

Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance

Olivier Gergaud, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed

▶ **To cite this version:**

Olivier Gergaud, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed. Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance. Electrotechnique du Futur, Nov 2001, NANCY, France. pp.17-22. hal-00674086

HAL Id: hal-00674086
https://hal.science/hal-00674086

Submitted on 24 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance

O. GERGAUD, B. MULTON, H. BEN AHMED

LÉSiR – Antenne de Bretagne de l'ENS de Cachan – Campus de Ker Lann – 35170 BRUZ

***Résumé*-- Parallèlement au marché important de la génération éolienne de forte puissance, se développent des systèmes de plus petite puissance (quelques 100 W à quelques kW) surtout dédiés aux sites isolés [1]. Les chaînes de conversion d'énergie sont alors très différentes de celles de grande puissance, elles sont souvent fondées sur l'utilisation d'un alternateur triphasé à aimants permanents débitant directement, à travers un redresseur à diodes, dans un accumulateur électrochimique généralement basse tension (12 à 48 V) [2]. Dans cet article, nous proposons une modélisation de cette chaîne de conversion, peu conventionnelle, en vue de l'estimation de la production d'énergie.**

***Mots clés* — aérogénérateur, synchrone, aimants permanents, redresseur, source continue.**

I. INTRODUCTION

Le travail effectué s'inscrit dans la modélisation complète d'un système de production photovoltaï que et éolien de puissance réduite (20 modules ASE pour 2kW crête silicium polycristallin et 2 éoliennes de 750 W chacune) couplé au réseau via un bus continu et associé à un dispositif de stockage électrochimique (48 V – 15 kWh). L'objectif final est de disposer d'une modélisation à la fois suffisamment précise pour rendre compte des transferts énergétiques et suffisamment rapide pour permettre une optimisation du dimensionnement et/ou de la gestion du système.

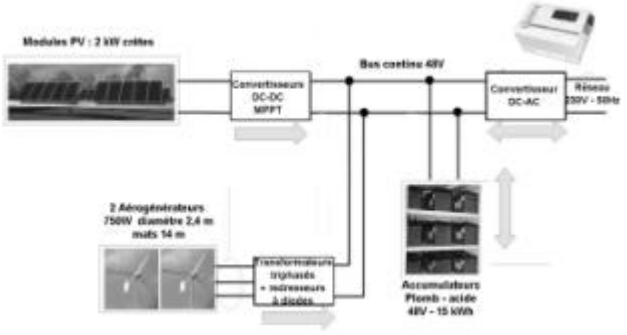


Fig. 1 : Système de production photovoltaï que et éolien.

Avec ce système, nous pouvons contrôler les transferts d'énergies en intervenant sur le niveau de la tension batterie. En effet la batterie étant chargée à une tension V_{bat1}, si on impose au système une consigne de tension V_{bat2} tel que $V_{bat2} < V_{bat1}$ (respectivement $V_{bat2} > V_{bat1}$) alors nous ferons un transfert d'énergie du système vers le réseau (respectivement du réseau vers le système).

Dans cet article nous allons nous intéresser plus particulièrement à la chaîne de conversion éolienne, en vue de l'estimation de la production d'énergie.

La chaîne de conversion éolienne est la suivante :

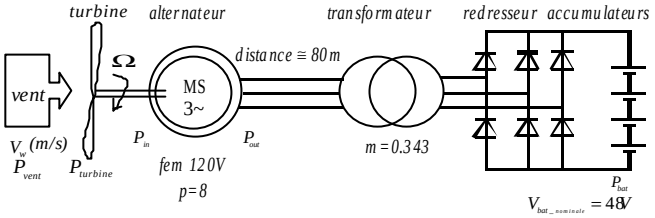


Fig. 2 : Chaîne de conversion éolienne.

Nous souhaitons déterminer la caractéristique puissance fournie à la batterie, P_{bat}, en fonction de la vitesse du vent, V_w.

La puissance mécanique récupérée par la turbine éolienne peut s'écrire :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_p^{\,2} \cdot V_w^3 \qquad (1)$$

Où C_p =coefficient aérodynamique de puissance, $\rho = 1.3 Kg/m^3$, masse volumique de l'air, $R_p = 1.2m$, rayon de la turbine, V_w =vitesse du vent. Le coefficient de puissance dépend de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. C_p est généralement donné comme une fonction de λ, le rapport de la vitesse périphérique de la turbine ramenée à la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R_p \cdot \Omega}{V_w} \qquad (2)$$

Ω est la vitesse angulaire de rotation de la turbine .

Nos éoliennes sont de type Stall (décrochage dynamique) avec une limitation de puissance obtenue par la dérive qui désaxe l'éolienne du vent (déviation horizontale) pour une vitesse de vent supérieure à 9m/s. Actuellement nous ne connaissons pas la caractéristique $C_p(\lambda)$ de nos éoliennes. Ainsi l'étude va être faite pour une caractéristique typique d'une éolienne à 3 pales [3] pour des vitesses de vent inférieures à 9m/s. On peut alors déterminer la caractéristique puissance en fonction de la vitesse de rotation, N, pour un vent, V_w donné.

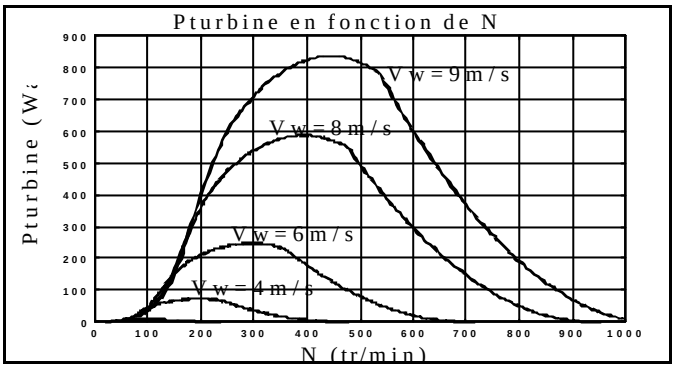


Fig. 3 : Puissance mécanique fournie par la turbine en fonction de la vitesse de rotation pour différente vitesse du vent V_w .

En déterminant la caractéristique de la puissance en entrée du système (en aval de la turbine), P_{in} en fonction de N puis la caractéristique de la puissance fournie à la batterie P_{bat} en fonction de P_{in}, on pourra alors aisément déterminer la puissance fournie à la batterie en fonction de la vitesse du vent, $P_{bat} = f(V_w)$.

Nous allons faire trois études différentes. La première, ***l'étude simplifiée***, sera une analyse simplifiée de ce système en considérant le transformateur parfait et les formes du courant sinusoï dales. Puis, ***l'étude avec transformateur parfait*** sera une simulation de l'ensemble sous simulink, avec un transformateur parfait. Enfin, ***l'étude avec transformateur réel*** nous permettra d'analyser l'impact du transformateur sur cette chaîne par la prise en compte de sa non linéarité. Pour ces trois études la batterie d'accumulateurs électrochimiques sera considérée comme une source de tension parfaitement constante et le modèle utilisé pour l'alternateur ne tiendra pas compte des pertes magnétiques car nous ne n'avons pas les moyens de les déterminer. Les différents couplages à la température ambiante, au taux d'humidité de l'air et aux fluctuations de direction du vent n e sont pas pris en compte.

II. ETUDE SIMPLIFIEE

Dans ce système la machine synchrone triphasée à aimants débite directement, à travers un redresseur à diodes en pont, dans une batterie d'accumulateurs électrochimiques. Ce fonctionnement peut, à priori, être surprenant, car la génératrice souvent considérée comme une source de tension débite à travers des semi-conducteurs sur une autre source de tension continue, cela devrait conduire à des courants impulsionnels néfastes à une bonne conversion d'énergie. Pratiquement c'est grâce à une inductance d'induit relativement élevée que les courants conservent des formes relativement sinusoï dales et que le fonctionnement est énergétiquement satisfaisant.

Nous considérons, dans cette étude, que le transformateur est parfait. L'hypothèse principale de cette analyse simplifiée est que les courants sont sinusoï daux, nous faisons également l'hypothèse que les semi-conducteurs sont parfaits. La figure 4 montre le schéma équivalent de la partie électrique de la chaîne de conversion dans le cadre de cette étude simplifiée. La génératrice se comporte comme un générateur de courants sinusoï daux, le courant dans une diode est en demi-alternances de sinusoï de. La conduction simultanée des diodes due aux chevauchements des phases applique un court circuit entre phase d'un sixième de période. En dehors de cette zone la tension composée vaut V_{bat} ou $-V_{bat}$

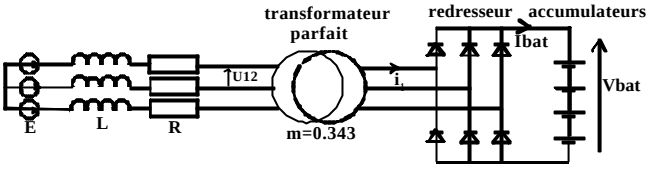
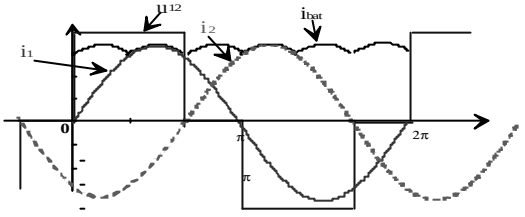


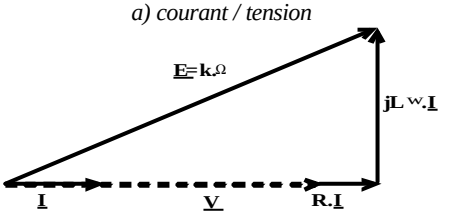
Fig.4 : Chaîne de conversion électrique.

Nous allons étudier le comportement de l'alternateur débitant sur une source de tension constante afin de déterminer sa caractéristique puissance vitesse en entrée, $P_{in} = f(N)$ et en sortie, $P_{bat} = f(N)$. Par hypothèse le courant est sinusoï dal c'est donc le fondamental de la tension qui intervient dans le calcul de la puissance. L'étude du système devient alors l'étude d'un alternateur triphasé débitant sur une source de tension alternative de valeur efficace $V = \frac{\sqrt{2}}{p} \cdot V_{bat}$.

Pour raisonner, on peut donc construire un diagramme de Fresnel monophasé (figure 5b).



a) courant / tension



b) diagramme de Fresnel

Fig.5 : Formes d'ondes et diagramme de Fresnel de l'étude simplifiée.

On obtient alors, par l'étude du diagramme de Fresnel les caractéristiques souhaitées paramétrées en V_{bat} de la figure 6.

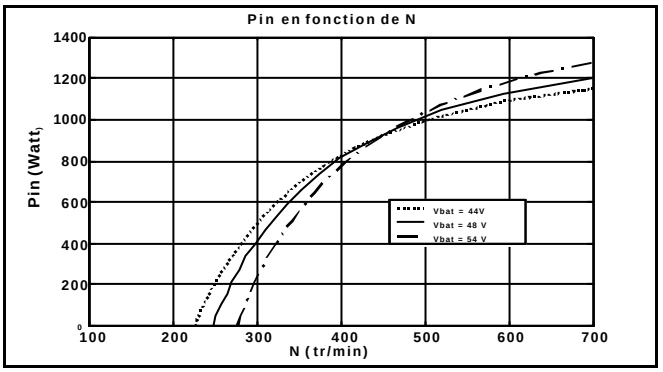


Fig.6 : Puissance en entrée de la chaîne de conversion électrique en

fonction de la vitesse de rotation de l'alternateur.

La figure 7 donne la puissance injectée dans la batterie, il s'agit de la puissance en entrée avec les pertes Joule en moins.

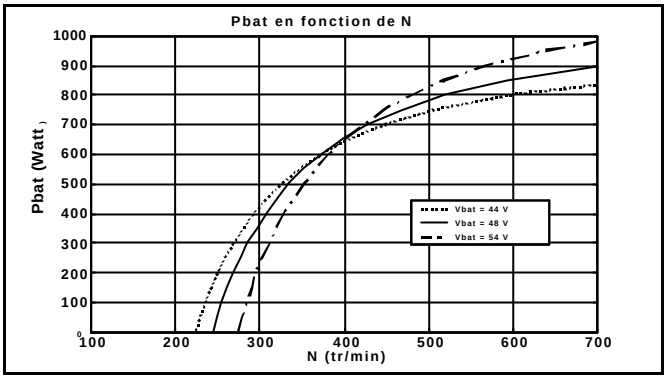


Fig.7 : Puissance en sortie de la chaîne de conversion électrique en fonction de la vitesse de rotation de l'alternateur.

On peut constater par cette étude que plus la tension batterie, V_{bat}, est élevée plus la vitesse N_0, vitesse pour laquelle la génératrice commence à fournir de la puissance, est élevée. En effet, pour que la génératrice puisse fournir de la puissance aux accumulateurs il faut que sa f.e.m., E, soit supérieure à la tension V. On obtient :

$$\Omega_0 = \frac{\sqrt{2}}{k \cdot \Phi} \cdot V_{bat} . \qquad (3)$$

La courbe de puissance tend vers une limite asymptotique. En effet la puissance maximale fournie par la génératrice est :

$$P_{max} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\Phi \cdot L \cdot p} \cdot k \cdot V_{bat} \qquad (4)$$

Où p représente le nombre de paires de pôles de la machine.

III. MODELISATION DETAILLEE – ETUDE AVEC TRANSFORMATEUR PARFAIT

Dans cette partie nous avons simulé, sous Simulink, l'ensemble, avec un transformateur parfait, et donc en tenant compte des formes d'ondes "réelles". La figure 8 montre le synoptique Matlab Simulink réalisé.

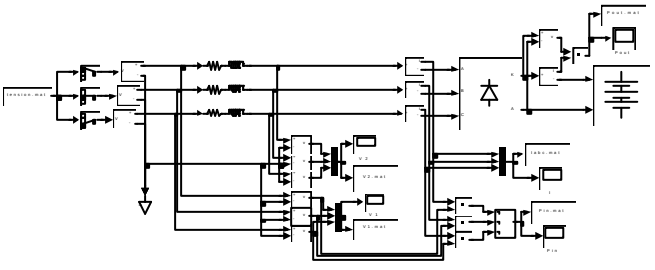
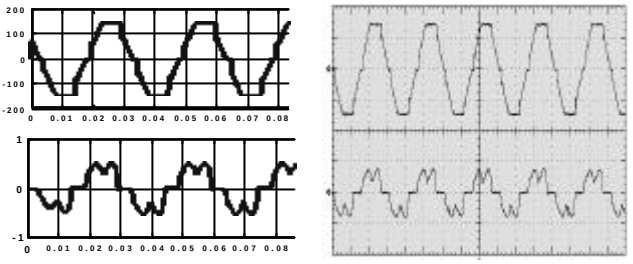


Fig.8 :Synoptique Matlab Simulink – Etude avec Transformateur parfait.

La figure 9 montre les résultats d'une simulation comparés aux mesures dans des conditions similaires. A ce point de fonctionnement on peut constater que le courant n'est pas sinusoïdal car l'amplitude des fem n'est pas suffisante pour permettre une conduction continue.



a) simulation b)mesure

Fig.9 : Tension entre phases et courant dans une phase (f=34Hz, N=255tr/min, $V_{bat} = 48V$, $P_{bat} = 77W$). a)simulation (100V/div ; 1A/div ;10ms/div) b) mesure (100V/div ; 0.5A/div ;10ms/div).

La figure 10, quant à elle, nous montre les résultats de simulation pour un autre point de fonctionnement où la conduction est continue et où le courant généré par l'alternateur est quasi-sinusoïdal.

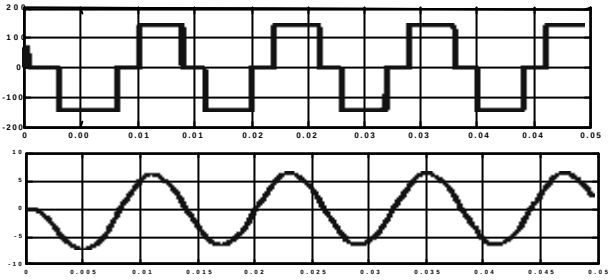


Fig.10 : Tension entre phases et courant dans une phase f=83Hz, N=622tr/min, Pbat=814W.

La figure 11 donne la caractéristique $P_{bat} = f(N)$ obtenue avec cette simulation, comparée avec celle obtenue dans l'étude simplifiée ainsi que quelques points mesurés. On peut remarquer qu'avec l'étude simplifiée la vitesse N_0 est plus élevée qu'avec la seconde étude. En effet le courant étant considéré sinusoïdal, pour le modèle simplifié, on considère également que la conduction est toujours continue. Or, la conduction étant discontinue pour de faibles puissances, on surestime la tension V dans le modèle simplifié et donc N_0. Cette même hypothèse nous fait alors également surestimer la puissance fournie quand la conduction est discontinue. Pour des vitesses de rotations plus élevées les courants sont quasi-sinusoïdaux , les deux modèles ne diffèrent alors que par les pertes dans les semi-conducteurs. Les relevés expérimentaux nous permettent de valider les résultats obtenus théoriquement.

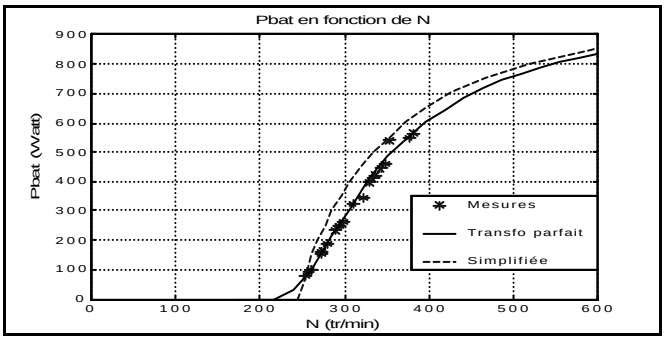


Fig.11 :Puissance fournie à la batterie, comparaison des études et mesures.

IV. IMPACT DU TRANSFORMATEUR – ETUDE AVEC TRANSFORMATEUR REEL

Dans la chaîne de conversion initialement installée, un transformateur est intercalé entre la machine associée à ses câbles de transport et le pont redresseur. Ce transformateur est source de pertes (pertes fer, pertes Joule) à la fois en régime permanent et lors de régimes transitoires de magnétisation.

Lors de mesures, nous avons remarqué qu'il y avait des courants primaires transitoires dus aux rafales de vent et nous avons pensé qu'il était possible que ces courants importants soient à l'origine de pertes Joule "supplémentaires" correspondant à une dépense énergétique significative. Pour comprendre et quantifier ces phénomènes, nous avons dû modéliser le système en régime transitoire. Le transformateur triphasé étant saturable et asymétrique (structure à 3 colonnes), nous avons développé une modélisation spécifique (notions de mutuelle inductance inutilisables ici) ainsi qu'une procédure d'identification détaillée par [4] des paramètres du modèle réluctant ci-dessous.

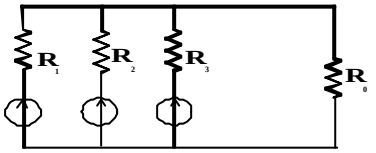


Fig.12 :Modèle réluctant du transformateur.

La figure 13, montre le synoptique Matlab Simulink réalisé pour la simulation du transformateur.

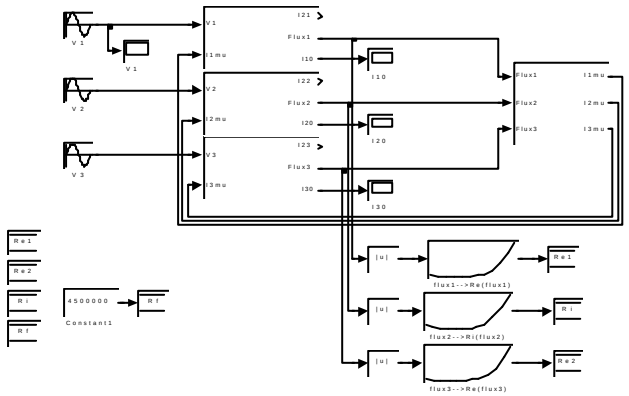
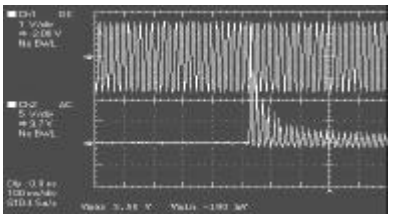
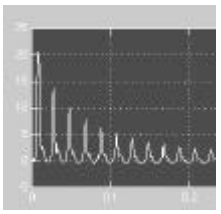


Fig.13 : Schéma Matlab Simulink du transformateur triphasé saturable à 3 colonnes.

Nous avons réussi par cette modélisation à bien reproduire les phénomènes transitoires du courant primaire du transformateur, la figure 14 représente une mise sous tension du transformateur, à vide sous sa tension nominale.



a : tension et courant d'une phase
100V/div, 5A/div, 100ms/div



b : courant
5A/div, 100ms/div

Fig.14 : Transitoire de mise sous tension : mesures (a) et simulation (b).

Pour quantifier les pertes dues aux régimes transitoires, nous avons simulé des accélérations de l'éolienne ce qui nous a permis de conclure que ces pertes bien qu'existantes sont largement négligeables devant les pertes fer de notre transformateur.

Nous avons vu dans les parties précédentes, avec transformateur parfait, que, lorsque le système ne fournit pas de puissance aux accumulateurs, la génératrice de l'éolienne se retrouve à vide. Dans cette partie, c'est le secondaire du transformateur qui se retrouve à vide. On obtient, lorsque le système ne délivre pas de puissance aux accumulateurs, le schéma électrique de la figure 15 où R_T et L_T représentent la résistance et l'inductance cyclique de l'alternateur, du câble et du primaire et secondaire du transformateur.

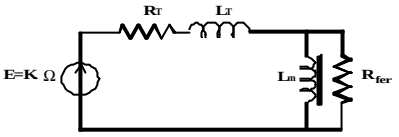


Fig.15 : Schéma électrique équivalent du système transformateur à vide (vents faibles ou secondaire déconnecté).

Ainsi pour de faibles vitesses, lorsque le système ne fournit pas de puissance aux accumulateurs, la puissance à fournir par la turbine éolienne n'est pas nulle ce qui modifie fortement les conditions de vent pour laquelle l'éolienne démarre. Nous avons pu observer clairement ce phénomène sur notre site d'expérimentation. Ce phénomène sera également mis en évidence en simulation lors du couplage avec la caractéristique aérodynamique de la turbine (voir chap. V fig. 22).

La figure 16 nous permet de comparer la puissance à fournir par la génératrice au système pour les trois études précédentes.

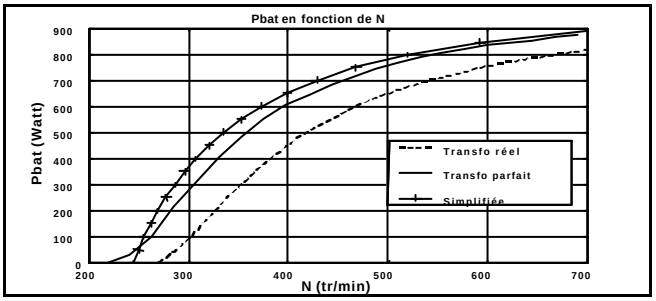


Fig.16 Puissance fournie par le système en fonction de la vitesse pour les trois études.

Outre le fait que la puissance générée est affaiblie, ce transformateur a pour effet de fortement dégrader le rendement de la chaîne de conversion (figure 17).

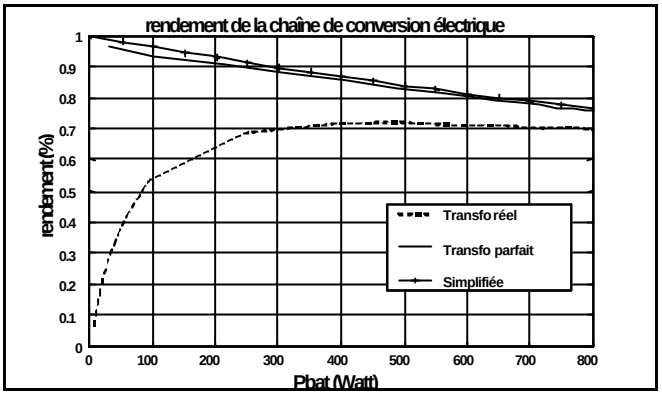


Fig.17 : Rendement électrique de la chaîne de conversion électrique pour les trois études.

V. SYSTEME COMPLET

Pour l'étude complète de la chaîne éolienne, nous considérons le système représenté à la figure 18.

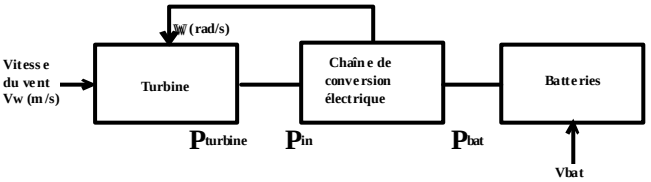


Fig.18 : Chaîne de conversion éolienne.

Nous connaissons la caractéristique $P_{turbine} = f(N)$ pour un vent V_w donné. Nous connaissons également les caractéristiques $P_{in} = f(N)$ et $P_{bat} = f(N)$ de l'ensemble de la chaîne de conversion électrique pour une tension batterie V_{bat} donnée. Nous pouvons alors déterminer avec les deux premières caractéristiques la puissance en entrée de la chaîne de conversion électrique pour un vent donné (figure 19) et donc la caractéristique $P_{bat} = f(V_w)$ de la chaîne de conversion éolienne complète.

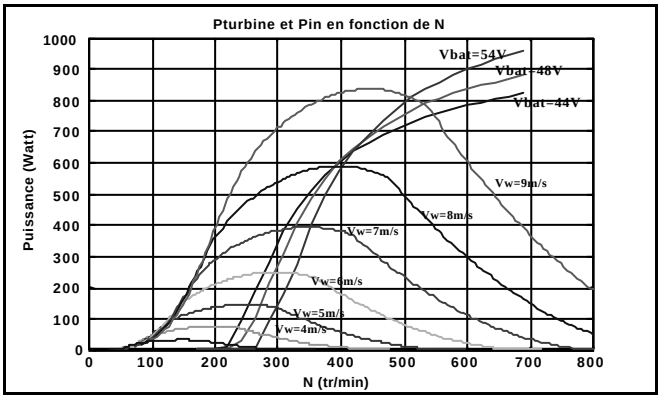


Fig.19 : Puissance fournie par la turbine et puissance en entrée de la chaîne de conversion électrique en fonction de la vitesse de rotation (étude transfo parfait).

La figure 20 représente la puissance P_{bat} fournie aux accumulateurs en fonction de la vitesse du vent pour plusieurs tensions de batterie.

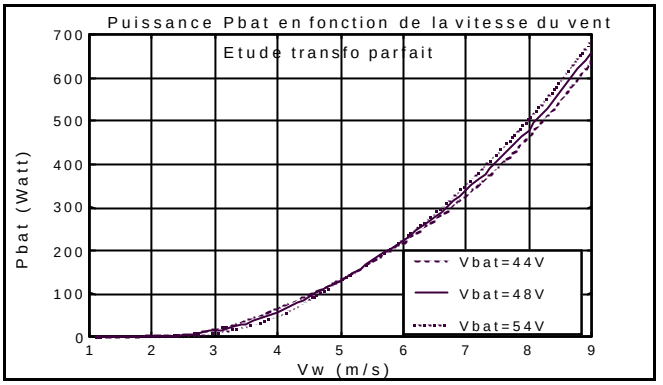


Fig.20 Puissance fournie par le système en fonction de la vitesse du vent pour plusieurs valeurs de la tension de batterie (étude transfo parfait).

La figure 21 permet de mieux mettre en évidence la sensibilité à la tension batterie grâce à une normalisation de la puissance par rapport à celle générée pour $V_{bat} = 48V$. Ainsi on peut voir que pour des vitesses de vent inférieures à 5m/s, plus la tension de batterie est faible, plus la puissance récupérée par le système est importante et inversement pour une vitesse de vent plus importante.

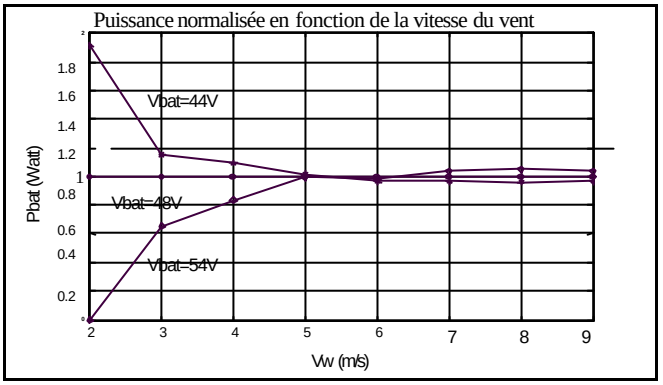


Fig.21 Puissance normalisée fournie par le système en fonction de la vitesse du vent pour plusieurs valeurs de la tension de batterie (étude transfo parfait).

Nous pouvons comparer sur les figures 22 et 23 les résultats obtenus pour le système complet avec les différentes études.

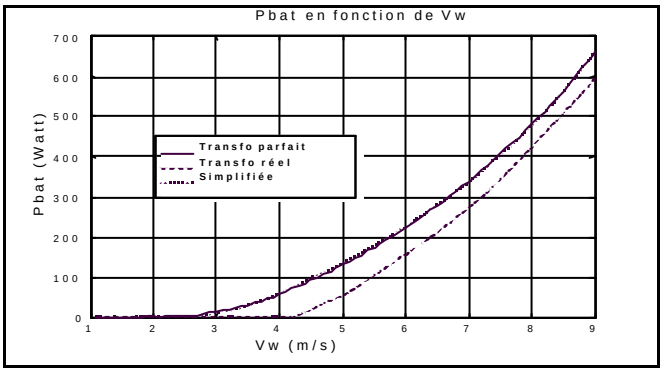


Fig.22 Puissance fournie par le système en fonction de la vitesse du vent pour les différentes études ($V_{bat} = 48V$).

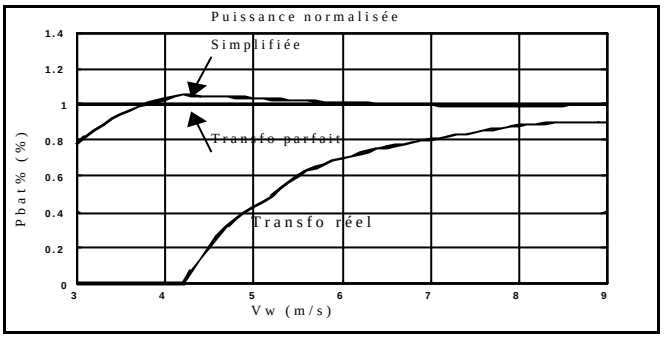


Fig.23 : Puissance normalisée fournie par le système en fonction de la vitesse du vent pour les différentes études (V_{bat} = 48V).

On observe à nouveau que la présence du transformateur dégrade fortement les performances de notre système. Cette dernière figure nous permet également de comparer les résultats obtenus, pour le système complet, avec l'étude simplifiée et celle avec transformateur parfait. On peut voir que l'étude simplifiée conduit à une erreur sur la puissance produite par le système pour de faibles vitesses de vent et qu'elle s'avère très juste pour des vitesses de vent plus importantes. L'erreur commise par l'étude simplifiée sera à priori peu pénalisante, pour les évaluations énergétiques globales mais cela dépend bien sûr des distributions de vitesse du vent.

Nous avons également tracé le rendement électrique et le rendement complet $\eta_c = P_{bat}/P_{vent}$ (turbine comprise) de la chaîne éolienne en fonction de la vitesse du vent. Nous pouvons remarquer que le rendement η_c passe par un maximum et que ce maximum se déplace avec la tension batterie.

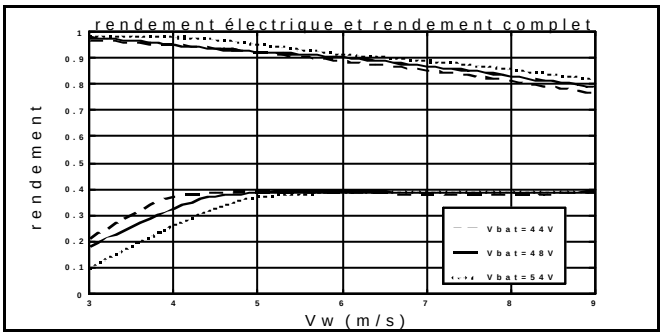


Fig.24 : Rendement électrique et rendement complet en fonction de la vitesse du vent pour plusieurs valeurs de tension batterie.

VI. CONCLUSION

Ce travail a été effectué en vue de la modélisation énergétique de la chaîne de conversion éolienne d'un système de production photovoltaï que et éolien de faible puissance. Les exigences de la simulation système nous imposent d'avoir un modèle à la fois suffisamment précis pour rendre compte des transferts énergétiques et suffisamment rapide pour permettre une optimisation du dimensionnement et/ou de la gestion du système.

L'étude avec transformateur parfait et celle avec transformateur réel nous ont permis de voir l'effet néfaste du transformateur dans notre application. Nous sommes maintenant convaincus de la nécessité de le retirer soit en modifiant les génératrices de nos éoliennes pour des alternateurs 48V au lieu des 120V actuels ou en insérant un convertisseur continu - continu entre le redresseur et les batteries. Le transport en 48V dans les câbles accroîtrait bien sûr les pertes, mais nous avons calculé (en dehors de cet article) que cela ne remet pas en cause la rentabilité énergétique de cette solution.

Ainsi la modélisation de la chaîne de conversion éolienne en vue de l'optimisation du système sera celle faite dans l'étude simplifiée, en y modifiant toutefois, soit les caractéristiques des génératrices si celles-ci sont changées, soit la caractéristique du convertisseur continu - continu. L'étude simplifiée nous a montré qu'en considérant le courant sinusoï dal dans une phase nous obtenions un système simple à étudier (diagramme de Fresnel) qui nous donne des résultats tout à fait satisfaisant et surtout considérablement plus rapide qu'avec l'étude à transformateur parfait. Pour un même calcul nous avons attendu près de 6 minutes avec l'étude à transformateur parfait contre 16ms pour l'étude simplifiée.

En outre grâce à ce travail, nous avons pu analyser le comportement du système selon la vitesse du vent. Plus particulièrement, la vitesse de démarrage et le rendement de la chaîne complète de conversion éolienne ont été étudiés. Ainsi nous avons vu que, pour une vitesse de vent donnée, il existe une tension batterie pour laquelle le rendement est maximal. Nous devons compléter cette étude par une étude du comportement dynamique afin d'envisager une adaptation de la tension batterie à la vitesse du vent. C'est-à-dire de réaliser un convertisseur MPPT comme ceux existants déjà pour optimiser la production d'électricité avec des panneaux photovoltaï ques.

VII. BIBLIOGRAPHIE

[1] W.D. KELLOGG et al., « Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind/PV Systems », IEEE Trans Energy Conv., Vol 13, n°1, march 1998, pp.70-75.

[2] M. WEIMING et al., «Stability of a Synchronous Generator with Diode-Bridge Rectifier and Back-EMF Load », IEEE Trans on Energy Conversion, Vol 15, n°4, dec 2000, pp. 458-463.

[3]Site web du constructeur espagnol d'aérogénérateur MADE, www.made.es

[4] M. ELLEUCH, M. POLOUJADOFF, « A Contribution to the Modeling of Three Phase Transformers Using Reluctances », IEEE Trans. Mag, Vol 32, N°2, march 1996.

[5] E. HAU, « Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics ». Editions Springer 2000

[6] A.M DE BROE et al., «A peak power tracker for small wind trubines in battery charging applications », IEEE Trans Energy Conv., Vol 14, n°4, December 1999, pp.1630-1635.

[7] B.S. BORWY,Z.M. SALAMEH, «Methedology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bznk and PV Array in a Wind/PV hybrid System », IEEE Trans Energy Conv., Vol 11, n°2, June 1996, pp.367-375.

[8] F.GIRAUD,Z.M. SALAMEH, « Steady-state Performance of a Grid Connected Rooftop Hybrid Wind-Photovoltaic Power System with Battery Storage », IEEE Trans Energy Conv., Vol 16, n°1, March 2001, pp.1-7.

[9] R. CHEDID, S. RAHMAN, «Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Sytemes», IEEE Trans Energy Conv., Vol 12, n°1, March 1997, pp.79-85.