroulements sont couplés magnétiquement. On ne tiendra pas compte des enroulements amortisseurs puisque les machines de faible puissance n'en n'ont généralement pas. On considère également que le circuit magnétique n'est pas saturé.

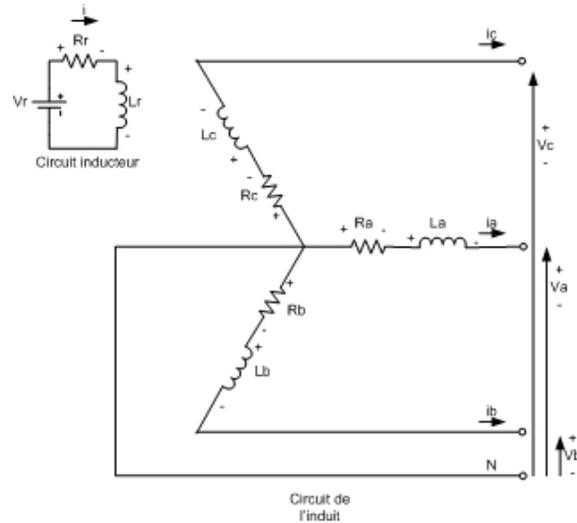


Figure 13 Circuit équivalent de l'alternateur

Chaque enroulement est caractérisé par une valeur de résistance, une valeur d'inductance propre ainsi qu'une valeur d'inductance mutuelle avec chacun des autres enroulements. Aux phases statoriques correspondent les indices  $a$ ,  $b$ , et  $c$ , et au rotor correspond l'indice  $r$ . On définit ainsi :

- l'inductance propre d'une phase statorique et rotorique :  $L_a$ ,  $L_b$ ,  $L_c$  et  $L_r$ ;
- l'inductance mutuelle entre phases statoriques :  $L_{ab}$ ,  $L_{ac}$ ,  $L_{ba}$ ,  $L_{bc}$ ,  $L_{ca}$  et  $L_{cb}$ ;
- l'inductance mutuelle entre phases statorique et rotoriques :  $L_{ra}$ ,  $L_{rb}$ ,  $L_{rc}$ ,  $L_{ar}$ ,  $L_{br}$  et  $L_{cr}$ .

L'inductance mutuelle représente le couplage magnétique entre deux enroulements; le courant d'une bobine génère un champ magnétique qui influence les bobines adjacentes. Le couplage entre les enroulements varie selon la position du rotor dû à la réluctance variable du rotor (la réluctance étant la résistance au passage du flux magnétique). La figure 13 montre le circuit électrique équivalent représentant l'alternateur avec une connexion en étoile. L'équation (1.9) donne la sommation des voltages autour d'une maille, d'un terminal jusqu'au point neutre. Le voltage  $v$  aux bornes de l'alternateur dépend du taux de variation du flux traversant l'inductance et de la valeur de la chute de tension dans la résis-

tance interne. Le système d'équations de tension de la machine synchrone est obtenu par l'application de la relation fondamentale suivante, qui donne la tension aux bornes d'un circuit (d'une boucle) de résistance  $R$  traversé par le flux totalisé  $\varphi$ , aux différents circuits des phases a, b et c, ainsi qu'au circuit du rotor [14] :

$$v = -Ri - \frac{d(\varphi)}{dt} \quad (1.9)$$

Sous forme matricielle, on peut regrouper les équations des tensions des trois enroulements du stator et de l'enroulement du rotor (équation (1.10)). On remarque que la tension aux bornes d'un enroulement, par exemple  $u_a$ , est fonction du courant  $i_a$  et du taux de variation du flux magnétique  $\varphi_a$  passant à travers cet enroulement. L'équation (1.11) est l'équation matricielle des flux magnétiques. On peut constater que le flux traversant un enroulement est produit par les quatre courants, couplés par quatre valeurs différentes d'inductance.

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ -i_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\varphi}_a \\ \dot{\varphi}_b \\ \dot{\varphi}_c \\ \dot{\varphi}_r \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} & L_{ar} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} & L_{br} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c & L_{cr} \\ L_{ra} & L_{rb} & L_{rc} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ -i_r \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

En définissant les matrices suivantes :

$$[u_{abc}] = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$[i_{abc}] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

$$[R_{abc}] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$[\varphi_{abc}] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

$$[L_{abc}] = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \quad (1.16)$$

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} \\ L_{br} \\ L_{cr} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

On peut réécrire le système d'équations en notation plus compacte en utilisant les définitions des matrices précédentes (équations (1.12) - (1.17)).

$$\begin{bmatrix} [u_{abs}] \\ u_r \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [R_{abc}] & [0] \\ [0] & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{abc}] \\ -i_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [\dot{\varphi}_{abc}] \\ \dot{\varphi}_r \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

$$\begin{bmatrix} [\varphi_{abc}] \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{abc}] & [L_{abcr}] \\ [L_{abcr}]^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{abc}] \\ -i_r \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

On a établi la relation entre les courants et les voltages, il s'agit maintenant de définir les valeurs des inductances propres et mutuelles. On approxime l'inductance propre du stator de la façon suivante, où  $\bar{L}$  représente l'inductance propre moyenne d'une phase et  $L_{h2}$ , l'amplitude de la seconde harmonique, puisque par une construction appropriée, on s'efforce de renforcer la seconde harmonique et de minimiser les autres [14] :

$$L_a(\theta) = \bar{L} + L_{h2}\cos(2\theta) \quad (1.20)$$

$$L_b(\theta) = \bar{L} + L_{h2}\cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.21)$$

$$L_c(\theta) = \bar{L} + L_{h2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.22)$$

On constate que les inductances propres du stator varient avec l'angle  $\theta$ , relatif à la position angulaire du rotor, puisque le circuit magnétique n'est pas isotrope. La valeur de chaque inductance oscille ainsi autour d'une valeur moyenne. Les inductances mutuelles entre les enroulements du stator sont également fonction de la position du rotor :

$$L_{ab}(\theta) = L_{ba}(\theta) = -0,5\bar{L}_{h\sim} + L_{h2}\cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.23)$$

$$L_{bc}(\theta) = L_{cb}(\theta) = -0,5\bar{L}_{h\sim} + L_{h2}\cos(2\theta) \quad (1.24)$$

$$L_{ca}(\theta) = L_{ac}(\theta) = -0,5\bar{L}_{h\sim} + L_{h2}\cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.25)$$

Où  $\bar{L}_{h\sim}$  représente la valeur moyenne de l'inductance principale d'une phase. Les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques sont données par :

$$L_{ra}(\theta) = L_{ar}(\theta) = L_f\cos(\theta) \quad (1.26)$$

$$L_{rb}(\theta) = L_{br}(\theta) = L_f\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.27)$$

$$L_{rc}(\theta) = L_{cr}(\theta) = L_f\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.28)$$

La valeur d'une inductance est reliée à la fabrication de la machine tournante (nombre de spires, disposition des enroulements, type de matériau utilisé, largeur d'entrefer, etc.), mais également à la position du rotor comme le montre les équations précédentes (équations (1.20 - 1.28)). La position du rotor influence la valeur des inductances puisqu'elle modifie les circuits magnétiques qui sont formés. Ainsi, pour trouver la valeur des tensions induites  $v_a$ ,  $v_b$ , et  $v_c$  aux bornes de la machine synchrone, on doit déterminer le taux de variation du flux traversant chacun des enroulements. Cependant, le système d'équations n'est pas linéaire, puisque les valeurs des inductances varient en fonction de la position du rotor. En connaissant la charge qui est reliée à la machine tournante, la résolution numérique de ce système d'équations non linéaires est possible, mais peu commode. C'est pourquoi, afin d'enlever la dépendance reliée à la position du rotor, on utilise la transformation de Park.

### 1.3.5 Transformation de Park

Pour supprimer la non linéarité et résoudre le système, on transforme les enroulements statoriques en enroulement orthogonaux [14]. Ce modèle est caractérisé par un système d'axes en quadrature indicé  $d$  (axe direct) et  $q$  (axe transversal), ce dernier en avance de 90 degrés par rapport à l'axe direct, dans le sens trigonométrique pris comme sens de rotation. On fait ainsi la projection du système d'axe  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sur le système d'axe  $d$ ,  $q$ , qui est maintenant le nouveau cadre référentiel, aligné sur le rotor et tournant à la même vitesse. De façon intuitive, un observateur extérieur, lié à la phase  $a$  par exemple, voit le flux magnétique varier constamment et passer par un maximum à chaque passage d'un pôle nord, mais s'il est assis sur le rotor et lié à l'axe  $d$ , il voit alors un flux constant qui se déplace avec lui. La transformation de Park change les enroulements statoriques en des enroulements équivalents au point de vue électrique et magnétique, disposés selon les axes  $d$  et  $q$ . Cette transformation a pour but de rendre les inductances propres et mutuelles indépendantes de la position du rotor afin de rendre constant les coefficients des équations de tension de la machine synchrone. La figure 14 montre les axes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  du référentiel fixe et les axes  $d$  et  $q$  du référentiel tournant. Les matrices de transformation directe et inverse utilisées pour faire la transformation du système de référence sont les suivantes :

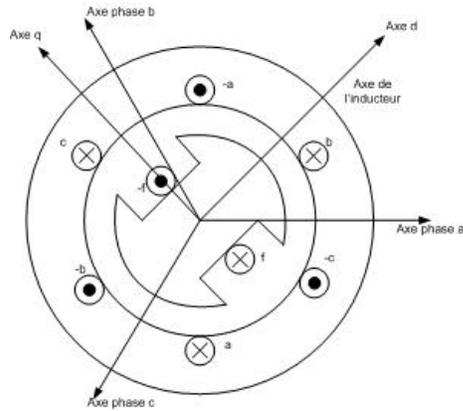


Figure 14 Projection des enroulements a,b et c sur le référentiel tournant formé par les axes d et q

$$[A] = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

Et :

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Puisque l'on a un système à trois variables au départ,  $a$ ,  $b$  et  $c$ , il faut retrouver trois variables après la transformation. Les deux premières variables ont été explicitées plus tôt, il s'agit des variables  $d$  et  $q$  qui tournent avec le rotor. La troisième variable est la composante  $o$ , ou homopolaire, qui est tangente au rotor. La transformation peut être appliquée aux courants, aux tensions, ainsi qu'aux flux magnétiques :

$$[i_{dqo}] = [A][i_{abc}] \quad (1.31)$$

$$[u_{dqo}] = [A][u_{abc}] \quad (1.32)$$

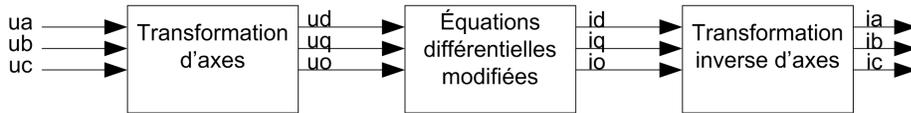


Figure 15 Résolution d'équations avec la transformation de Park

$$[\varphi_{dqo}] = [A][\varphi_{abc}] \quad (1.33)$$

$$[i_{abc}] = [A]^{-1}[i_{dqo}] \quad (1.34)$$

$$[u_{abc}] = [A]^{-1}[u_{dqo}] \quad (1.35)$$

$$[\varphi_{dqo}] = [A]^{-1}[\varphi_{dqo}] \quad (1.36)$$

Ainsi, afin d'enlever toute dépendance liée à la position du rotor, on fait une projection dans un référentiel tournant lié au rotor en appliquant la transformation de Park. On peut alors solutionner le système d'équations modifié et appliquer ensuite la transformation de Park inverse  $[A]^{-1}$  afin de retrouver les grandeurs d'intérêt dans le référentiel fixe (figure 15).

### 1.3.6 Équations de l'alternateur dans un référentiel tournant

À partir des équations (1.18) et (1.19), dans le référentiel fixe  $a, b$  et  $c$ , on a :

$$[u_{abc}] = -[R_{abc}][i_{abc}] - \frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (1.37)$$

En appliquant la transformation de Park, en multipliant les deux membres par  $[A]$  :

$$[A][u_{abc}] = -[R_{abc}][A][i_{abc}] - [A]\frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (1.38)$$

$$[A][u_{abc}] = -[R_{abc}][A][i_{abc}] - \frac{d([A][\varphi_{abc}])}{dt} + \frac{d[A]}{dt}[\varphi_{abc}] \quad (1.39)$$

Avec  $d\theta/dt = \omega$  et les équations (1.31), (1.32) et (1.33), après avoir effectué les opérations, on obtient :

$$u_d = -R_{abc}i_d - \frac{d\varphi_d}{dt} + \omega_m\varphi_q \quad (1.40)$$

$$u_q = -R_s i_q - \frac{d\varphi_q}{dt} - \omega_m\varphi_d \quad (1.41)$$

$$u_o = -R_s i_o - \frac{d\varphi_o}{dt} \quad (1.42)$$

$$u_r = R_r i_r + \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (1.43)$$

En appliquant la transformation de Park à la matrice des flux statoriques il vient :

$$[\varphi_{dqo}] = [A][\varphi_{abc}] = [A][L_{abc}][i_{abc}] + [A][L_{sr}]i_r \quad (1.44)$$

En introduisant les expressions des inductances, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L_{fa} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

$L_d$  représente l'inductance synchrone longitudinale,  $L_q$  l'inductance synchrone transversale et  $L_o$  représente l'inductance synchrone homopolaire. Ces inductances ne dépendent pas de la position du rotor, les équations de  $u_d$ ,  $u_q$  et  $u_o$  sont donc linéaires et faciles à résoudre.

### 1.3.6.1 Expression de la puissance et du couple dans le référentiel tournant

Selon Park [14], la puissance électrique instantanée de la machine vaut :

$$p(t) = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c - u_r i_r \quad (1.46)$$

$$p(t) = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) + 3u_o i_o - u_r i_r \quad (1.47)$$

En remplaçant  $u_d$ ,  $u_q$  et  $u_o$  par leurs valeurs, la relation précédente multipliée par  $dt$  donne l'énergie électrique absorbée pendant un intervalle de temps  $dt$  et s'exprime par

$$dW = \left[ \frac{3}{2}R(i_d^2 + i_q^2) + 3Ri_o^2 + R_f i_f^2 \right] dt + \left[ \frac{3}{2}(d\varphi_d i_d + d\varphi_q i_q) + 3d\varphi_o i_o + d\varphi_f i_f \right] + \left[ \frac{3}{2}\omega(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) dt \right] \quad (1.48)$$

On peut voir que l'énergie électrique est composée de 3 termes :

- l'énergie perdue par effet Joule dans les enroulements;
- la variation d'énergie magnétique emmagasinée dans le champ de couplage;
- l'énergie transformable en énergie mécanique.

L'énergie mécanique est donc :

$$dW_{mec} = \frac{3}{2}\omega(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) dt = T_{em} \theta dt \quad (1.49)$$

Avec :

$$d\theta = \frac{\omega}{p} dt \quad (1.50)$$

Le couple électromagnétique vaut finalement :

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (1.51)$$

En substituant les expressions des flux :

$$T_{em} = \frac{3}{2}p[(L_d - L_q)i_d i_q + L_{ra} i_r i_q] \quad (1.52)$$

Le premier terme est dû à l'anisotropie rotorique et représente le couple réluctant dû à la saillance des pôles. Le second terme représente le couple synchrone créée par l'excitation.

### 1.3.7 Modélisation de la dynamique de l'alternateur

Le comportement dynamique de l'alternateur peut être représenté par la relation suivante :

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{mec} - T_{em} - B\omega \quad (1.53)$$

Où  $J$  est le moment d'inertie rotationnel du rotor et de l'alternateur  $kg.m^2$ ,  $\omega$  est la vitesse angulaire du rotor en  $rad/s$ ,  $T_{mec}$  est le couple mécanique appliqué à l'arbre de l'alternateur en  $N.m$ ,  $T_{em}$  est le couple électromagnétique développé par l'alternateur en  $N.m$  et  $B$  est le coefficient de frottement visqueux en  $N.m$ .

## 1.4 La modélisation de la batterie d'accumulateurs

Puisque le vent varie continuellement, il n'est pas possible de rencontrer les besoins de la charge électrique en tout temps en réseau isolé. On doit donc disposer d'un moyen permettant de découpler la production et la consommation afin d'alimenter la charge lorsque le vent est faible et d'absorber les surplus de production lorsque le vent est fort. Les technologies présentes et futures qui permettent d'emmagasiner de l'énergie et qui peuvent être considérées pour les systèmes éoliens sont : le volant d'inertie, l'air comprimé, les accumulateurs hydrauliques, la bobine supraconductrice, les supercapacités, la pile électrochimique, l'hydrogène et la pile à combustible [15]. Jusqu'à présent, c'est l'utilisation de piles électrochimiques qui est le moyen le plus simple et le plus largement répandu d'emmagasiner de l'énergie. Les autres technologies font l'objet de recherche et de développement. C'est donc la pile électrochimique que l'on cherche à modéliser afin d'étudier par la suite son influence sur les performances du système éolien. Son fonctionnement est décrit, ainsi que les principales caractéristiques des différents types de pile. On présente ensuite les caractéristiques de la pile la plus utilisée avec les systèmes éoliens autonomes et sa modélisation.

### 1.4.1 Constitution et fonctionnement de la pile

Les piles sont des dispositifs permettant de transformer l'énergie chimique en énergie électrique, par réactions électrochimiques d'oxydoréduction (redox). Cette réaction chimique implique le transfert d'électrons d'un matériau à un autre par le biais d'un circuit électrique. L'unité électrochimique de base est appelée "pile" et le terme "batterie" est donné à un ensemble formé de plusieurs piles raccordées en série ou en parallèle. Une pile est constituée de deux conducteurs de nature différente, appelés électrodes, mis en contact par un électrolyte, typiquement, il s'agit d'une solution d'eau acidulée ou alcaline. L'anode est l'électrode négative qui donne l'électron durant l'oxydation et la cathode est l'électrode positive qui accepte l'électron. Selon les matériaux choisis, une force électromotrice entre 1 et 3 volts apparaît entre les deux conducteurs. La tension varie selon la nature des électrodes et de l'électrolyte, la concentration de l'électrolyte et également selon la température et l'âge de la pile. Si on branche une résistance entre les deux électrodes, un courant commence à circuler dans celle-ci et produit une transformation chimique des électrodes

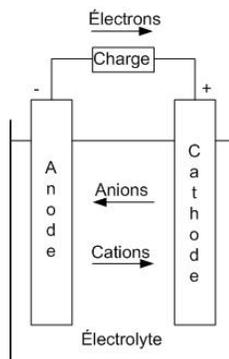


Figure 16 Schéma de la réaction électrochimique ayant lieu dans une pile lors de la décharge

et de l'électrolyte (figure 16). Lorsqu'une des deux électrodes ou l'électrolyte est complètement transformé, la force électromotrice disparaît, on dit alors que la pile est épuisée ou déchargée.

Dans le cas d'une pile dite "primaire", la transformation chimique désagrège l'une des deux électrodes de telle sorte que la pile n'est pas réutilisable. Par contre, dans le cas d'une pile dite "secondaire", appelée également "accumulateur", la transformation chimique est réversible. On peut recharger la pile en faisant circuler un courant dans le sens inverse, inversant ainsi la réaction chimique et redonnant aux électrodes et à l'électrolyte leur composition chimique originale.

#### 1.4.2 Voltage, capacité et énergie

La capacité et le voltage d'une pile dépendent des matériaux choisis pour faire la conception des électrodes. Le voltage dépend de la nature des deux électrodes et la capacité de la pile dépend de la quantité de réactifs pouvant entrer en réaction. La capacité est associée à la quantité d'électricité que l'on peut obtenir de la pile. Elle est mesurée en ampère-heure (Ah) et représente l'intensité du courant que la batterie est en mesure de tenir pendant une heure. Un ampère-heure représente une charge électrique de 3600 coulombs. En prenant le voltage et la quantité d'électricité que peut fournir la batterie, on peut évaluer la capacité de la batterie en terme d'énergie, en wattheure, en multipliant le voltage par la capacité.

Pour modifier la capacité et le voltage d'opération, on relie un certain nombre de piles entre elles en série et en parallèle dans un boîtier pour former une batterie d'accumulateurs. Ces batteries peuvent à leur tour être assemblées en série ou parallèle afin de modifier la capacité et le voltage de l'ensemble. Relier des piles en série augmente le voltage de l'ensemble et les relier en parallèle augmente sa capacité.

### 1.4.3 Performances de la pile

Ainsi, en connaissant les matériaux utilisés dans la fabrication de la pile, il est possible de calculer le voltage et la capacité théorique de la pile, cependant, en pratique, ces valeurs diffèrent. En effet, en pratique le voltage n'est pas constant, mais est fonction du niveau de décharge, puisque les deux électrodes se transforment chimiquement peu à peu. Cependant, le voltage n'atteint pas zéro volt, mais en deçà d'un certain seuil, on considère que la pile est déchargée et qu'un maximum de réactif a réagi. On ne peut ainsi aller chercher toute la capacité théorique de la pile. De plus, le voltage aux bornes est fonction de l'intensité du courant tiré, en raison d'une impédance interne et de la polarisation des matériaux actifs de la pile, occasionnant une chute de potentiel à l'intérieur de la pile. Il faut donc faire la distinction entre le voltage en circuit ouvert, qui s'approche du voltage théorique, et le voltage en circuit fermé, lorsque circule un courant. On définit également un voltage dit "nominal", qui est le voltage typique de la pile lors du fonctionnement, sorte de voltage moyen.

La résistance interne de la pile est due à la résistance ionique de l'électrolyte, à la résistance électronique des électrodes et à la résistances des contacts et collecteurs. La résistance est fonction de différents paramètres liés la fabrication de la batterie, à l'âge de celle-ci et au niveau de décharge. La figure 17 donne un aperçu de la variation du voltage au cours de la décharge de la pile, pour trois différentes intensités de courant, le courant 1 étant le plus faible et le courant 3 étant le plus fort.

La capacité d'une batterie, dénotée par la lettre C, est ainsi spécifiée pour un certain taux de décharge ou de charge. Le plus souvent, la capacité est spécifiée par le fabricant pour un taux de décharge de 5 heures, noté C/5. Pour obtenir le courant correspondant, on divise la capacité C par 5. Ainsi, pour des courants d'intensité différente, la capacité de la batterie

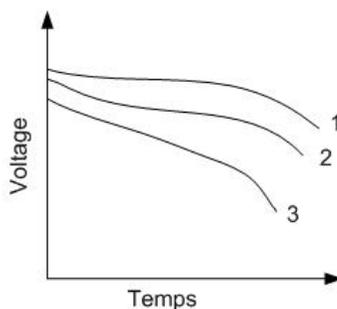


Figure 17 Variation du voltage aux bornes de la pile en fonction du niveau de décharge et de l'intensité du courant de décharge

sera inférieure ou supérieure à  $C$ , selon si le taux de décharge est plus important ou plus faible que le taux de référence  $C/5$ .

La température est un autre facteur important qui a un effet marqué sur le profile de décharge et la capacité de la pile. En effet, la baisse de température réduit l'activité chimique, ce qui fait augmenter la résistance interne de la pile. À la limite, l'électrolyte peut geler, empêchant le déplacement des charges électriques à l'intérieur de la pile. Généralement, les meilleures performances sont obtenues à des températures entre 20 et 40 degrés Celsius.

#### 1.4.4 Types de piles secondaires

Il existe plusieurs types de piles secondaires. Elles se différencient principalement par les matériaux utilisés dans la fabrication des électrodes, leur conférant des propriétés différentes. On a un compromis à faire entre la durée de vie de la pile, soit le nombre de cycles de charge et décharge supporté, le coût de fabrication, la stabilité chimique, l'entretien nécessaire, la densité d'énergie, la plage de température de fonctionnement et le profile de charge et de décharge.

On retrouve cinq principaux types de piles rechargeables [12] :

- a. acide-plomb (Pb) ;
- b. nickel-cadmium (NiCd) ;

- c. nickel-metal hydride (NiMH) ;
- d. lithium-ion (Li-ion) ;
- e. lithium-polymère (Li-poly).

Le type de pile le plus largement répandu est la pile acide-plomb [16]. Même si elle présente la plus faible densité d'énergie en poids et en volume, elle offre la meilleure performance par rapport à son coût de revient. La pile alcaline nickel-cadmium est la pile avancée la plus utilisée, elle peut supporter un plus grand nombre de cycles, elle offre une décharge plus profonde et peut supporter des taux de charge et de décharge plus élevés. Son coût est son principal inconvénient. Les différents types de batteries présentent des caractéristiques différentes. Les figures 18 et 19 montrent les profils de décharge et de charge de piles secondaires conventionnelles en fonction de l'état de charge. L'état de charge étant la capacité résiduelle de la pile sur sa capacité totale. On peut constater que le voltage varie en fonction de l'état de charge, il constitue donc une indication du niveau de charge de la pile.

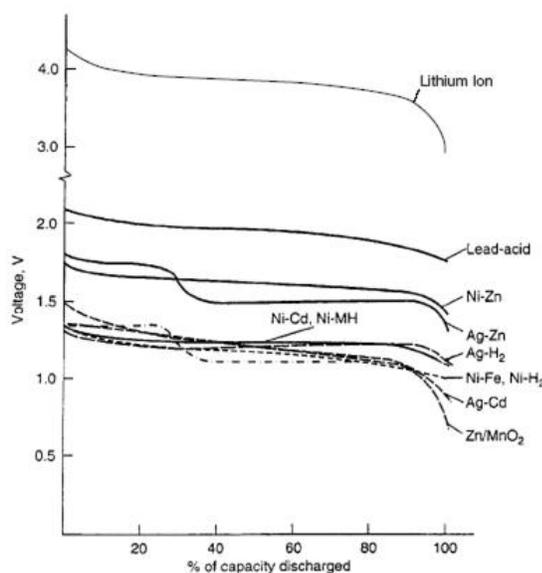


Figure 18 Profils de décharge de différentes piles secondaires conventionnelles au taux de décharge  $C/5$  [16]

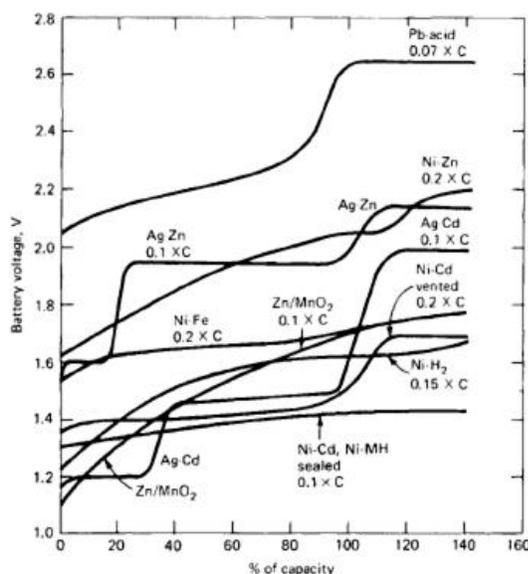


Figure 19 Profils de charge de différentes piles secondaires conventionnelles avec un courant constant [16]

#### 1.4.5 Caractéristiques de la pile acide-plomb

La pile acide-plomb est composée d'une électrode positive constituée de dioxyde de plomb ( $PbO_2$ ) et d'une électrode négative constituée de plomb métallique ( $Pb$ ) plongées dans une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ). Il existe différentes versions de la pile acide-plomb. Tout d'abord, une version dite "à décharge peu profonde" qui est utilisée principalement dans les voitures pour fournir de forts courants sur une courte période de temps. Une autre version, dite à "décharge profonde", permet de nombreux cycles complets de charge et décharge. Les systèmes servant à "entreposer" de l'énergie nécessitent ce type de pile. Il existe également des piles scellées qui utilisent un électrolyte en gel ne demandant pas d'entretien et permettant de poser la pile dans toutes les positions.

La plage de température de fonctionnement de la pile est entre -10 et 40 degrés Celsius. La température la plus basse qu'elle peut supporter dépend grandement de la concentration de l'électrolyte, plus la pile est déchargée, plus la concentration de l'électrolyte est faible, et plus le point de congélation se rapproche de zéro degré Celsius. Sa durée de vie est relativement basse, elle dépend de la profondeur des décharges et de sa conception; entre

50 et 2000 cycles. L'efficacité du cycle complet, après la charge et la décharge de la pile, en capacité, est d'environ 90% et d'environ 75% en énergie [16].

#### 1.4.5.1 Voltage de la pile acide-plomb

La pile acide-plomb utilisée pour les applications stationnaires, nécessitant une décharge profonde, a un voltage en circuit ouvert de 2.125V et entre 2.0V et 1.78V lors de sa décharge. À 1.75V, elle est considérée comme étant épuisée. Le voltage peut tomber aussi bas que 1V avec de forts courants de décharge, à de basses températures, en raison de l'impédance interne. Le voltage en circuit ouvert est fonction de la concentration de l'électrolyte, de son état de charge. En mesurant la densité de la solution électrolytique ou en mesurant la tension en circuit ouvert, il est donc possible d'avoir une indication de l'état de charge de la batterie [16]. Voir la figure 20 pour le profil de charge et de décharge de la pile acid-plomb.

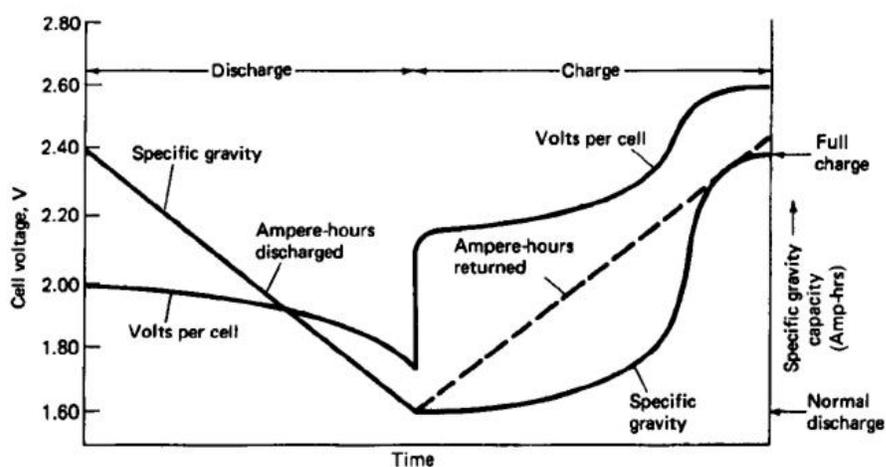


Figure 20 Profils de charge et de décharge de la pile acide-plomb [16]

#### 1.4.5.2 Protection et entretien

Durant l'opération de la batterie, de l'eau est perdue par évaporation et par électrolyse en oxygène et hydrogène. On doit donc vérifier périodiquement le niveau de l'électrolyte et ajouter de l'eau distillée au besoin. Il faut également ventiler l'endroit où se trouve la

batterie pour évacuer l'hydrogène libérée lors de sa décharge. L'hydrogène peut présenter un risque d'explosion.

La batterie va fournir la capacité mentionnée, jusqu'à atteindre un voltage final de 1,78V. Il est souvent possible de pousser plus loin la décharge, mais ceci ne devrait pas être fait de façon régulière. Décharger la batterie en deçà d'un certain seuil ou encore la laisser déchargée durant une trop longue période de temps occasionne la formation d'un sulfate dur et insoluble sur les électrodes. Ce qui réduit la surface active et augmente sa résistance, pouvant l'endommager de façon permanente. La durée de vie de la batterie est fonction du nombre de cycles par années que la batterie doit supporter et de la profondeur des décharges. On ne dépasse généralement pas une profondeur de décharge de plus de 80% afin de maximiser la durée de vie de la batterie. Pour faire disparaître une sulfatation légère, on doit soumettre la batterie à une période de surcharge à faible intensité de courant. Cependant, il faut prendre des précautions pour ne pas pousser la charge trop loin, car il y a alors dégagement de gaz, ce qui désagrège les électrodes.

Il faut également protéger la batterie au plomb du gel, car, chargée elle peut résister à des températures aussi basse que -40 degrés Celsius, mais sa résistance au gel, lorsqu'elle est déchargée, est moins bonne. Le gèle pourrait alors fendre le boîtier de la batterie.

#### **1.4.6 Modélisation de la pile**

C'est la batterie acide-plomb que l'on cherche à modéliser, puisque c'est le type de batterie le plus utilisé pour les applications nécessitant l'entreposage d'énergie. Les paramètres qui nous importent sont : la variation du voltage aux bornes de la batterie, la capacité ainsi que l'état de charge.

On a vu précédemment que le voltage varie 1) avec l'état de la batterie (en charge ou en décharge), 2) avec l'état de charge de la batterie, 3) avec la valeur de l'impédance interne et 4) l'intensité du courant. L'impédance interne varie : selon l'état de charge de la batterie, la température de l'électrolyte et l'âge de la batterie (l'usure de la batterie). On doit ainsi élaborer un modèle qui puisse rendre compte du comportement non-linéaire de la batterie.

Différents types de modèles ont été développés par les chercheurs [17]. Les modèles *physiques* procurent le plus de précision et permettent aux fabricants d'optimiser leurs batteries. Ils sont basés sur la modélisation des réactions électrochimiques qui ont lieu dans la pile. Ces modèles s'avèrent difficiles à configurer et demanderaient trop de temps de calcul pour analyser un système complet. Les modèles *empiriques* sont des équations mathématiques dont les paramètres sont ajustés pour représenter le comportement observé lors de tests expérimentaux. Ils ne représentent bien souvent qu'une partie du comportement de la batterie, ne se prêtant ainsi pas à la modélisation du système entier. Il existe également des modèles *mixtes*, représentant les réactions chimiques de la batterie, mais certaines simplifications sont obtenues en se basant sur des mesures expérimentales. Ces modèles demeurent également trop difficiles à utiliser. Avec les modèles *abstraites*, on tente de fournir une représentation équivalente de la batterie. Le plus souvent, on remplace la batterie par un circuit électrique équivalent dont certains paramètres doivent être déterminés expérimentalement.

#### **1.4.6.1 Représentation de la batterie par un circuit électrique équivalent**

Le modèle le plus simple et le plus largement utilisé est le modèle linéaire [18, 19], où la batterie est représentée par une source de voltage idéale ayant comme valeur le voltage en circuit ouvert  $E$ , en série avec une résistance  $R$ , figure 21. La valeur de la résistance est obtenue par un test en charge. Le voltage  $V_{bat}$  représente le voltage pris aux bornes de la batterie. Ce modèle est simple à utiliser et donne la variation du voltage aux bornes de la batterie en fonction de l'intensité du courant. Cependant, il ne tient pas compte de la variation du voltage et de la variation de l'impédance en fonction du niveau de charge de la batterie et de la température de l'électrolyte.

Un modèle plus intéressant est semblable au précédent, mais fait varier la valeur de la tension  $E$  et de la résistance  $R$  en fonction du niveau de charge de la batterie et de la température [20]. Des mesures expérimentales doivent être prises en laboratoire avec la batterie à modéliser afin de déterminer la valeur des différents paramètres du modèle. Quand ce n'est pas possible, pour des raisons techniques ou économiques, on peut approximer ces paramètres à partir des données fournies par le fabricant [21]. Ce modèle permet de tenir compte de l'effet de la température et de l'intensité du courant sur la capacité disponible

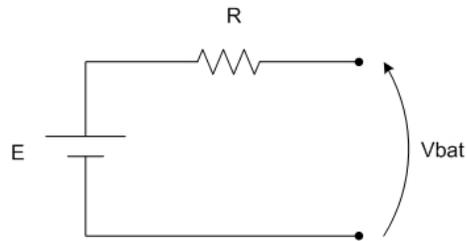


Figure 21 Modélisation de la batterie par un circuit électrique équivalent

ainsi que sur la résistance de la batterie. D'autres modèles ajoutent une branche résistive en parallèle avec la source E, afin de tenir compte d'effets parasites lors de la surcharge, ainsi que des capacitances en parallèle pour modéliser l'effet capacitif entre les plaques. Ce qui permet une modélisation dynamique de la charge et de la décharge de la batterie. On obtient ensuite l'état de charge de la batterie en comptabilisant les charges sortant et entrant, en intégrant tout simplement le courant.