

CHAPITRE 5

AMÉLIORATION DES PERFORMANCES

Il a été montré que la production énergétique de l'éolienne dépend du couplage entre le rotor, l'alternateur et la charge électrique. La mauvaise adéquation entre les caractéristiques intrinsèques du rotor et celles de l'alternateur ne permet pas à l'éolienne de capter toute l'énergie qui est disponible dans le vent. À faible vent, le rotor ne tourne pas suffisamment rapidement pour permettre à l'alternateur de générer un voltage supérieur à celui de la batterie et à hauts vents la puissance disponible dans le vent excède la puissance maximale de l'alternateur, limitée par son impédance synchrone. Il est cependant possible d'améliorer le couplage afin d'augmenter les performances de l'éolienne. Ce chapitre présente brièvement trois méthodes permettant d'améliorer les performances de l'éolienne :

- a. choix pour la batterie de la tension nominale optimale;
- b. ajout de condensateurs afin de réaliser une compensation série;
- c. contrôle actif de la charge électrique avec de l'électronique de puissance.

5.1 Puissance maximale et courbe cible

En principe, afin d'améliorer les performances de l'éolienne, on voudrait que pour toutes les vitesses de vents, le rotor puisse opérer à la vitesse de rotation qui amène une capture d'énergie maximale. En d'autres termes, on désire que le rotor puisse opérer en tout temps (sauf naturellement en période de régulation de puissance) à la vitesse spécifique (voir équation (1.6)) donnant le coefficient de puissance (C_p) maximal. Lorsque le rotor opère à cette vitesse spécifique, le vent que voit la pale a un angle d'attaque idéal, amenant une capture d'énergie maximale.

En utilisant la démarche présentée à la section 2.4, la figure 72 montre les courbes de puissance mécanique d'un rotor en fonction de la vitesse de rotation, pour différentes vitesses de vent, ainsi que la courbe de puissance électrique d'un alternateur (courbe tiretée). Afin de faire le couplage entre le rotor et l'alternateur, si on considère les différentes pertes électriques et mécaniques comme étant non négligeables, on doit les ajouter à la courbe de

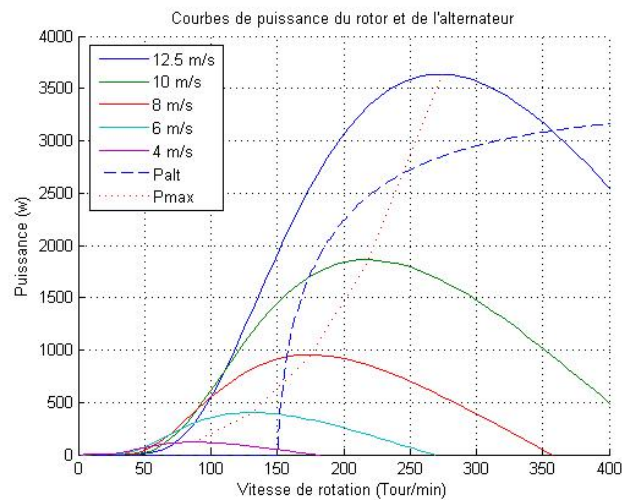


Figure 72 Courbes de puissance du rotor et de l'alternateur

l'alternateur pour obtenir la "courbe de couplage". Sur ce graphique, a été ajoutée la courbe cible, en pointillée, passant par les sommets des courbes du rotor. La courbe cible donne les points d'opération où le rotor opère à la bonne vitesse spécifique, celle de conception, amenant une extraction maximale d'énergie pour un vent donné. Pour aller chercher toute l'énergie que peut capter le rotor, il faudrait que la courbe de l'alternateur soit identique à la courbe cible, de façon à ce que l'équilibre entre le rotor et l'alternateur se fasse toujours à la bonne vitesse spécifique. On peut voir sur le graphique que ce n'est pas le cas. L'éolienne ne fonctionnera à la vitesse spécifique idéale que pour une ou deux vitesses de vent, là où la courbe de couplage croise la courbe cible. Améliorer les performances de l'éolienne demande ainsi de rapprocher la courbe de l'alternateur de la courbe cible.

5.2 Choix de la tension nominale optimale

Lors de la conception, une façon d'améliorer les performances de l'éolienne est évidemment de choisir une tension nominale adéquate. Pour un rotor et un alternateur en particulier, on peut calculer les différentes courbes de puissance obtenues selon différents niveaux de tension, comme il a été présenté à la section 4.1. En modifiant le niveau de voltage de la batterie, on déplace la courbe de l'alternateur vers la droite ou vers la gauche (figure 72). En augmentant le voltage, on améliore les performances aux vents forts, mais en contre

partie, on diminue les performances aux vents faibles, et vice versa. Lors de la conception, lors du choix de la tension nominale de la batterie, on se trouve alors à choisir si la courbe de l'alternateur va croiser la courbe cible à un vent fort ou à un vent faible. On pourrait alors optimiser le système en déterminant le niveau de voltage offrant le maximum de production énergétique en fonction d'une distribution statistique de vent. À titre d'exemple, la figure 73 montre les points d'opération pour trois niveaux de voltage : 24, 36 et 48V. La figure 74 donne les trois courbes de puissance calculées à partir de ces points d'opération. On remarque la différence marquée entre la courbe à 24V et la courbe à 48V : l'une favorisant les vents faibles et l'autre les vents forts. La courbe à 36 V se situant entre les deux. À titre indicatif, le graphique présente également la courbe maximale obtenue à partir du C_p max du rotor. À la figure 75 est montré la production annuelle en fonction de la vitesse moyenne de la distribution statistique de Rayleigh. On peut constater que c'est une tension nominale de 36 V qui va donner la plus grande production énergétique annuelle, sauf pour des sites ayant de basses vitesses moyennes (< 4 m/s), où un voltage plus bas donne de meilleurs résultats.

Cependant, le gain de performance est limité : d'une part parce qu'on doit se contenter du voltage des différentes batteries qui sont disponibles (ex. 2V, 12V, 24V, 48V, 120V) et d'autre part parce que la courbe de l'alternateur ne change pas de forme. C'est-à-dire, même si on peut changer la position de la droite de l'alternateur et choisir d'augmenter les performances à faibles vents ou à forts vents, l'extraction de puissance maximale ne se fait toujours qu'à une seule vitesse de vent, le couplage n'étant pas optimal sur le restant de la plage de vitesse de vent.

5.3 Compensation série

Une autre méthode permettant d'améliorer les performances de l'éolienne consiste à ajouter des condensateurs au montage afin de réaliser une compensation série et ainsi modifier la courbe de puissance de l'alternateur. Comme on peut voir à la figure 72, la courbe de l'alternateur plafonne avec l'augmentation de la vitesse de rotation. Ceci est causé par l'inductance des enroulements, qui augmente l'impédance du circuit à mesure qu'augmente la fréquence électrique du courant, limitant ainsi le courant de sortie. La fréquence du courant est liée directement à la vitesse de rotation du rotor.

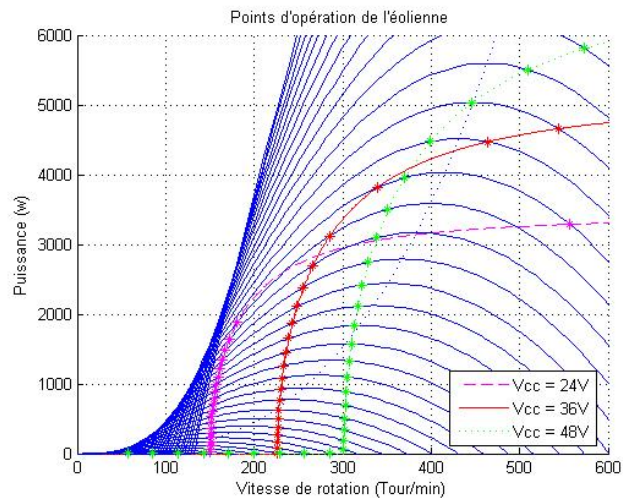


Figure 73 Choix du niveau de tension lors de la conception, points d'opération pour trois niveaux différents de tension

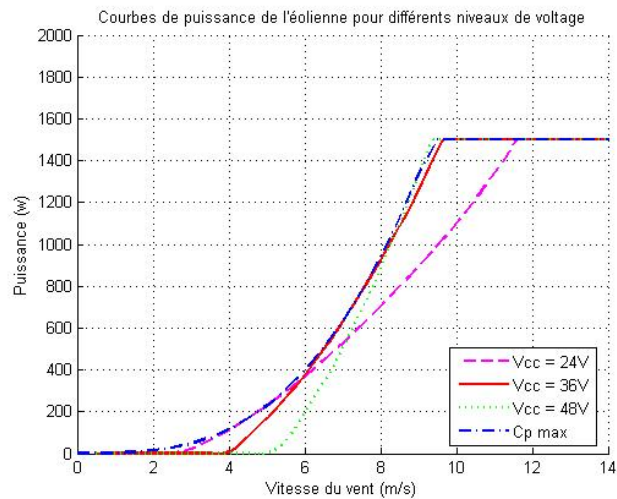


Figure 74 Choix du niveau de tension lors de la conception, courbes de puissances de l'éolienne selon trois niveaux de tension nominale

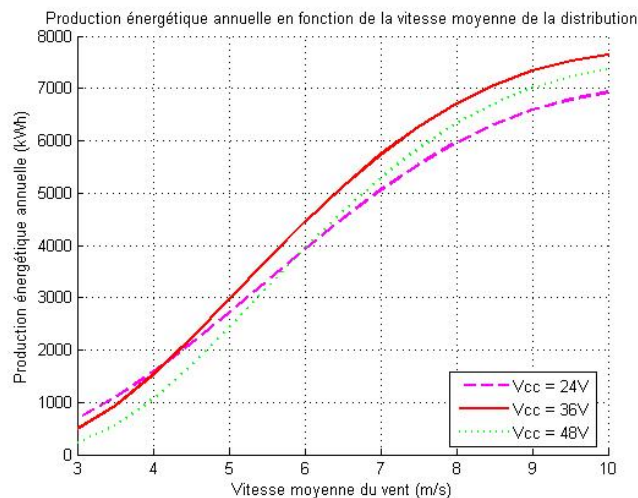


Figure 75 Choix du niveau de tension lors de la conception, production énergétique annuelle selon trois niveaux de tension nominale

En ajoutant des capacités au montage, on contre balance l'effet des inductances. Cependant, l'impédance des capacités diminue avec l'augmentation de la fréquence électrique et celle de l'inductance augmente. Ainsi, on choisissant adéquatement la valeur des capacités ajoutées au circuit, à une certaine vitesse de rotation, on peut annuler l'effet des inductances, le courant n'étant plus limité que pas la résistance du circuit. À ce point, on dit qu'il y a résonance du circuit électrique.

Cette méthode présente des limitations importantes, puisqu'elle n'augmente la puissance de sortie de l'alternateur qu'autour d'une certaine plage de vitesse, pouvant même diminuer les performances à d'autres vitesses de rotation. On doit choisir la valeur de la capacité minutieusement, afin d'approcher la courbe de l'alternateur de la courbe cible et ne pas plutôt l'éloigner. De plus, il faut faire bien attention de ne pas faire augmenter le courant au-delà de la limite de l'alternateur, afin de ne pas brûler ses enroulements. Comme il est avancé par Drouilhet et al. [1], la compensation série n'est pas une méthode efficace pour améliorer le couplage entre le rotor et l'alternateur.

5.4 Contrôle au niveau de la charge électrique

En contrôlant activement la charge électrique qui est appliquée à l'alternateur, on peut optimiser les performances de l'éolienne. Ceci peut se faire en ajoutant des composantes électroniques au système, afin de découpler le rotor et l'alternateur et permettre ainsi au rotor d'opérer à une vitesse de rotation optimale. Les développements des dernières années en matière d'électronique de puissance et de système de contrôle ont rendu de plus en plus accessible de telles applications. On peut ainsi améliorer la production de l'éolienne, mais également réduire le bruit des pales puisqu'elles opèrent toujours à la bonne vitesse spécifique. Par contre, on augmente le coût du système, ainsi que sa complexité, augmentant les risques de bris et d'arrêt de production. Pour le moment, peu de petites éoliennes semblent bénéficier de tels systèmes de contrôle [40], probablement en raison du coût par rapport aux gains escomptés. Cette section présente une revue de différents systèmes qui ont été proposés dans la littérature pour améliorer les performances des systèmes hors réseau ainsi qu'un exemple de calcul de gain potentiel.

5.4.1 Principe de fonctionnement

Comme on a vu précédemment, en modifiant le niveau de voltage vu par l'alternateur, on change la courbe de puissance de l'alternateur, modifiant ainsi les points d'opération. En fait, varier le voltage aux bornes de l'alternateur, fait varier le courant qui circule dans l'alternateur et incidemment le couple électromécanique qui est appliqué à l'arbre de rotation. Le niveau de voltage du bus CC est imposé par la batterie, mais en ajoutant des composantes électroniques au système, entre la batterie et l'alternateur, il est possible de contrôler le niveau de voltage vu par l'alternateur et incidemment, le courant de l'alternateur. Le voltage vu par l'alternateur n'est donc plus imposé par la batterie et peut être ajusté activement pendant le fonctionnement de l'éolienne. En se référant à la figure 72, ainsi qu'à la figure 78 montrant les courbes du couple mécanique du rotor, du couple électromécanique de l'alternateur et la courbe cible, on peut voir qu'en contrôlant la tension, on cherche à faire glisser la courbe de l'alternateur de façon à ce que les points d'équilibre dynamique suivent la courbe cible. Pour ce faire, deux méthodes ont été proposées. La première méthode consiste à remplacer le redresseur en pont de diode par un redresseur commandé (figure 76). On peut utiliser un pont complet à thyristor [38, 41] ou un demi

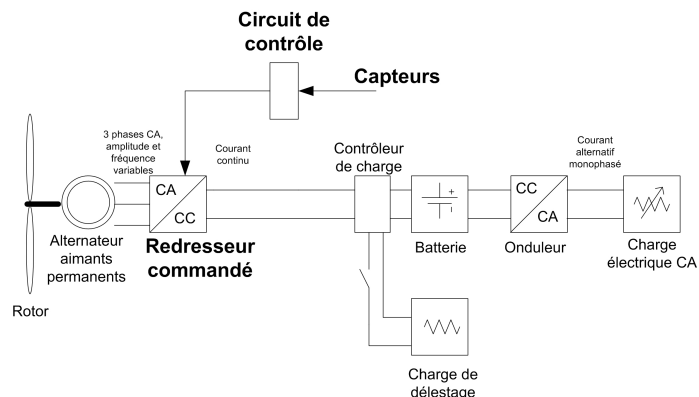


Figure 76 Contrôle avec pont commandé

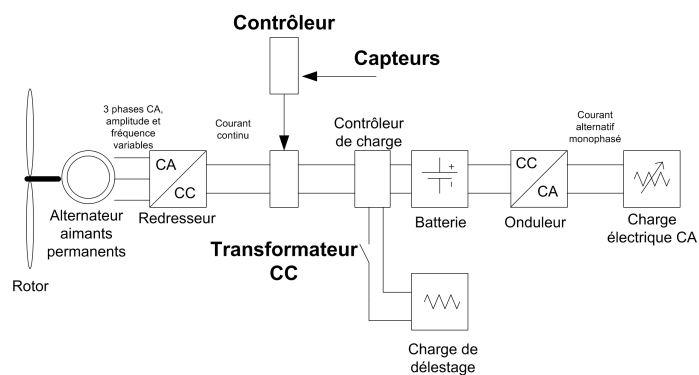


Figure 77 Contrôle avec convertisseur à courant continu

pont afin de diminuer le nombre de composantes de commutation [42]. On peut également utiliser un convertisseur à modulation de largeur d'impulsion [43, 44] utilisant des transistors MOSFET ou IGBT. La seconde méthode présentée suggère de garder le redresseur en pont de diode et d'ajouter un transformateur à courant continu entre le redresseur et la batterie (figure 77). Bon nombre d'auteurs privilégie cette approche [45, 4, 1], car le transformateur à courant continu ne requiert qu'une seule composante à commutation comparativement à trois ou six pour le redresseur commandé.

Dans tous les cas, il s'agit de systèmes ayant des composantes d'électronique de puissance, généralement des thyristors, des IGBT ou des MOSFET, nécessitant un signal de

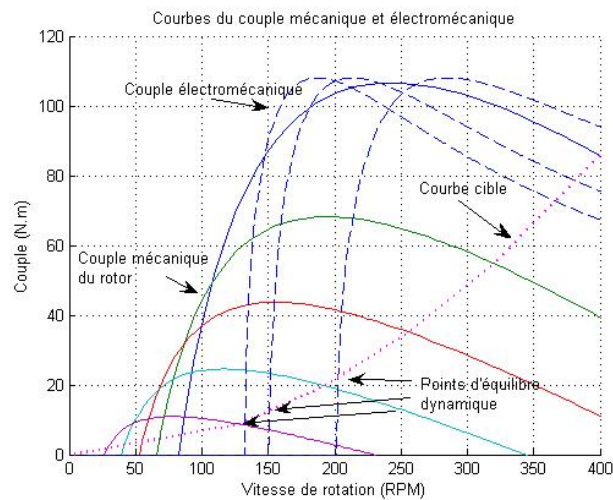


Figure 78 Couple mécanique du rotor et de l'alternateur

commande. On doit donc ajouter à l'éolienne des capteurs, ainsi qu'un système électronique de contrôle, afin d'ajuster la commande à l'état de l'éolienne. Le système de contrôle fait la lecture de différents paramètres, selon l'algorithme de contrôle choisi et estime si l'éolienne opère à sa capacité maximale. Il ajuste alors la commande afin d'amener le rotor à tourner à la bonne vitesse de rotation. Différents algorithmes de contrôle ont été suggérés. Le système de contrôle peut être réalisé avec un circuit analogique, un circuit numérique ou encore de façon en utilisant un microcontrôleur. Le type de circuit nécessaire va dépendre de l'algorithme d'optimisation choisi : de sa complexité, de la vitesse de calcul demandée ainsi que de la nécessité de faire usage ou non d'espace mémoire.

5.4.2 Algorithmes de contrôle

On distingue deux types d'algorithmes de contrôle. Un premier type, utilisé avec les systèmes photovoltaïques, appelé *conversion optimale d'énergie* ou *maximum power point tracking* (MPPT) en anglais, consiste à modifier constamment la consigne du convertisseur en se basant sur la lecture de la variation de la puissance électrique qui est mesurée à la sortie de l'alternateur. Ce système de contrôle ne nécessite pas une connaissance préalable des composantes du système; le module peut ainsi être ajouté à n'importe quelle petite éolienne. Son principe de fonctionnement est simple, mais serait mal adapté à la

dynamique des petites éoliennes ; puisqu'il recherche constamment le point d'opération optimal, il serait trop lent par rapport à la vitesse de variation du vent [4]. Yamamuran et al. [45] ont présenté un tel système.

Le deuxième type d'algorithme d'optimisation nécessite une connaissance préalable des caractéristiques du rotor et de l'alternateur utilisés. Si on connaît les caractéristiques du système, il est plus rapide d'aller directement au point d'opération optimal que de le chercher à l'aveuglette. Les premiers algorithmes proposés demandent d'utiliser des capteurs mécaniques, anémomètres et tachymètre, pour faire la lecture de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation du rotor [42]. Connaissant la vitesse du vent, le système se réfère à une table gardée en mémoire indiquant la vitesse de rotation que le rotor devrait avoir pour extraire un maximum d'énergie. Le système peut également utiliser une fonction de transfert implémentée par le biais d'un circuit électronique. D'autres systèmes proposés évitent d'utiliser des capteurs mécaniques et se basent plutôt sur la mesure de la puissance électrique de sortie ainsi que sur la fréquence de la tension [46] ou encore sur l'intensité du courant [43, 44] afin d'estimer la vitesse du vent. Ils comparent les lectures à des valeurs de référence afin d'ajuster le niveau de tension et converger vers le point d'opération optimal. Ces systèmes nécessitent des microcontrôleurs suffisamment rapides afin d'éviter un délai entre la variation du vent et le calcul de la commande ainsi que de l'espace mémoire pour y garder la table de vérité. Un autre algorithme d'optimisation se veut un peu plus simple, il ne se base que sur la lecture de la fréquence électrique, à laquelle est associée un signal de commande. La relation entre la fréquence et le voltage optimal est linéarisée de façon à pouvoir utiliser un simple circuit analogique, plutôt qu'un microcontrôleur [4]. De plus récentes études proposent d'utiliser des algorithmes d'intelligence artificielle pour faire le contrôle du système, basé sur la logique floue ou les réseaux de neurones [47, 48].

Ce type d'algorithme de contrôle nécessite une connaissance préalable des caractéristiques de l'éolienne, ce qui peut parfois être difficile à obtenir. En effet, certains paramètres permettant la modélisation de l'éolienne peuvent être difficile à mesurer si on n'a pas participé à sa conception, comme la courbe C_p du rotor par exemple. De plus, ces paramètres sont différents d'une éolienne à l'autre, demandant un algorithme de contrôle différent pour chaque éolienne. Également, puisque l'éolienne peut se détériorer avec le temps (modification des propriétés aérodynamiques du rotor avec l'usure de la pale par exemple), on

peut imaginer une baisse des performances du système de contrôle avec le temps, puisque l'éolienne ne présente plus les mêmes caractéristiques qu'au moment du calcul de la table de vérité. Dans ces articles, il n'est pas fait mention de l'effet potentiel de la variation du voltage de la batterie sur l'algorithme de contrôle. En effet, si la table de vérité ou la fonction de transfert idéale est calculée en prenant pour acquis que le niveau de voltage reste toujours constant, peut-être que sa variation lors du fonctionnement peut avoir un impacte négatif sur les performances de système d'optimisation, ne permettant pas d'atteindre les gains escomptés. Ceci spécialement si la courbe C_p du rotor est très pointue.

5.4.3 Gain potentiel

Tous les systèmes proposés améliorent en principe les performances de l'éolienne, mais tous ne s'entendent pas sur le gain que peut apporter un tel dispositif. Les différents systèmes de contrôle développés ont été conçus par des auteurs différents, pour des éoliennes différentes et les systèmes qui ont été testés, l'ont été sous différentes conditions de vent. Comme il est démontré par Hoffmann et Mutschler [49], les paramètres de conception de l'éolienne tel que le profil de la pale et la vitesse spécifique de conception, ainsi que les conditions du site; le vent moyen et le niveau de turbulence, influencent les performances du système de contrôle. Pour ces raisons, il est difficile de comparer les différents systèmes entre eux. Le gain envisagé varie d'un auteur à l'autre, d'une étude à l'autre, il est de 10% [40], 10-15% [50], 38% [39], de 30-50% [46] et de 50% [4]. D'autres auteurs présentent le système de contrôle, mais ne quantifient pas l'amélioration des performances. De plus, ceux qui le font, calculent l'influence d'un seul système de contrôle appliqué à une éolienne en particulier, ils ne comparent pas les différents systèmes entre eux. Chose certaine, le choix de la stratégie de contrôle à une influence importante sur le rendement du système.

Pour visualiser le gain potentiel d'un tel dispositif, la figure 79 montre quatre courbes de puissance en fonction de la vitesse du vent. La première courbe donne la puissance du vent à travers une surface, correspondant à la surface balayée par un rotor, la seconde courbe correspond à la puissance théorique maximale qu'il est possible d'extraire (limite de Betz) et la troisième courbe, à titre d'exemple, est la courbe de puissance d'une éolienne opérant à son coefficient maximal de puissance de 0.41 (courbe cible ou optimale). La

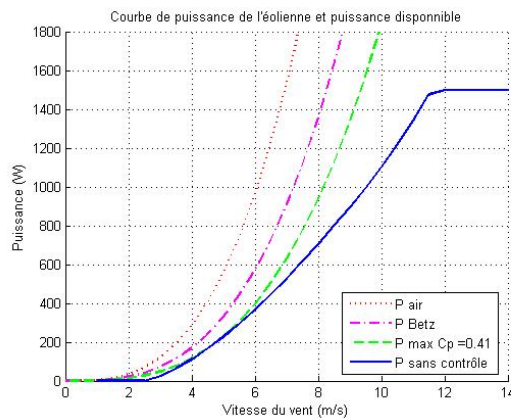


Figure 79 Courbe de puissance d'une éolienne et courbes de puissance présentant la puissance disponible dans l'air, la puissance maximale théorique (Betz) ainsi que la puissance à C_p max du rotor

quatrième courbe est la courbe de puissance de l'éolienne, non contrôlée, calculée avec la méthode présentée à la section 2.4, à partir des caractéristiques du rotor et de l'alternateur alors présentés, en négligeant toujours la résistance de l'induit. La différence entre les deux dernières courbes représente le gain potentiel. En contrôlant la vitesse de rotation, au mieux, on passe de la courbe non contrôlée à la courbe idéale. On peut constater que la différence entre les deux courbes peut être assez importante, mais le gain d'énergie en terme de pourcentage sera fonction de la distribution du vent.

On peut estimer le gain potentiel de production qu'il est possible d'atteindre en utilisant directement la courbe de puissance tracée à partir du C_p max du rotor. En effet, idéalement, le système de contrôle ajouté à l'éolienne devrait permettre au rotor de toujours opérer à son coefficient de puissance maximal. La figure 80 montre la courbe de puissance maximale de l'éolienne, en reprenant les caractéristiques de l'éolienne utilisée au chapitre 4. En calculant ensuite la production annuelle, en utilisant la courbe de puissance idéale et la courbe de puissance normale, on peut estimer le gain maximal de production qu'il serait possible d'obtenir. La figure 82 montre les productions énergétiques annuelles en fonction de la vitesse moyenne de la distribution statistique du vent (distribution de Rayleigh). La figure suivante donne l'augmentation maximale de production, par l'ajout du système de contrôle, en pourcentage. On peut constater que le gain maximal anticipé,

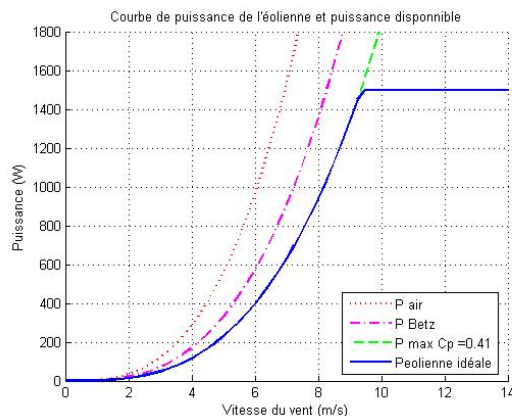


Figure 80 Courbe de puissance maximale d'une éolienne et courbes de puissance présentant la puissance disponible dans l'air et la puissance maximale théorique (limite de Betz)

pour cette éolienne en particulier, se situe entre 12 et 18%, selon la vitesse moyenne du site. Cependant, en raison de la turbulence et de l'inertie du rotor, on peut croire que le système ne parviendra pas à maintenir le rotor toujours à la bonne vitesse spécifique. De plus, il faut prévoir les pertes électriques et mécaniques, notamment les pertes associées au convertisseur que l'on doit ajouter au système pour faire le contrôle, qui est de l'ordre de 1 % [51].

En somme, différents systèmes de contrôle visant à améliorer les performances de l'éolienne ont été proposés. Ces systèmes permettent d'opérer le rotor à la vitesse de rotation offrant l'extraction maximale d'énergie. Ils diffèrent aux niveaux des capteurs requis, de l'électronique nécessaire ainsi que de l'algorithme de contrôle. En se basant sur la littérature disponible, il est difficile de comparer les systèmes entre eux puisque ce ne sont pas tous les auteurs qui quantifient l'amélioration des performances. De plus, chaque système est adapté à une éolienne en particulier et pour des conditions de vent données. Chose certaine, le choix de la stratégie de contrôle a un impact sur les performances du système, mais le gain reste incertain en raison du coût supplémentaire et du risque de mal fonctionnement.