

**Etude du cycle de  
fonctionnement sur site de  
l'ensemble turbine  
hydrolienne à pas fixe,  
convertisseur et MSAP en  
modes sain et dégradés**

---

## I-INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la capacité d'extraction d'énergie d'une génératrice synchrone polyphasées à aimants permanents associée à une turbine hydrolienne à pas fixe sur un site hydrolien en modes sain et dégradés. L'utilisation d'une MSAP (Machine Synchrone à Aimants Permanents) avec un convertisseur à IGBT associée en entraînement direct à une turbine à pas fixe est un choix intéressant en termes de compromis coût/robustesse car cette solution permet de minimiser les systèmes mécaniques qui nécessitent des niveaux de maintenance élevés. Cette solution impose cependant des stratégies de commandes particulières, afin d'appliquer une stratégie d'extraction optimale avec limitation de puissance de pouvoir suivre une caractéristique couple vitesse particulière. Cette caractéristique comprend un mode de survitesse de type défluxage sur une large plage de fonctionnement en vitesse variable [18, 69] [2,4]. Cette caractéristique couple vitesse en mode sain constituera le principal élément du cahier des charges des ensembles convertisseurs machines que nous étudieront ici.

Du fait de la difficulté d'accès aux systèmes localisés sous la mer, nous supposons que si un défaut apparaît, un temps important de l'ordre de plusieurs semaines s'écoule entre l'apparition du défaut et une intervention de maintenance corrective. C'est pourquoi nous supposons que dans ce cas, l'utilisation de la machine en mode dégradé doit permettre de continuer d'extraire le plus possible de l'énergie. C'est pourquoi nous nous attacherons à quantifier l'énergie extraite en mode sain et en modes dégradés sur une période significative. Ainsi, après avoir caractérisé la ressource (courant de marées) d'un site typique sous forme de données statistiques, et fait le choix d'une turbine, nous comparerons plusieurs ensembles convertisseur machine et évaluerons leurs capacités à fonctionner avec des performances satisfaisantes en modes sains et dégradés.

## II-Choix du site

Le choix du site sur lequel est basé l'étude est fait à partir de l'identification de sites potentiellement attractifs pour l'exploitation de l'énergie hydrolienne.

Une telle identification a été faite en Bretagne. Ce qui a permis de localiser des sites particulièrement attractifs en termes d'exploitation d'énergies renouvelables marines, illustrés par la Figure 89 tirée de [11].

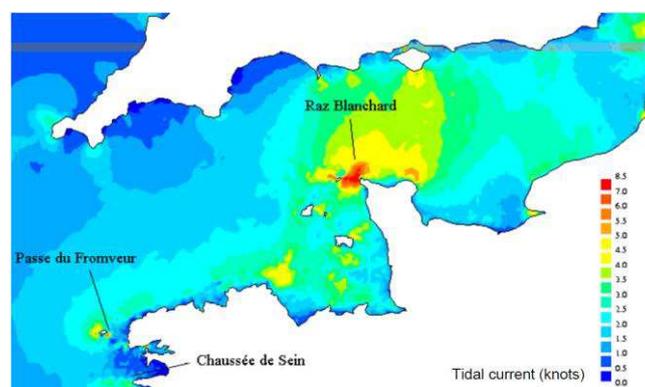


Figure 89: Cartographie des sites attractifs en Bretagne (France) tirée de [11].

Les données utilisées dans cette étude correspondent à un site situé dans le Raz du Sein où le potentiel énergétique est évalué dans [123]. Cette évaluation consiste à déterminer la vitesse des courants marins et leurs occurrences ( $OCC_i$  : nombre d'heures correspondant à chaque valeur de vitesse) sur une période significative au niveau de la variation des courants de marée (8424 heures). Cette étude montre que la vitesse des courants marins atteint sur ce site une valeur maximale de 3.6 m/s. Ce qui le situe parmi les sites les plus attractifs en termes de ressource énergétique.

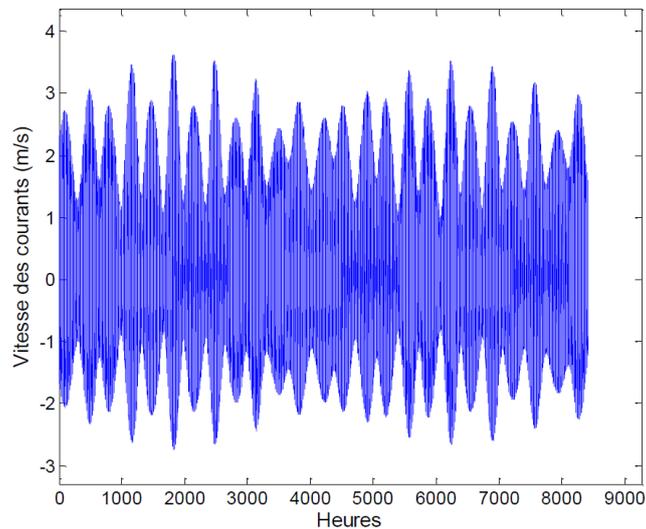


Figure 90: Vitesses des courants marins en fonction du temps, sur 8424 heures, tirée de [123].

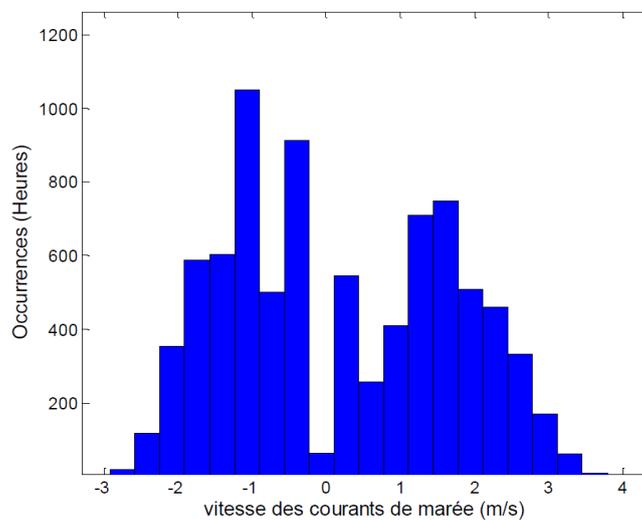


Figure 91: Répartition des occurrences en fonction des vitesses des courants marins, tirée de [123].

La connaissance de la valeur des courants marins et des occurrences de ces valeurs données à la Figure 91 et dans la Table 19 de l'annexe 7, permet de déterminer l'énergie cinétique sur le site, qui traverse une section balayée par les pâles de la turbine, de surface perpendiculaire à l'écoulement [123], durant la période d'étude. L'énergie extractible sur le site dépendra alors de la turbine choisie.

## II-Choix de la turbine

### II-1-Modélisation de la turbine

Pour des raisons de fiabilité, la turbine est choisie comme étant une turbine à pas fixe par opposition à une turbine à pas variable qui nécessite une maintenance plus fréquente. Cette turbine est conçue pour pouvoir fonctionner de manière similaire dans les 2 deux directions principales du courant (flot et jusant) en utilisant un profil de pale symétrique [124]. L'inversion du sens du courant correspond alors à une inversion de la vitesse de rotation. Une fois que toutes les caractéristiques du site d'exploitation sont déterminées et la turbine à mettre en place choisie, il faut définir une stratégie d'extraction de puissance adaptée. Si on se place dans le contexte particulier d'une turbine à pas fixe, on est amené, lorsqu'on est en dessous d'une vitesse nominale de courant marin  $V_n$ , à piloter la vitesse de la turbine de telle sorte que le maximum de puissance puisse être extrait pour chaque vitesse de courant. Puis à limiter cette puissance lorsque la valeur du courant dépasse cette valeur nominale. Au premier ordre, on peut considérer que la turbine à pas fixe que nous étudierons est caractérisée au sens de sa performance hydrodynamique par une courbe de coefficient de puissance qui dépend du rapport de la vitesse périphérique des pales et de la vitesse du fluide :  $C_p = f(\lambda)$  avec  $\lambda = \Omega \cdot R_{turbine} / v$  comme le montre la Figure 92.

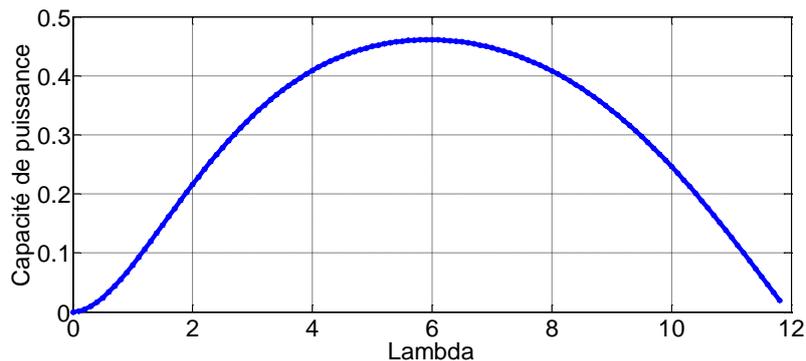


Figure 92: Exemple de Caractéristique  $C_p = f(\lambda)$  de la turbine hydrolienne à pas fixe étudiée.

On constate qu'il existe une seule valeur de  $\lambda$  ( $\lambda = 5,9$  dans notre cas) pour lequel le coefficient de puissance est maximal (ici  $C_{pmax} = 0,46$ ). Dans la suite nous considérerons que la turbine étudiée correspond à la caractéristique de la Figure 92 et à un diamètre de 12m.

### II-2-Stratégie de pilotage de la turbine [19]

Pour les valeurs de courant inférieure à  $V_n$ , il faudra alors adapter la vitesse de la turbine à la vitesse du courant afin de maintenir  $\lambda$  à sa valeur optimale de façon à ce que la puissance extraite soit maximale, d'où la stratégie de commande dite « MPPT » (« Maximum Power Point Tracking ») illustrée par la première partie de la courbe pointillée rouge présentée à la Figure 93. La puissance extraite par MPPT s'exprime par l'équation (4.1).

$$P_{MPPT} = \frac{\pi}{8} \rho_{eau} D^2_{turbine} C_{p,max} |v^3| \quad (4.1)$$

Au-delà d'une certaine vitesse de courant marin (vitesse nominale) on souhaite limiter la puissance extraite à la puissance nominale du système afin de trouver le meilleur compromis entre le dimensionnement de la chaîne électromécanique qui dépend directement de cette puissance nominale et la quantité totale d'énergie extraite. En effet les vitesses extrêmes de courant (au-delà de la vitesse nominale) ne se produisent que peu d'heures dans la période étudiée et ne sont donc associées qu'à une faible quantité d'énergie pouvant être extraite.

Si on prend comme référence le cas où on ne limite pas la puissance, la quantité d'énergie extractible (c'est-à-dire sans stratégie de limitation) avec la turbine peut être déterminée pour chaque vitesse de courant marin par l'équation (4.2) suivante [123] :

$$E^i(v_i) = \frac{1}{2} \rho_{eau} |v_i|^3 \times OCC_i(v_i) \times S_{turbine} \times C_{p,max} \quad (4.2)$$

Ainsi l'énergie totale extractible sans stratégie de limitation sur la période de référence correspond à la somme des énergies pour chaque vitesse de courant.

$$E_t = \sum_i E^i(v_i) \quad (4.3)$$

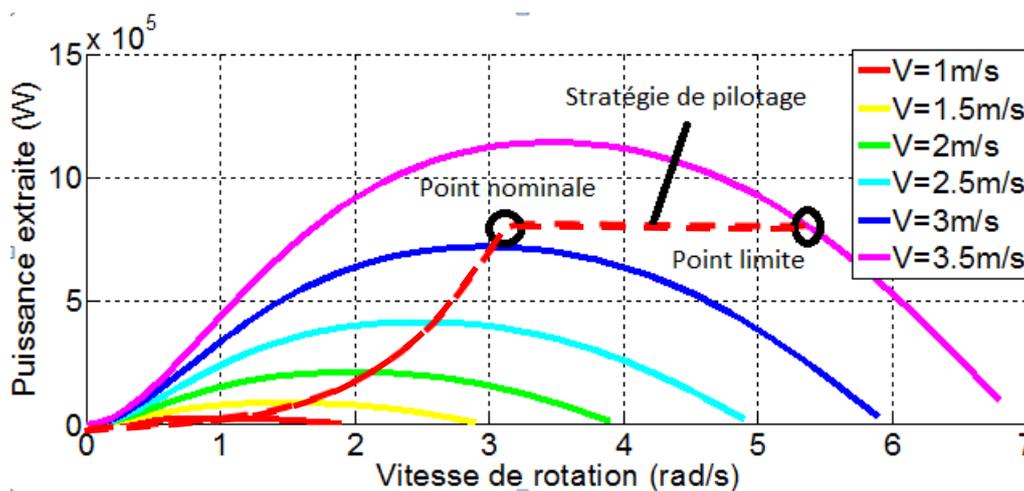


Figure 93: Commande d'une hélice hydrolienne par MPPT avec limitation de puissance pour une turbine de 12m correspondant à la courbe de Cp de la figure 92.

Si l'on utilise la stratégie présentée dans [19, 69], au de-là de la vitesse de courant nominale (correspondant à la puissance limite) on maintient la puissance constante par accélération de la turbine comme montré dans la deuxième partie de courbe pointillé rouge de la Figure 93. Ainsi, la puissance extraite s'exprime par l'équation (4.4).

$$P = \min(P_{MPPT}, P_{lim}) \quad (4.4)$$

la vitesse de courant au point nominal peut être caractérisée par l'équation (4.5).

$$V_n = \sqrt[3]{\frac{P_{lim}}{\left(\frac{\pi}{8} \rho_{eau} D^2 C_{p,max}\right)}} \quad (4.5)$$

la vitesse de rotation nominale correspondant à  $V_n$  de la turbine,  $\Omega_n$  (en rad/s) est alors donnée par l'équation (4.6).

$$\Omega_n = \frac{\lambda_{opt} v_n}{(D_{turbine}/2)} \quad (4.6)$$

La vitesse de rotation maximale de la turbine est notée  $\Omega_{lim}$  et est calculé à partir de l'intersection entre la consigne de puissance de la turbine et la courbe de puissance de la turbine correspondant à la vitesse maximale des courants marins (Figure 93). Ce point est représenté sur la Figure 93 (point limite) et est caractérisé par l'équation (4.7) et correspond au point de fonctionnement extrême sur le site.

$$\Omega_{lim} = \frac{\lambda_{lim} v_{max}}{(D_{turbine}/2)} \quad (4.7)$$

La valeur  $\lambda_{lim}$  est calculée par résolution de l'équation (4.8). Sachant que la fonction  $C_p(\lambda)$  correspond à la Figure 92. Cette courbe de  $C_p(\lambda)$  est alors interpolée comme dans [125] (fonction d'interpolation donnée à l'annexe 8).

$$C_p(\lambda) - \frac{P_{lim}}{\frac{\pi}{8} \rho_{eau} D_{turbine}^2 |v_{max}|^3} = 0 \quad (4.8)$$

Connaissant les valeurs de  $P_{lim}$ , les dimensions de la turbine et sa caractéristique ( $C_p(\lambda)$ ) il est alors possible de déterminer l'énergie extraite par la turbine.

$$E_{extraite} = \sum_i P(v_i) \times OCC_i(v_i) \quad (4.9)$$

$OCC_i$  étant le nombre d'heures de présence de la vitesse de courant  $v_i$

La Figure 94 montre l'énergie extraite calculée en pourcentage par rapport à l'énergie maximale extractible en fonction de la puissance d'écrêtage ( $P_{lim}$ , est exprimée en pourcentage de la puissance maximale extractible sans limitation).

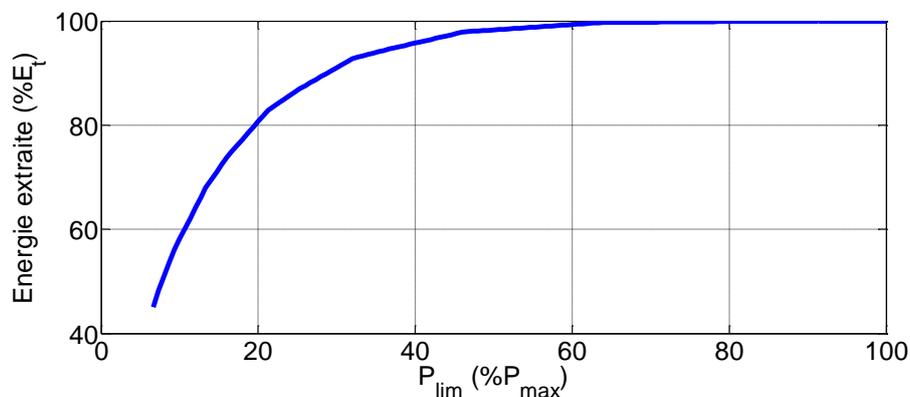


Figure 94: Energie extraite par l'hydrolienne en fonction de la puissance d'écrêtage.

On constate qu'un écrêtage à 30% de la puissance maximale permet d'extraire 87% de l'énergie totale [123]. Adopter cette valeur de puissance de limitation revient alors à écrêter la puissance à 380 kW, ce qui correspond à une vitesse de turbine,  $\Omega_n$ , de 2.4 rad/s au point nominal (fin de MPPT). Nous adopterons ces valeurs pour la suite de l'étude. Ces valeurs constituent des paramètres clés pour le choix de l'ensemble convertisseur-machine. En effet, la stratégie de pilotage de la turbine permet d'obtenir une caractéristique couple-vitesse que l'ensemble convertisseur-machine doit être capable d'atteindre (Figure 95) pour suivre la stratégie d'extraction. Cette courbe est obtenue en divisant la caractéristique puissance/vitesse par la vitesse de rotation de la turbine. Cela signifie que la caractéristique couple vitesse intrinsèque de l'ensemble convertisseur machine en mode sain doit dominer cette caractéristique désirée.

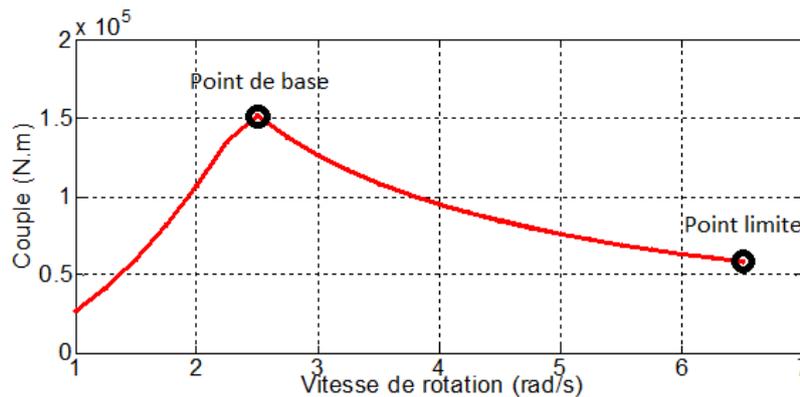


Figure 95 : Caractéristique couple-vitesse de la turbine hydrolienne en limitation de puissance.

Ainsi, pour pouvoir qualifier les capacités d'un ensemble convertisseur/générateur à extraire de façon optimale, la ressource disponible, il faut alors déterminer la caractéristique puissance/vitesse ou couple/vitesse qu'il peut atteindre (caractéristique intrinsèque). Cette caractéristique couple-vitesse devra dominer celle de la turbine hydrolienne de manière à ce que l'ensemble convertisseur-machine soit en mesure d'extraire l'énergie disponible selon la stratégie définie.

Afin de pouvoir qualifier les capacités d'extraction d'un système basé sur une machine synchrone pentaphasée à aimants permanents, nous avons étudiés des ensembles convertisseur/machine polyphasés en mode sain et en modes dégradés. Différents cas sont étudiés selon le type de convertisseur et le contenu harmonique de la force électromotrice.

### III-Caractéristiques de l'ensemble convertisseur-machine

Le choix de l'ensemble convertisseur-machine est fait selon les critères de redondance. Pour cela, nous avons étudié le cas d'une MSAP à 5 phases associée à un convertisseur à 5 « bras » et d'une MSAP à 2X3 phases associées à 2 onduleurs triphasés indépendants. L'intérêt est pour chaque structure, de choisir la « meilleure » machine capable d'extraire au mieux l'énergie disponible, tout en ayant la capacité d'extraire une quantité d'énergie assez significative en mode dégradé. Dans la mesure où le système est à entraînement direct, la vitesse nominale ou vitesse de base de la génératrice devra correspondre à celle de la turbine, notée  $\Omega_n$ . Le point de base de la machine qui correspond au moment où la tension

atteint la tension nominale correspondra donc à cette vitesse nominale et le couple nominal des machines étudiées correspondra à ce point de base ( $P_{lim}$  à  $\Omega_n$ ).

### III-1-Choix des données caractéristiques de la MSAP en mode sain

Le choix de la tension du bus DC du convertisseur, qui revient à faire le choix de la tension simple maximale pouvant être contrôlée au niveau de la génératrice, est un élément important dans la détermination de la caractéristique couple-vitesse. Cette tension du bus DC est fixée à une valeur de 2000 V pour tous les cas.

Sachant que le système est à entraînement direct, les caractéristiques de la turbine imposent alors un couple nominal à la vitesse de base de  $1,56 \cdot 10^5$  N.m. La caractéristique couple-vitesse de la MSAP doit dominer celle de la turbine. Cette contrainte impose d'avoir un couple de la machine supérieur ou égal à  $5,85 \cdot 10^4$  N.m à la vitesse maximale de 6,5 rad/s (point de vitesse limite de la Figure 95). Ces valeurs liées au cahier des charges sont données dans la première partie de la Table 10.

Dans [123] une machine triphasée à une encoche par pôle et par phase a été optimisée en termes de dimensions géométriques pour ce cahier des charges. Nous conserverons les grandeurs géométriques de la Table 11 et les garderons constantes pour toutes les machines à bobinages concentrés étudiées. Ainsi au premier ordre, les pertes et le volume global des machines étudiées demeurent constants en mode sain et seront compatibles avec l'application.

Table 10: Caractéristiques liées au cahier des charges hydrolien.

<b>Caractéristiques générales</b>	
Couple de base (kN.m)	156
Vitesse de base (tr/min)	22,9
Couple à la vitesse limite (kN.m)	58,5
Vitesse limite (tr/min)	62
Tension du bus DC (V)	2000
<b>Paramètres fixés de la machine</b>	
Coefficient de remplissage des encoches	0,5
Ouverture relative des aimants	0,66
Ouverture relative des encoches	0,5
Densité de courant des conducteurs (A/mm <sup>2</sup> )	2,214
Charge linéique en courant (A/m)	37214

Table 11: Dimensions calculées de la MSAP pour le cahier des charges hydrolien pour toutes les machines

Rayon d'alésage du stator (m)	1,413
Longueur active (m)	0,807
Ouverture relative des dents	0,5
Hauteur des becs (mm)	0,5
Hauteur des aimants (mm)	6,6
Taille de l'entrefer (mm)	5

### III-2-Application aux structures étudiées

Le choix de la structure capable d'extraire au mieux l'énergie hydrolienne disponible, est fait en tenant compte des spécifications ainsi que les hypothèses données précédemment et basé sur les paramètres qui figurent sur les Table 10 et Table 11. Pour chacune des structures d'ensemble convertisseur-machine précitées, l'idée est de déterminer le bon dimensionnement de MSAP qui pourrait être adapté au site. Pour cela, la méthodologie adoptée est la suivante :

- Paramètres fixés :
  - Choix de la combinaison d'encoches/pôles basé sur les critères de performances définis dans le chapitre III.
  - On fixe les paramètres de la 2<sup>e</sup> partie de la Table 10.
- Paramètres calculés :
  - Calcul analytique des caractéristiques électriques pour un nombre de spires au stator égale au nombre de bobines (induction, FEM, courant de phase, inductances).
  - Calcul du nombre de spires nécessaire pour atteindre la tension souhaitée à la vitesse nominale (point de base) et des caractéristiques électriques correspondant à ce nombre de spires.

Une fois que la structure est choisie, il faut quantifier l'énergie extraite en mode sain sur la période de référence, vis-à-vis des caractéristiques du site du Raz du Sein, répertoriées dans la Table 19 et en annexe 7. Ensuite il faut calculer la quantité d'énergie extractible en modes dégradés.

Dans un premier temps, nous allons étudier une structure d'ensemble convertisseur à 5 « bras » associé à une machine synchrone à aimants permanents à 5 phases. Ensuite, une structure avec 2 convertisseurs indépendants à 3 « bras » associée à une MSAP à 2X3

phases. Les caractéristiques couple/vitesse de ces structures doivent dominer celle de la Figure 95 imposée par la turbine, tout en ayant un facteur de puissance le plus élevé possible, afin d'éviter de surdimensionner le convertisseur.

### III-2-1-Application à une MSAP à 5 phases associée à un convertisseur à 5 « bras »

La structure de MSAP à 5 phases considérée dans cette étude possède 120 encoches et 144 pôles et un bobinage concentré à pas fractionnaire, double couches. Cette structure est caractérisée par un coefficient de bobinage du fondamental de FEM de 0.95 (Figure 96) et une périodicité de 24. Elle est caractérisée par des réactances synchrones liées respectivement aux machines fictives primaire et secondaire,  $X_{sync1} = 0.71 pu$  et  $X_{sync3} = 0.83 pu$ .

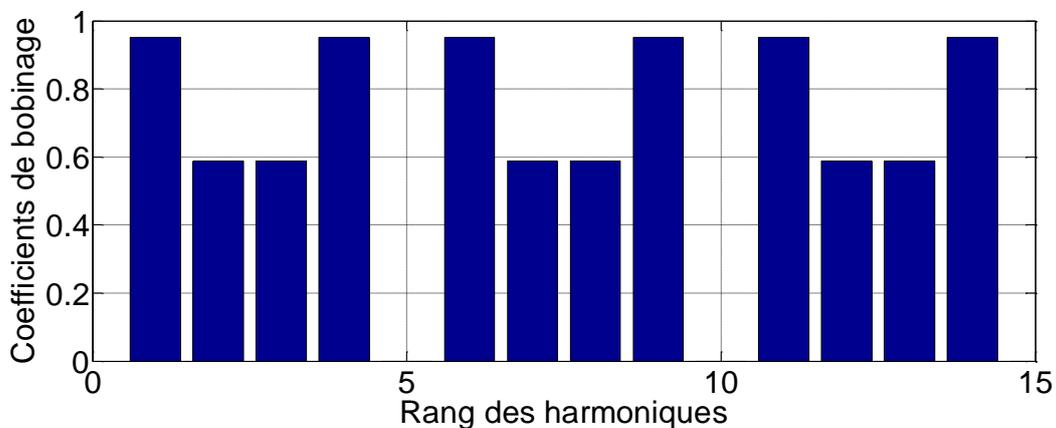


Figure 96: Coefficients de bobinage de la structure à 120 encoches et 144 pôles.

Par une démarche similaire à celle décrite dans le chapitre III, connaissant la structure de bobinage selon la combinaison encoche/pôle, le nombre de spires est calculé de manière à atteindre la tension de phase imposée par la tension du bus DC.

#### III-2-1-1-Calcul des puissances extraites

Une fois que la structure complète de la machine et du convertisseur est connue, nous déterminons la caractéristique couple vitesse de l'ensemble convertisseur-machine par la méthode décrite de manière détaillée au chapitre II qui consiste à maximiser le couple électromagnétique en respectant des contraintes sur les valeurs maximales de courant et de tension de phases. Ceci nous permet de tracer la caractéristique puissance-vitesse de l'ensemble convertisseur-machine et de la superposer aux caractéristiques de la turbine pour les différentes vitesses de courant sur site (Figure 97). La Figure 97 montre que la caractéristique puissance-vitesse de l'ensemble convertisseur-machine en mode sain domine bien celle qu'impose la turbine.

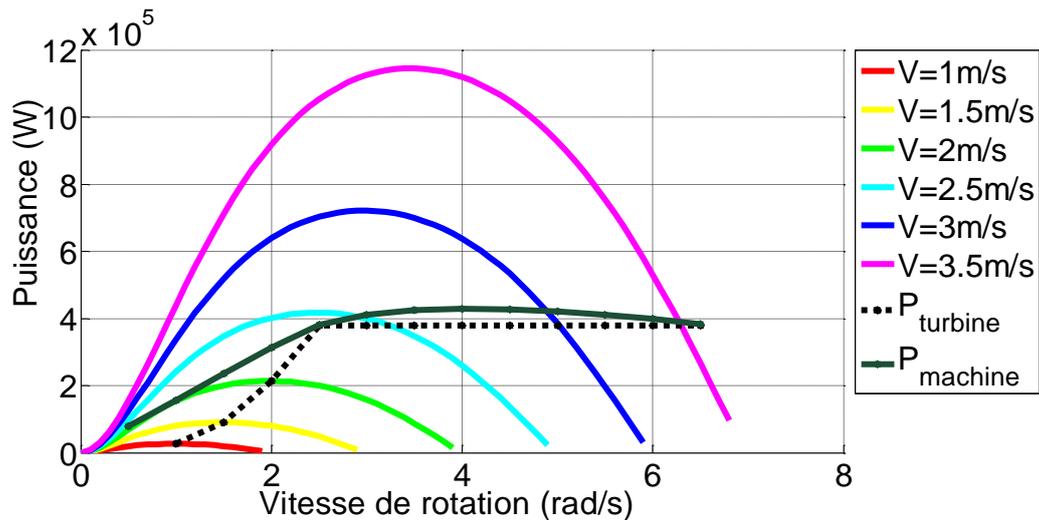


Figure 97: Caractéristiques de la turbine à chaque vitesse de fluide, stratégie de pilotage et caractéristique puissance-vitesse de l'ensemble convertisseur 5 "bras" - MSAP à 5 phases

Le choix de cette structure de machine se justifie non seulement par le fait que sa caractéristique puissance-vitesse domine celle de la turbine, permettant ainsi d'exploiter la turbine de manière efficace selon la stratégie définie précédemment mais aussi par le fait qu'elle est caractérisé par un facteur de puissance assez élevé au point de base ( $\cos\varphi = 0,81$ ).

La connaissance de cette caractéristique permet de déterminer la puissance extractible par l'ensemble turbine-machine-convertisseur pour chacune des vitesses de courant ( $v_i$ ). Cette puissance correspond à la valeur maximale de la partie de la courbe puissance vitesse de la turbine pour la vitesse de courant ( $v_i$ ) qui se situe sous la caractéristique puissance vitesse de l'ensemble convertisseur machine. Ainsi si le maximum de la courbe de puissance de la turbine correspondant à la vitesse de courant ( $v_i$ ) est situé sous la caractéristique couple vitesse de l'ensemble convertisseur machine, l'ensemble convertisseur machine peut extraire la puissance correspondant à la MPPT. Ce cas est illustré par la Figure 98 correspondant à  $v_i=1,4\text{m/s}$ .

Si le maximum de la courbe de puissance de la turbine correspondant à la vitesse de courant ( $v_i$ ) est située au-dessus de la caractéristique couple vitesse de l'ensemble convertisseur machine. La puissance extractible sera alors limitée au minimum des valeurs de la puissance de limitation (puissance au point de base) et de la puissance correspondant à l'intersection de la caractéristique puissance vitesse de la turbine correspondant à la vitesse de courant ( $v_i$ ) et de la caractéristique de l'ensemble convertisseur machine. Ce cas est illustré à la Figure 99 correspondant à  $v_i=2,6\text{ m/s}$ . La Figure 100 correspond au cas de la vitesse de base (cas limite entre les cas précédents) obtenu pour une vitesse de courant de  $2,4\text{ m/s}$ .

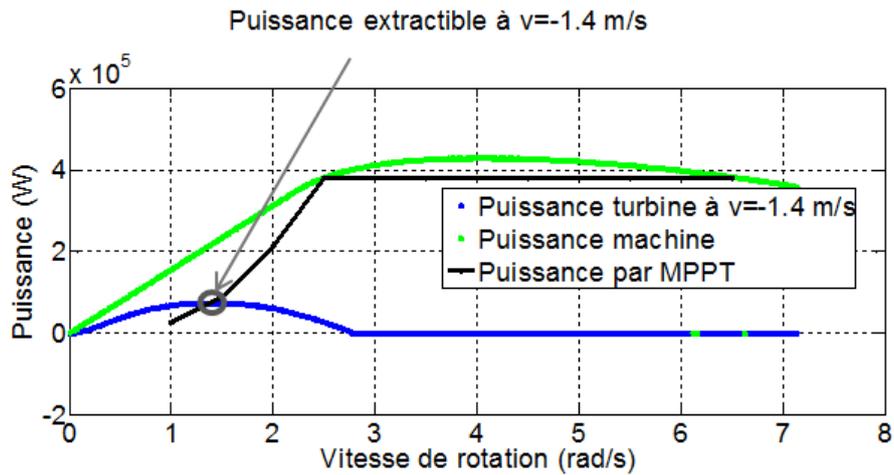


Figure 98: Caractéristique puissance/vitesse de la turbine en fonction de la vitesse de rotation à  $v=1.4$  m/s, superposée à la caractéristique puissance-vitesse de la machine et la puissance par MPPT.

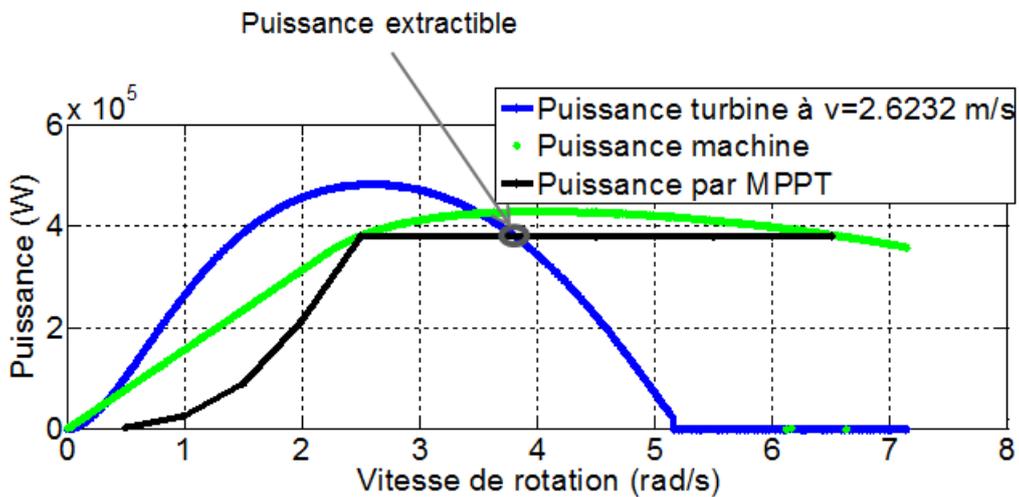


Figure 99: Caractéristique puissance/vitesse de la turbine en fonction de la vitesse de rotation à  $v=2.6$  m/s, superposée à la caractéristique puissance-vitesse de la machine et la puissance par MPPT.

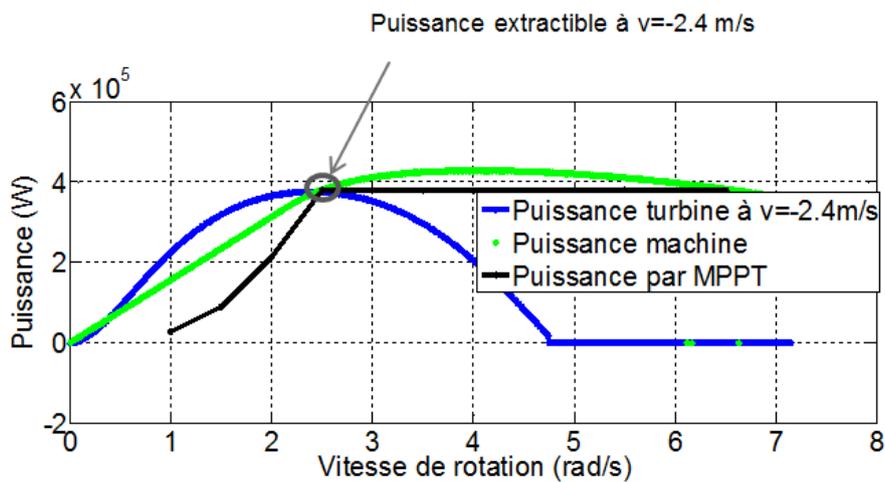


Figure 100: Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation à  $v=2.4$  m/s, superposée à la caractéristique puissance-vitesse de la machine et la puissance définie par la stratégie de pilotage de la turbine.

Cette analyse permet de faire le calcul de l'énergie extraite sur la période de référence en appliquant l'équation 9. Elle peut être étendue aux modes dégradés en utilisant les caractéristiques couples de vitesse de l'ensemble convertisseur/machine en mode de défaut déterminées selon la méthodologie décrite au chapitre 2. Dans le cas de la machine 5-phases avec onduleur à bras ces caractéristiques sont données à la Figure 101. On peut remarquer que dans le cas où un défaut apparaît, la puissance est limitée par la nouvelle caractéristique à une puissance inférieure à la puissance de limitation en mode sain, comme le montre la Figure 102. On peut également remarquer que dans le cas des vitesses de courant élevées, il est possible qu'aucune intersection n'existe entre les 2 caractéristiques (à part celle au début de la courbe). Dans ce cas la production d'énergie sera nulle.

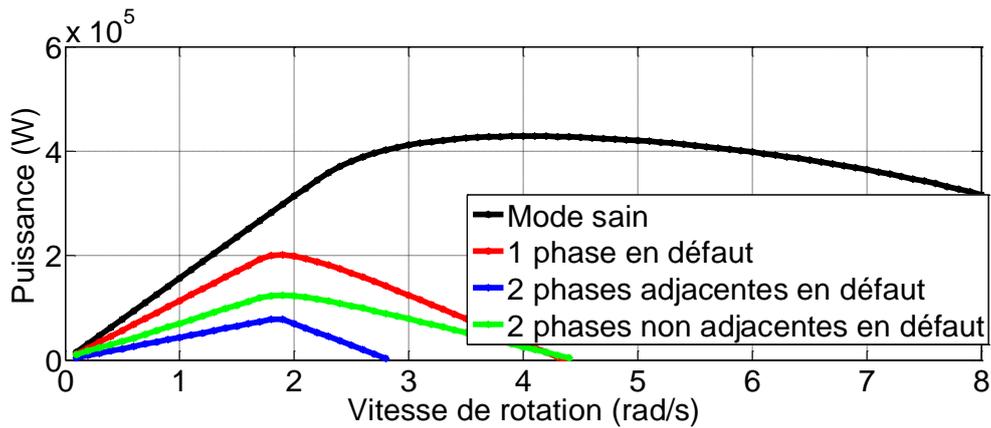


Figure 101: Caractéristiques puissances-vitesses en mode sain et en modes dégradés (ouverture de phase) de la MSAP à 5 phases.

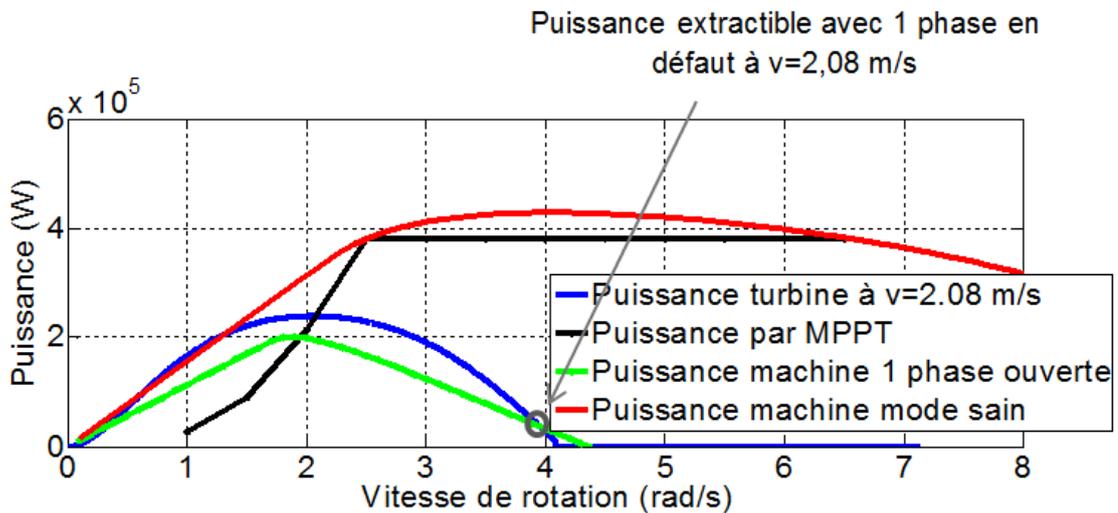


Figure 102: Caractéristique puissance/vitesse de la turbine en fonction de la vitesse de rotation à  $v=2,08$  m/s, superposée à la caractéristique puissance-vitesse de la machine en mode sain, celle en mode 1 phase en défaut et la puissance par MPPT.

### III-2-1-2-Comparaison des puissances et énergies extraites en modes sains et dégradés

Pour chacun des modes, la puissance extraite à chaque vitesse de courant est calculée, par la méthode expliquée au paragraphe précédent. Cette analyse a permis la détermination de

la Table 12 et de la Figure 103 qui donnent les valeurs des puissances extraites en mode sain et en modes dégradés, suivant les vitesses de courant.

**Table 12: Puissances extraites à chaque mode de fonctionnement par une MSAP à 5 phases en fonction des vitesses des courants marins.**

Vitesse de courant (m/s)	Puissance extraite en mode sain (kW)	Puissances extraites en modes dégradés (kW)		
		Une phase en défaut	Deux phases non adjacentes en défaut	Deux phases adjacentes en défaut
-2.7494	380	22,51	14,218	0
-2.4136	375.31	27,401	16,132	0
-2.0778	205.98	37,341	24,533	0
-1.742	141.18	14,18	91,694	0
-1.406	74.253	74,253	74,253	71,734
-1.0704	32.757	32,757	32,757	32,757
-0.73466	10.588	10,588	10,588	10,588
-0.39887	1,69	1,69	1,69	1,69
-0.063	$6,69 \cdot 10^{-3}$	$6,69 \cdot 10^{-3}$	$6,69 \cdot 10^{-3}$	$6,69 \cdot 10^{-3}$
0.2727	$541,6 \cdot 10^{-3}$	$541,6 \cdot 10^{-3}$	$541,6 \cdot 10^{-3}$	$541,6 \cdot 10^{-3}$
0.60849	6,017	6,017	6,017	6,017
0.94428	22,485	22,485	22,485	22,485
1.28	56,015	56,015	56,015	55,992
1.61586	112,67	112,67	112,67	0
1.9516	198,52	198,52	45,273	0
2.2874	315,89	29,995	17,073	0
2.6232	380	24,089	14,854	0
2.959	380	20,352	13,327	0
3.2948	380	17,697	12,199	0
3.6306	378,95	15,717	11,318	0

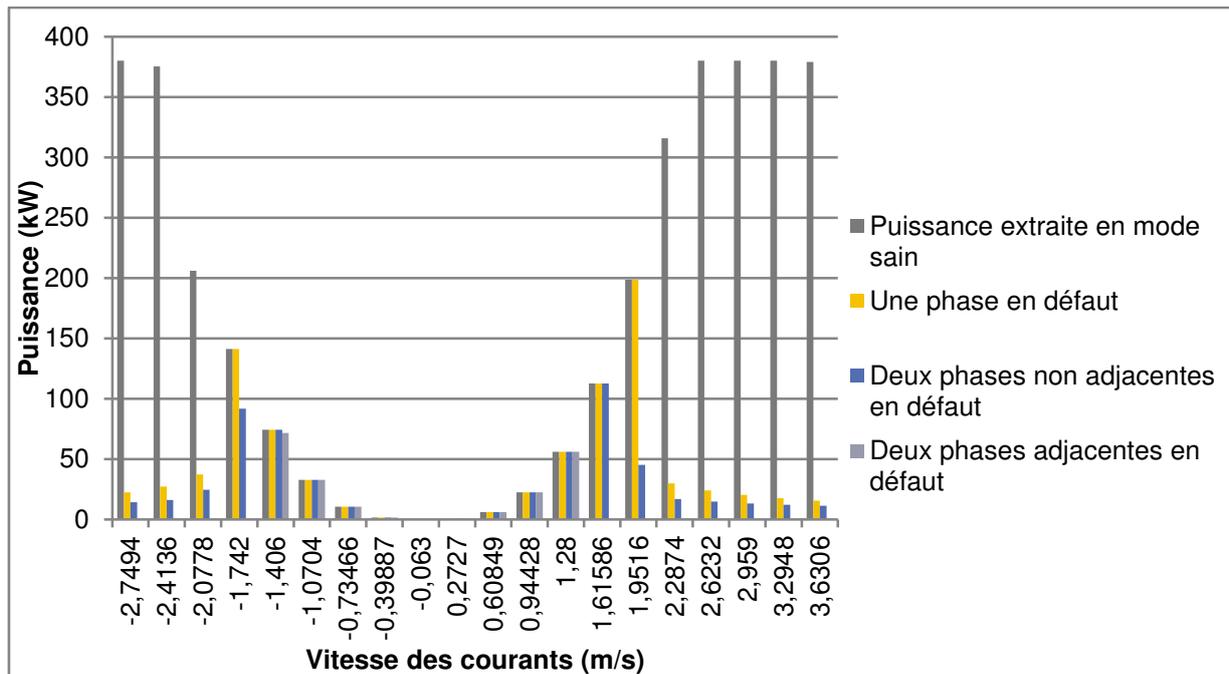


Figure 103: Puissances extraites en mode sain et en modes dégradés selon les vitesses de courants de la MSAP à 5 phases.

En modes dégradés la puissance produite est inférieure à la puissance en mode sain. Ce phénomène s'explique d'une part par le fait qu'en mode dégradé (avec une ou deux phases en défaut) la puissance est limitée par la perte de phase, comme le montre la Figure 101. La caractéristique puissance-vitesse de la machine ne domine plus dans ce cas la courbe de puissance définie par la stratégie de pilotage de la turbine. De plus, la plage de vitesse de la machine est réduite en mode dégradés ce qui explique la diminution puis l'annulation de la puissance pour les vitesses de courant élevées.

Connaissant les puissances extraites selon le mode de fonctionnement ainsi que les occurrences des vitesses de courant, il est possible de déterminer par l'équation (4.9), la quantité d'énergie extraite sur un cycle de 8424 heures, pour chaque mode de fonctionnement. Ce calcul est illustré par la Figure 104, qui montre une quantité d'énergie de 3,2 MWh extraite en mode sain sur un cycle alors qu'en mode dégradés cette énergie est seulement de 1,6 MWh pour une phase en défaut, de 1,168 MWh pour deux phases non adjacentes en défaut et de 0,54 MWh pour deux phases adjacentes en défaut. Ces valeurs montrent que les pertes d'énergies ne sont pas dans les mêmes proportions que la diminution de puissances à cause de la non homogénéité des occurrences de vitesse de courant. En effet la différence entre les puissances extraites en mode sain et en mode dégradés est surtout importante au niveau des vitesses extrêmes.

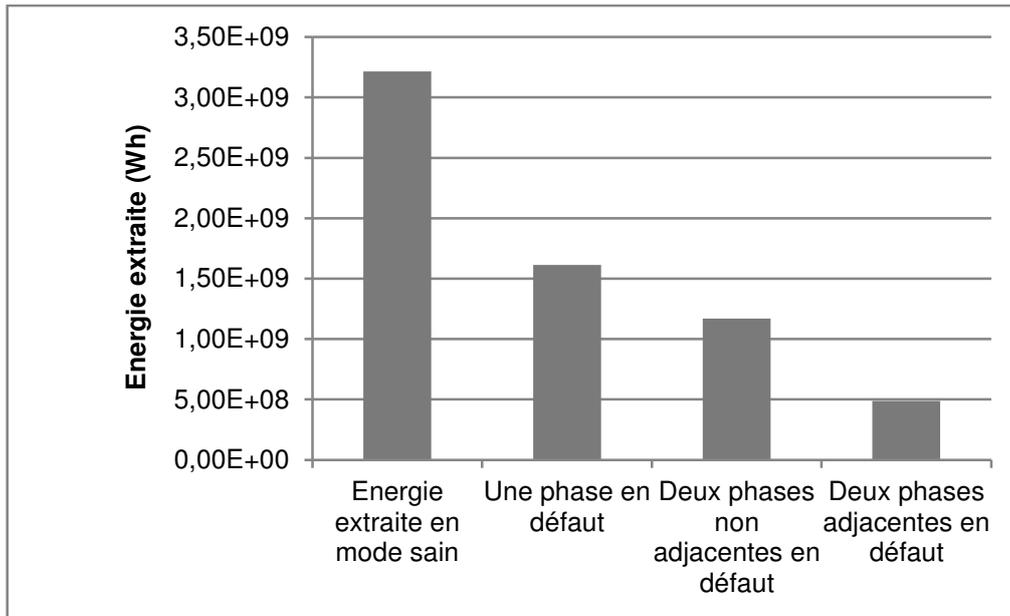


Figure 104: Énergie extraite à chaque mode de fonctionnement d'une MSAP à 5 phases pour un cycle.

### III-2-2-Application à une MSAP à 2X3 phases associée à deux convertisseurs indépendants à 3 « bras »

Une étude similaire sur une structure à 2X3 phases associée à deux convertisseurs indépendants à 3 « bras », a été effectuée afin de faire une comparaison entre les deux structures. Le choix de la MSAP est porté sur une structure à 126 encoches et 140 pôles. En effet cette structure permet en mode sain de dominer la courbe de de puissance imposée par la stratégie de pilotage de la turbine. Elle est caractérisée par un facteur de puissance à la vitesse de base de 0.8 et une réactance synchrone  $X_{sync} = 0.65 pu$ .

Les caractéristiques électromécaniques de la machine sont également basées sur les données de la Table 10. La Figure 105 montre que la caractéristique puissance-vitesse de la machine choisie domine quasiment la totalité de la courbe de puissance désirée (à l'exception des vitesses les plus extrêmes).

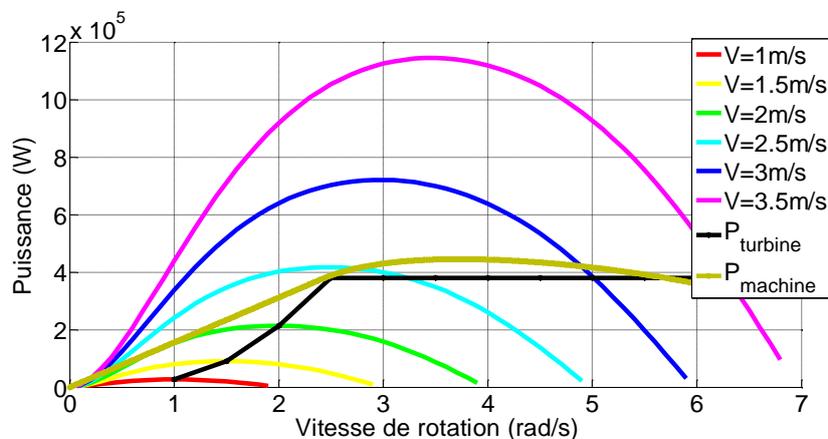


Figure 105: Caractéristiques de la turbine à chaque vitesse de fluide, stratégie de pilotage et caractéristique puissance-vitesse de l'ensemble deux convertisseurs à 3 "bras" - MSAP à 2X3 phases.

Dans le cas d'un fonctionnement en mode dégradé, la stratégie de gestion du défaut consiste à isoler l'étoile en défaut, de telle sorte que la caractéristique puissance vitesse de la machine en mode dégradé correspond à une puissance réduite de moitié pour les mêmes vitesses, comme le montre la Figure 106.

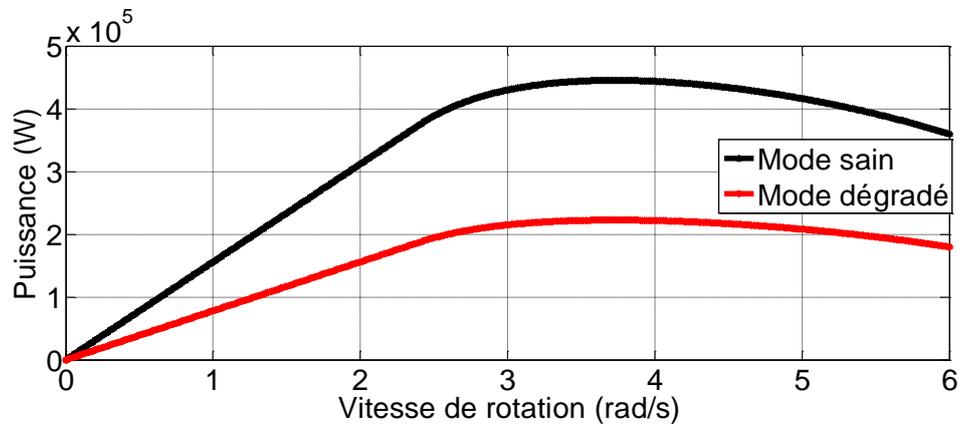


Figure 106: Caractéristiques puissances-vitesses en mode sain et en modes dégradés de la MSAP à 2X3 phases.

Cette comparaison des caractéristiques puissance-vitesse de la structure de MSAP à 2X3 phases, en mode sain et en mode dégradé, permet d'observer une perte de la moitié de la puissance dès le premier défaut. Cependant, la plage de vitesse d'extraction de puissance reste la même dans les deux modes. Les puissances extraites en mode sain et en mode dégradé par la même méthode que celle décrite pour la structure à 5 phases, peuvent être alors déterminées et sont présentées sur la Table 13 et la Figure 107.

Table 13: Puissances extraites à chaque mode de fonctionnement par une MSAP à 2X3 phases en fonction des vitesses des courants.

Vitesse de courant (m/s)	Puissance extraite en mode sain (kW)	Puissance extraite en mode dégradé (kW)
-2,7494	380	210,89
-2,4136	375,49	222,23
-2,0778	239,56	209,15
-1,742	141,18	140,87
-1,406	74,264	74,264
-1,0704	32,757	32,757
-0,73466	10,589	10,589
-0,39887	1,69	1,69
-0,063	6,69 10 <sup>-3</sup>	6,69 10 <sup>-3</sup>

0,2727	541,6 10 <sup>-3</sup>	541,6 10 <sup>-3</sup>
0,60849	6,017	6,017
0,94428	22,485	22,485
1,28	56,015	56,015
1,61586	112,67	112,67
1,9516	198,52	187,38
2,2874	319,63	222,15
2,6232	380	216,56
2,959	380	198,57
3,2948	373,24	171,51
3,6306	294,7	132,2

L'analyse de la puissance extraite à chaque vitesse de courant, illustrée par la Figure 107, permet de voir qu'une quantité assez satisfaisante de puissance est extraite en mode dégradé même pour les vitesses extrêmes. Cet avantage est lié au fait que la plage de vitesse en mode dégradé reste la même qu'en mode sain.

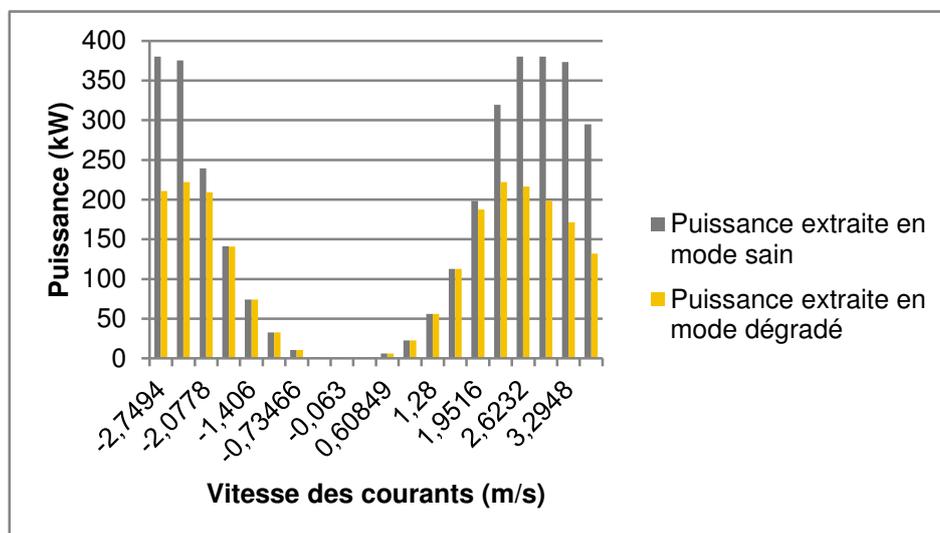


Figure 107: Puissances extraites en mode sain et en modes dégradés selon les vitesses de courants de la MSAP à 2X3 phases.

Le calcul de l'énergie extraite dans ces conditions, sur une période de référence a permis de voir sur la Figure 108 que la perte d'énergie et la perte de puissance ne sont pas dans les mêmes proportions. En effet, une énergie de 3,2 MWh est extraite en mode sain alors que sa valeur en mode dégradé est d'environ 2,6 MWh malgré le fait que la capacité d'extraction en puissance est réduite de moitié en mode dégradé.