

Définition de la conversion
électro-mécanique pour une éolienne à
axe vertical.

Solutech Ingénierie

30/05/2010

1. Introduction

Objectifs:

- Vérifier les performances aérodynamiques attendues et fournies par le concepteur de cette éolienne.
- Estimer la puissance électrique maximale pouvant être fournie par cet aérogénérateur.

2. Caractéristiques théoriques de l'éolienne

L'éolienne étudiée est du type Savonius. Les performances aérodynamiques attendues sont résumées dans le Tableau 1.

Vent (m/s)	Pméca (W)	Vitesse de rotation (t/mn)
3	10	111
4	20	147
5	36	184
6	52	221
7	78	258
10	208	368
14	625	516

Tableau 1 : caractéristiques de l'éolienne

Pméca représente la puissance mécanique développée sur l'arbre de la turbine. Les valeurs données représentent les valeurs maximales attendues pour une vitesse de vent donnée. Sur la Figure 1, est représentée l'allure des courbes de puissance de cette turbine. On rappelle que, pour un vent donné, l'éolienne possède un optimum en puissance pour une vitesse de rotation bien déterminée. Dans les systèmes de contrôle modernes, une électronique de commande permet d'asservir la vitesse de rotation pour se maintenir au maximum de puissance quelque soit la vitesse du vent (MPPT : Maximum Power Point Tracking).

Les courbes de la Figure 1 sont définies en *régime permanent* et pour un vent constant et sans perturbation. Ce sont les conditions que l'on pourrait obtenir en soufflerie. Dans notre cas, les essais sont effectués sur site. Le caractère perturbé du vent fait que l'éolienne est constamment en régime transitoire et passe d'un point de fonctionnement à l'autre parfois très rapidement. Par conséquent il est impossible de reconstruire les courbes de la Figure 1 à partir des essais présentés dans ce rapport. Toutefois des ordres de grandeurs peuvent être obtenus et permettent de confirmer ou non les caractéristiques théoriques présentées dans le Tableau 1.

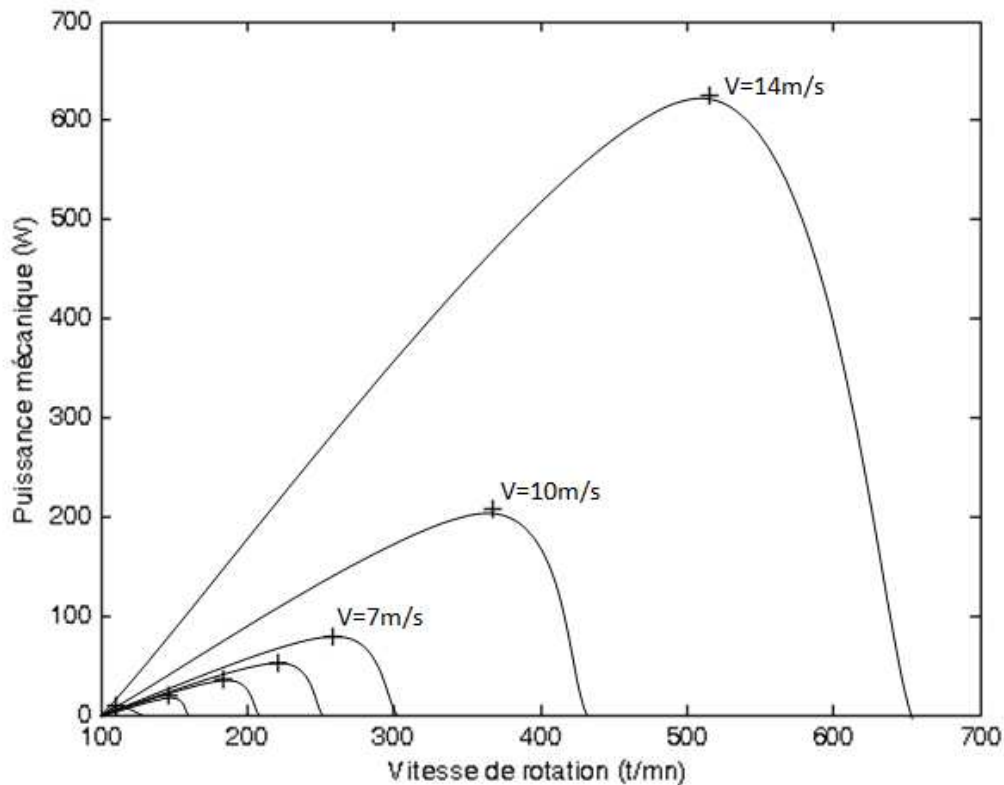


Figure 1 : Allure des courbes de puissance

3. Caractéristiques de la génératrice

La génératrice utilisée est une machine synchrone à aimant 1500t/mn-3kW. En toute rigueur, cette machine est surdimensionnée par rapport à la puissance de l'éolienne étudiée. Toutefois, elle permettra d'obtenir des informations pertinentes qui pourront être transposées à une génératrice de puissance plus faible.

On rappelle que la génératrice est triphasée et couplée en étoile. Elle fournit une force électromotrice (F.E.M) à vide entre phases égale à $E_0=360V$ pour une vitesse de rotation $N=1500t/mn$. La relation liant E_0 et N est linéaire sur toute la plage de fonctionnement de la génératrice :

$$E_0=K \times N$$

On rappelle en outre que le couple résistant sur l'arbre de la génératrice est proportionnel au courant fourni à la charge $C=K' \times I$.

La F.EM à vide n'est pas accessible lorsque la génératrice débite dans la charge. On peut mesurer la tension en charge U_{ch} et revenir à E_0 connaissant le courant I , par la relation :

$$E_0=U_{ch}+R_s.I,$$

Où R_s est la résistance des enroulements de la machine égale à $R_s=2,3\Omega$ pour la machine considérée.

Une donnée importante pour nos mesures est le rendement de la génératrice utilisée pour les points de fonctionnement considérés. On donne, dans le Tableau 2, les rendements de la génératrice pour 2 vitesses particulières. Elles correspondent aux points de fonctionnement extrêmes donnés par le concepteur (Tableau 1).

P(W)	rendement %
0	21.9
10	90.8
23	88.8
38	82.3
51	74.4
59	66.3
63	55.3
59	42.7
49	30.9
29	16.6
9	4.7
1	0.5

Tableau 2 : rendement génératrice 3kW/1500t.mn-1 pour $N=111\text{tr.mn-1}$ (données constructeur)

P(W)	rendement %
4	30.2
115	91.1
219	92.6
338	91.7
458	89.6
548	87.2
611	84.9
654	82.7
688	79.5
697	77.3
696	74.6
679	71.1

Tableau 3 : rendement génératrice 3kW/1500t.mn-1 pour $N=516\text{tr.mn-1}$ (données constructeur)

On note que le rendement de cette génératrice est tout à fait correct pour les points de fonctionnement considérés.

4. Réglage de la vitesse de rotation

Comme on l'a rappelé précédemment, pour un vent donné, on peut rechercher l'optimum de puissance en réglant la vitesse de rotation de la génératrice. Dans les systèmes modernes, ce contrôle est effectué par un variateur de vitesse. Ici, on utilise une solution moins onéreuse utilisant un banc de charge résistif. En faisant varier le courant débité par la génératrice, on modifie le couple résistant donc la vitesse de rotation.

Le banc de charge résistif utilisé est triphasé, couplé en triangle et de puissance 8kW sous 400V. Il peut être réglé de 0 à 100% de charge par paliers de 1 ou 2%. Le schéma équivalent coté électrique est donné sur la Figure 3.

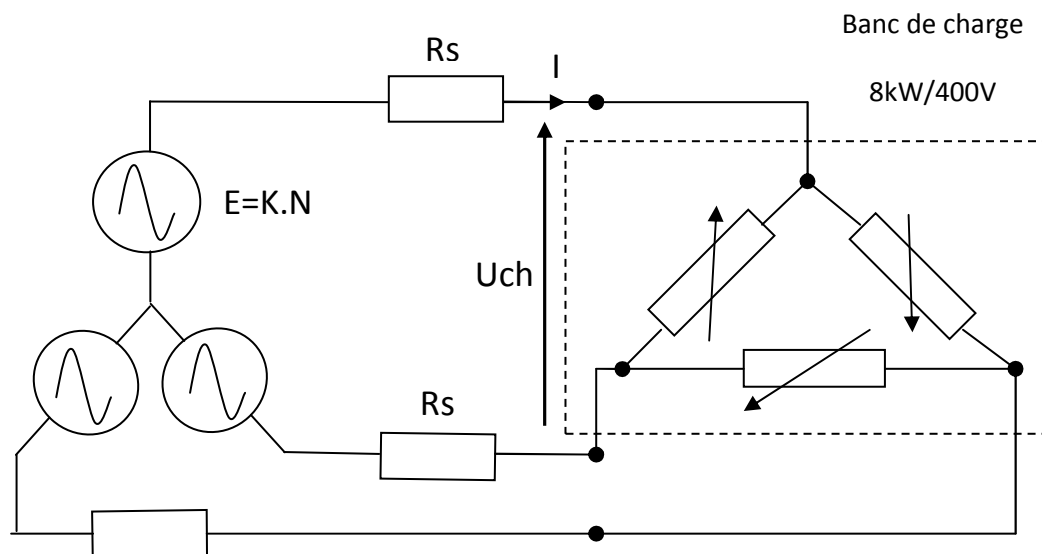


Figure 2 : Schéma équivalent coté électrique

On rappelle la relation liant la puissance dissipée par le banc, la tension et la résistance : $P=U^2/R$. Les différentes résistances correspondant aux différents réglages ont données par $R=U^2/P$. Le Tableau 4 donne la gamme des résistances disponibles sur ce banc de charge choisi.

Réglage (en %)	Résistance (en Ω)
90	20
80	23
70	26
60	30
50	36
40	45
30	60
20	91
10	180

Tableau 4 : Résistance disponibles sur le banc de charge

Conformité par rapport à l'application

On vérifie maintenant que les valeurs de résistances disponibles permettent de régler la vitesse de la génératrice afin d'atteindre les points de fonctionnement optimaux.

Cas d'une génératrice de rendement égal à 1 (cas idéal)

S'il n'y a aucune perte dans la génératrice la puissance électrique (P_e) fournie à la charge est égale à la puissance mécanique ($P_{méca}$) développée par l'éolienne dont les valeurs optimales sont données dans le Tableau 1. On a donc les valeurs limites suivantes :

$$3\text{ m/s} < V < 14\text{ m/s}$$

$$111\text{ t/mn} < N < 516\text{ t/mn}$$

$$10\text{ W} < P_e < 625\text{ W}$$

La F.E.M à vide générée est $E_o = 0,24 \times N$, soit :

$$26\text{ V} < E_o < 124\text{ V}$$

Si on néglige la chute de tension dans la résistance R_s , les valeurs extrêmes de résistances de charge sont données par $R = E_o^2 / P_e$, soit :

$$70\Omega < R < 25\Omega$$

Dans ce cas, on voit que le banc de charge choisi permet d'effectuer le réglage de vitesse pour toute la gamme de vent.

Cas d'une génératrice de rendement égal à 0.5

En réalité, la génératrice choisie possède un rendement inférieur à un et variable en fonction du point de fonctionnement. Afin de vérifier le dimensionnement correct de la charge résistive, on choisit un cas défavorable avec un rendement égal à 50%. Dans ce cas on a les valeurs limites suivantes :

$$3\text{ m/s} < V < 14\text{ m/s}$$

$$111\text{ t/mn} < N < 516\text{ t/mn}$$

$$5\text{ W} < P_e < 312\text{ W}$$

La F.E.M à vide générée est toujours :

$$26\text{ V} < E_o < 124\text{ V}$$

Si on néglige la chute de tension dans la résistance R_s , les valeurs extrêmes de résistances de charge sont données par $R = E_o^2 / P_e$, soit :

$$140\Omega < R < 50\Omega$$

Ces valeurs limites sont comprises dans les valeurs disponibles sur le banc choisi ce qui permet de régler la vitesse de la génératrice afin d'obtenir le maximum de puissance pour un vent donné.

5. Techniques de mesure et d'estimation

Les grandeurs à mesurer sont la vitesse de vent, la vitesse de rotation et la puissance électrique délivrée par l'éolienne. Le dispositif expérimental est donné sur la Figure 3.

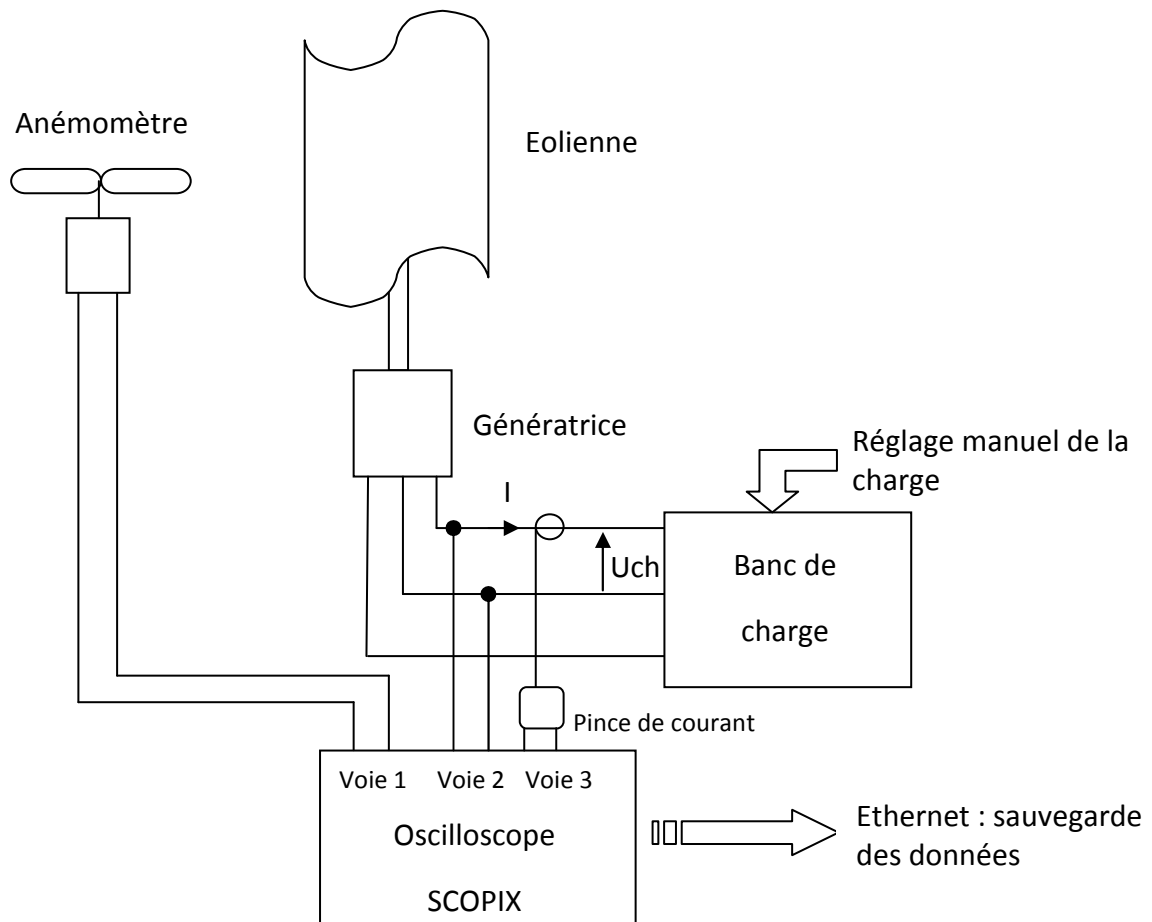


Figure 3: Dispositif expérimental

5.1 Mesure de la tension et du courant

Les grandeurs électriques mesurées sont la tension entre phases en charge (U_{ch}) et le courant fourni à la charge (I). Afin d'obtenir un maximum d'informations, il faut enregistrer les signaux sur un horizon suffisamment long mais avec un nombre de points élevé. L'oscilloscope choisi (SCOPIX II, société Chauvin Arnoux) possède un mode enregistreur permettant l'acquisition de 50000 points par voie sur une durée variable. Nous choisissons une durée d'enregistrement de 10 minutes ce qui permet d'obtenir un échantillon de tension de courant et de vent toutes les 12 ms.

(600s/50000). Cette période d'échantillonnage est suffisamment faible pour obtenir une bonne description des signaux électriques. Sur la Figure 4, on donne un exemple de la mesure de tension U_{ch} sur 10mn et un zoom sur une durée de 1 seconde (Figure 5).

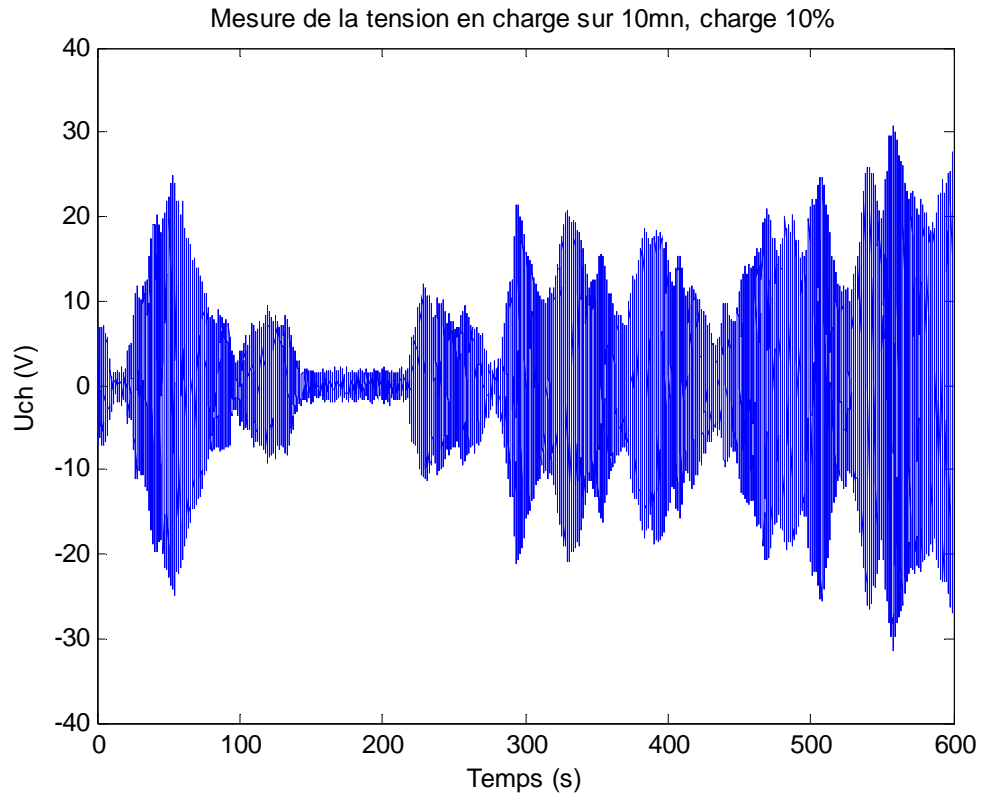


Figure 4 : Mesure de la tension en charge sur 10mn

Pour le niveau de vent rencontré lors des essais (5m/s en moyenne), la période d'échantillonnage de 12ms est correcte comme le montre les Figure 4 et Figure 5 où le signal apparaît bien comme étant sinusoïdal. En effet ces courbes sont obtenues pour une charge de 10%, c'est à dire que la génératrice est quasiment à vide. La fréquence de sa tension est maximale, pour des charges supérieures, la machine ralentira et la fréquence diminuera ce qui offrira une résolution encore meilleure. Si la vitesse de vent avait été plus élevée il aurait fallu diminuer la période d'échantillonnage en diminuant le temps d'observation.

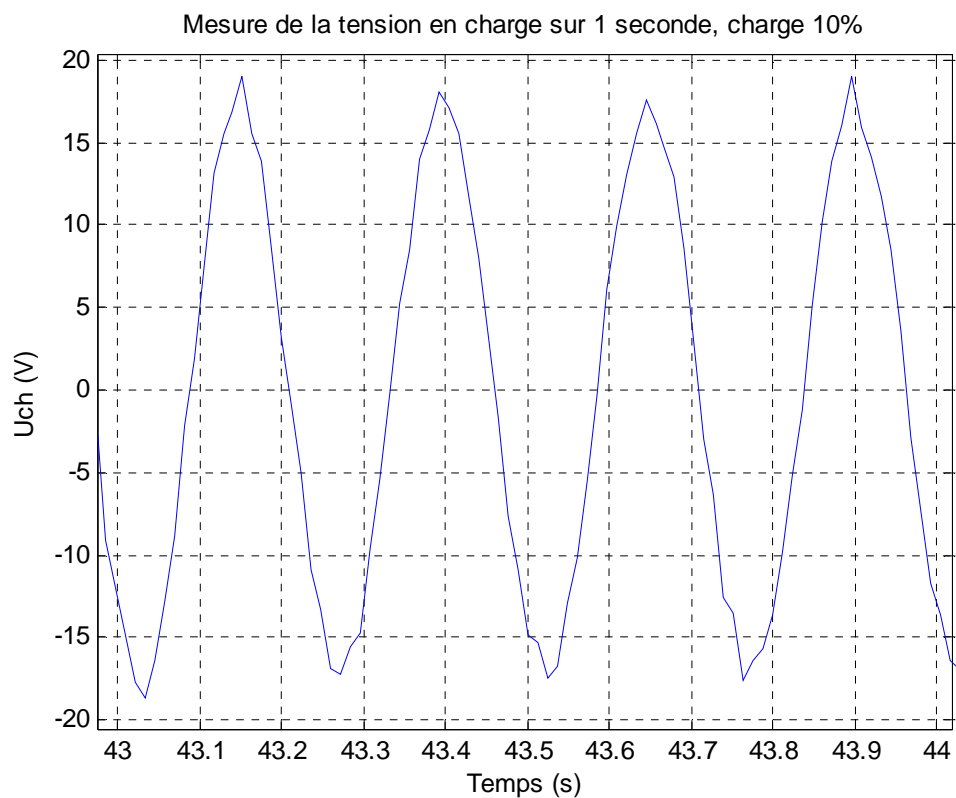


Figure 5: Mesure de la tension en charge sur 1s

5.2 Mesure de la vitesse du vent

La mesure de vent est effectuée à l'aide d'un anémomètre à ultra son dont la caractéristique de transfert est donnée dans le Tableau 5.

Vitesse de vent (en nds)	U :Tension de sortie du capteur (en V)
0	0.33
10	1.07
20	1.8
30	2.54
40	3.28
50	4.01
60	4.75
70	5.49
80	6.23
90	6.96
95	7.33

Tableau 5 : caractéristique de l'anémomètre CV7-0_10V

On tire du Tableau 5 l'équation donnant la vitesse du vent en nœuds en fonction de la tension mesurée est :

$$V_{nds}=13,51 \times U^{-4,459}$$

La vitesse exprimée en mètres par seconde est obtenue par la relation :

$$V_{ms}=0,51 \times V_{nds}$$

5.3 Reconstruction de la vitesse de rotation

Dans le dispositif expérimental mis en place ici, la vitesse de rotation de l'éolienne n'est pas directement mesurée pour des raisons de coût. Cette vitesse peut-être déduite facilement des mesures de courant et de tension.

Reconstruction à partir de la fréquence électrique

Une génératrice synchrone produit des courants et des tensions dont la fréquence (F en hertz) est proportionnelle à sa vitesse de rotation (n en tours par seconde). La relation liant n à F est :

$$F=p \times n,$$

Où p est le nombre de paires de pôles de la machine. La génératrice LRSPM90SL possède 8 pôles, d'où p=4. En fonction de la vitesse exprimée en tours par minute, on obtient :

$$F=4 \times N/60=N/15.$$

En mesurant la fréquence des courants ou des tensions, on peut en déduire la vitesse de rotation en tours par minute. Toutefois, sur des données expérimentales la détermination de la fréquence est difficile à cause du bruit de mesure qui rend la détection du passage à zéro de la tension imprécise.

Reconstruction à partir de la F.E.M

On rappelle que la F.E.M à vide est liée à la vitesse de rotation par la relation :

$$E_o=K \times N$$

On mesure la tension en charge aux bornes du plan de charge (U_{ch}) et le courant I. La relation liant ces grandeurs est :

$$U_{ch}=E_o - 2xR_s \times I$$

où R_s est la résistance des enroulements statoriques (on néglige ici l'inductance de fuite dont la valeur est faible sur ces machines à haut rendement). On obtient :

$$E_o=U_{ch}+2xR_s \times I=K \times N,$$

soit :

$$N=(U_{ch}+2xR_s \times I)/K$$

Avec $R_s=2,3\Omega$ (donnée constructeur) et $K=0,24$. La vitesse de rotation N peut-être reconstruite à partir de la mesure de U_{ch} et du courant I . On peut en déduire la fréquence électrique $F=N/15$. Sur la Figure 6 est représentée la tension U_{ch} et l'estimation de la fréquence F sur un horizon de 10mn.

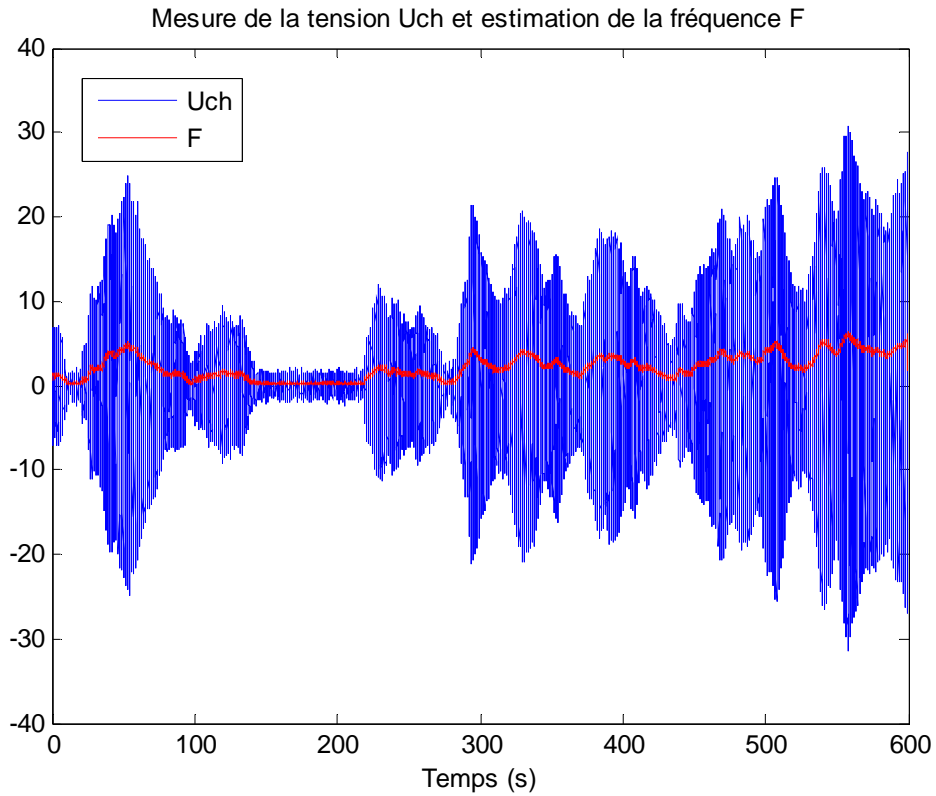


Figure 6 : Mesure de la tension U_{ch} et estimation de la fréquence F

Sur la Figure 7, la tension U_{ch} et la fréquence F estimée sont représentées. On vérifie que l'estimation est correcte et que l'on peut reconstruire la fréquence (ou la vitesse de rotation) à partir de la mesure de U_{ch} et de I .

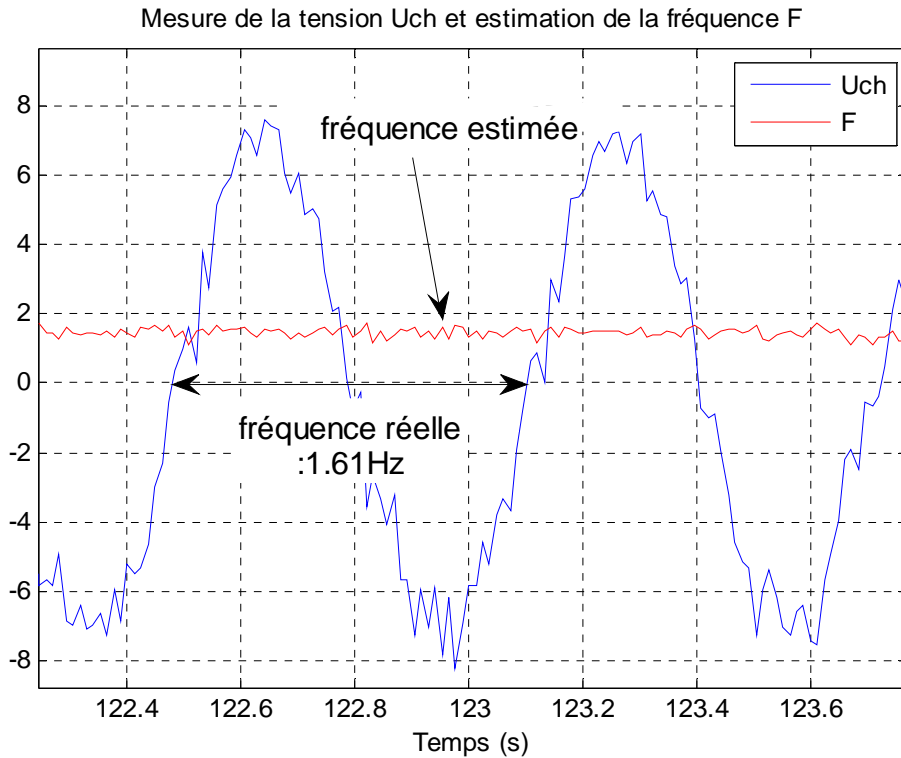


Figure 7 : Vérification de la valeur de la fréquence estimée

5.4 Reconstruction de la puissance électrique

En régime sinusoïdal et dans un système triphasé équilibré, la puissance totale s'exprime sous la forme :

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{ef} \cdot I_f$$

où U_{ef} et I_f représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension U_{ch} et du courant I . Si U_{ch} et I sont des grandeurs sinusoïdales, les valeurs efficaces peuvent être calculées connaissant les valeurs maximales \hat{U} et \hat{I} par les relations :

$$U_{ef} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \text{ et } I_f = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

En faisant l'hypothèse que la fréquence des signaux électriques est grande par rapport à la durée d'observation, on peut reconstruire les variations des valeurs efficaces U_{ef} et I_f en fonction du temps. Pour cela, on reconstruit l'enveloppe de la tension U_{ch} et du courant I puis on la divise par $\sqrt{2}$. Cette reconstruction est effectuée en utilisant la transformée de Hilbert des signaux U_{ch} et I . La Figure 8 montre la reconstruction de l'enveloppe de U_{ch} par transformation de Hilbert. Un zoom sur un horizon court montre que l'estimation de la valeur efficace est correcte

(Figure 9). En effet, le maximum de la tension est de l'ordre de 23V soit une valeur efficace égale à 16V ce qui est proche de la valeur estimée.

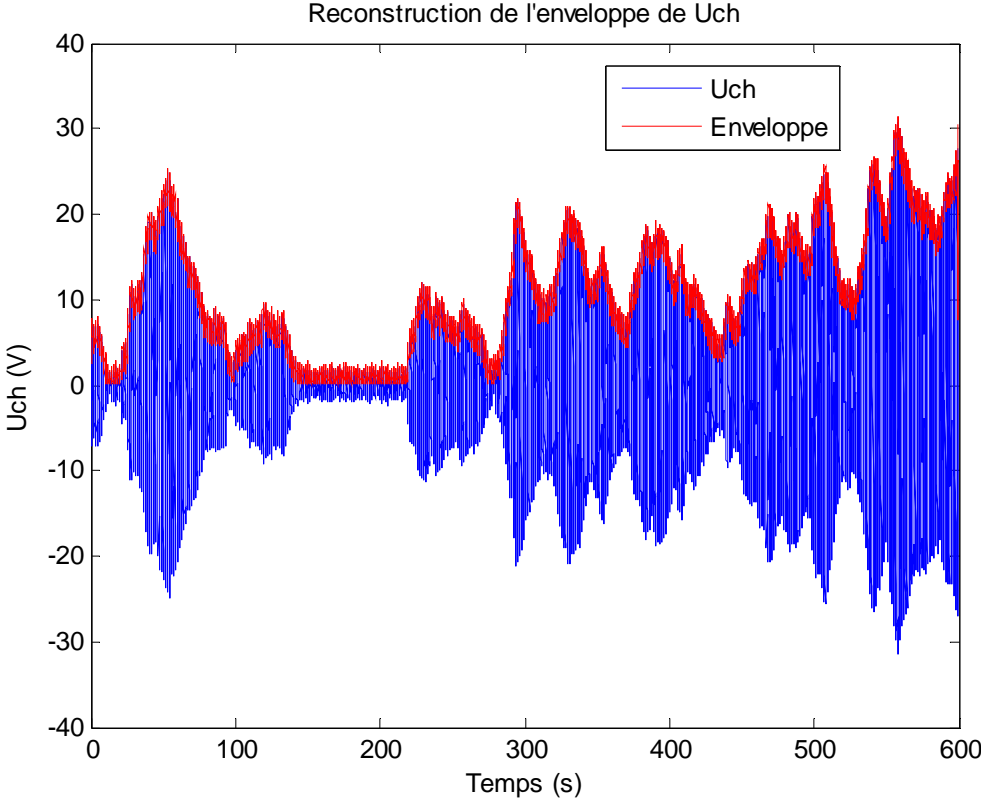


Figure 8 : Reconstruction de l'enveloppe de Uch

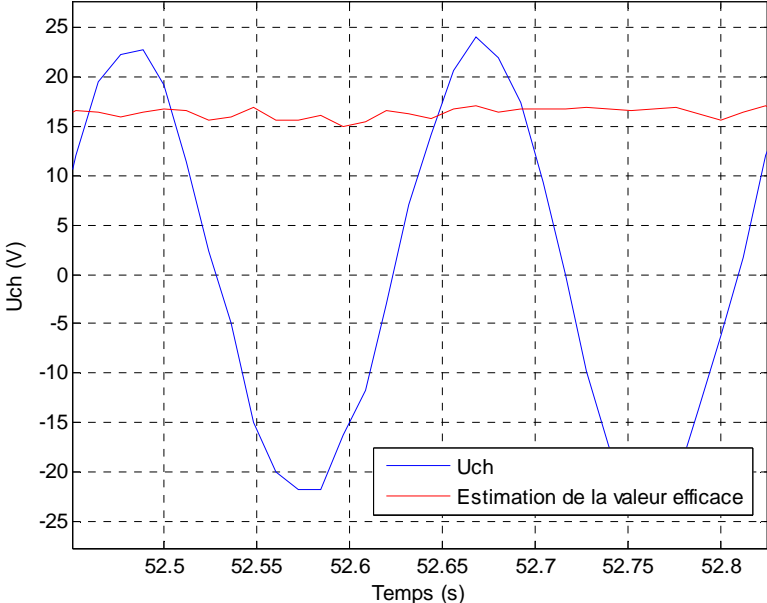


Figure 9 : Estimation de la valeur efficace de la tension Uch

On peut donc estimer simplement l'évolution des valeurs efficaces de la tension U_{ch} et du courant I en fonction du temps. Par conséquent, on peut reconstruire la puissance totale délivrée par l'éolienne sur l'horizon d'observation.

Sur la Figure 10, on donne les mesures de la tension U_{ch} et du courant I sur une période de 4 secondes. Sur cet intervalle, les signaux sont sinusoïdaux et d'amplitude quasi constante. On lit $\hat{U}=20V$ et $\hat{I}=0.2A$, d'où $U_{eff}= 14.1V$ et $I_{eff}=0.14A$. L'application de la formule

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{e f} \cdot I_{e f} ,$$

donne $P=3.46W$. La valeur estimée est donnée en bas de la Figure 10 est correcte.

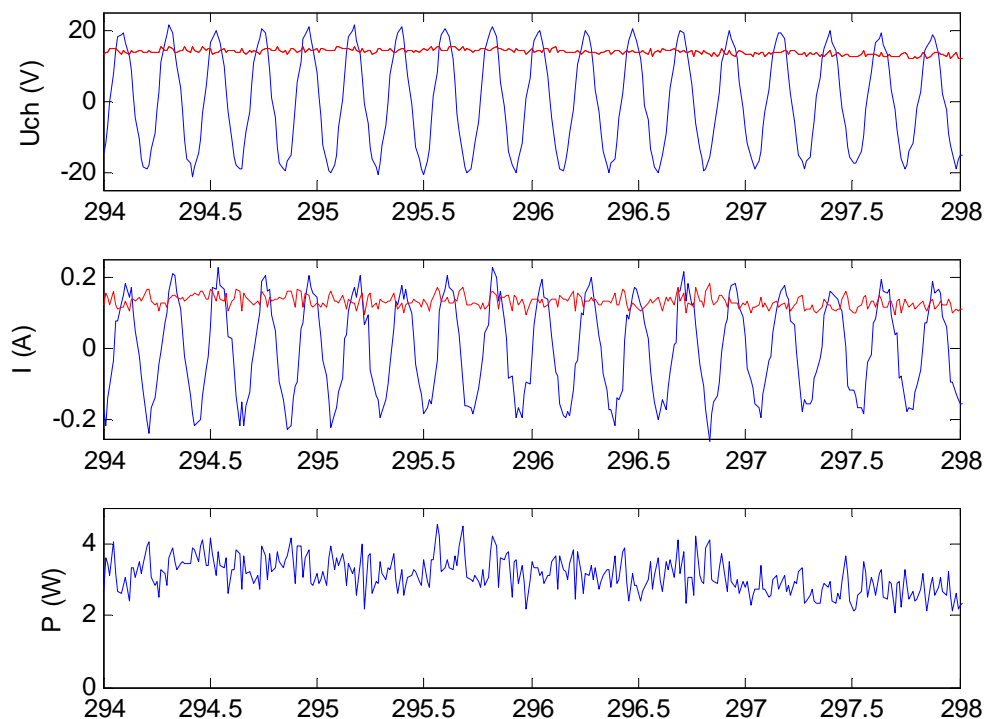
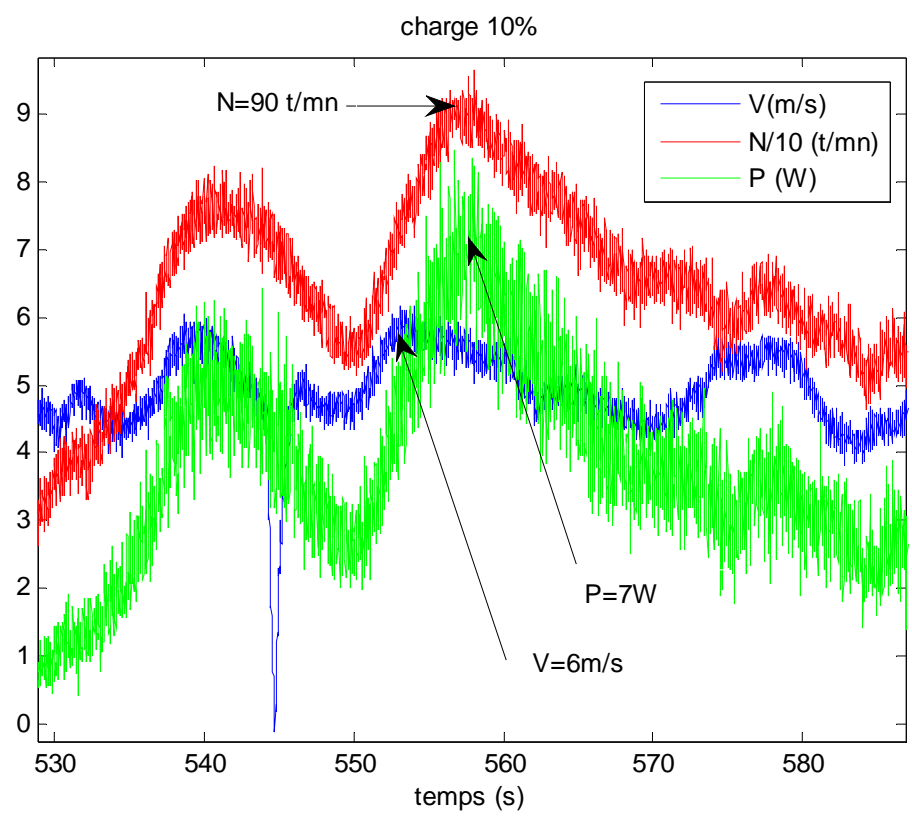
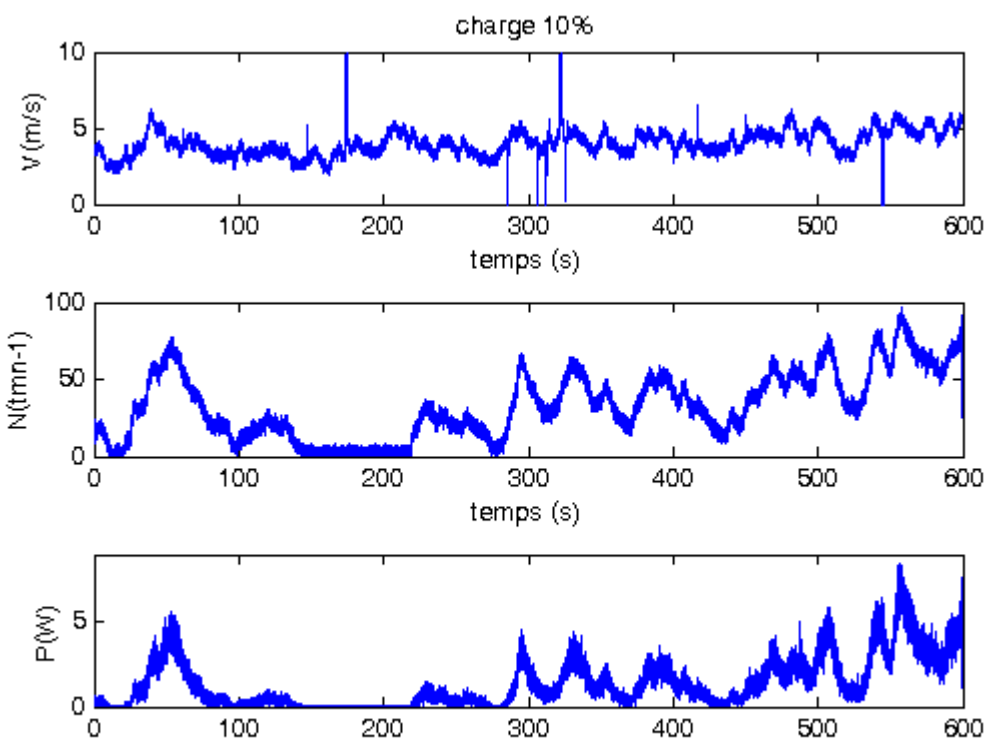


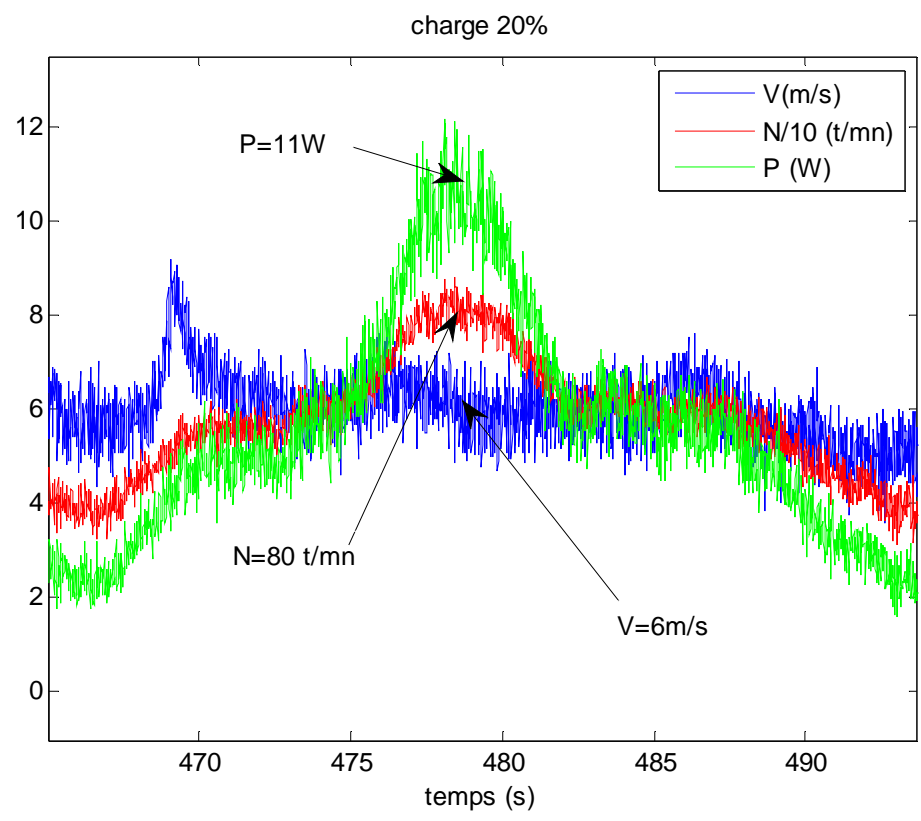
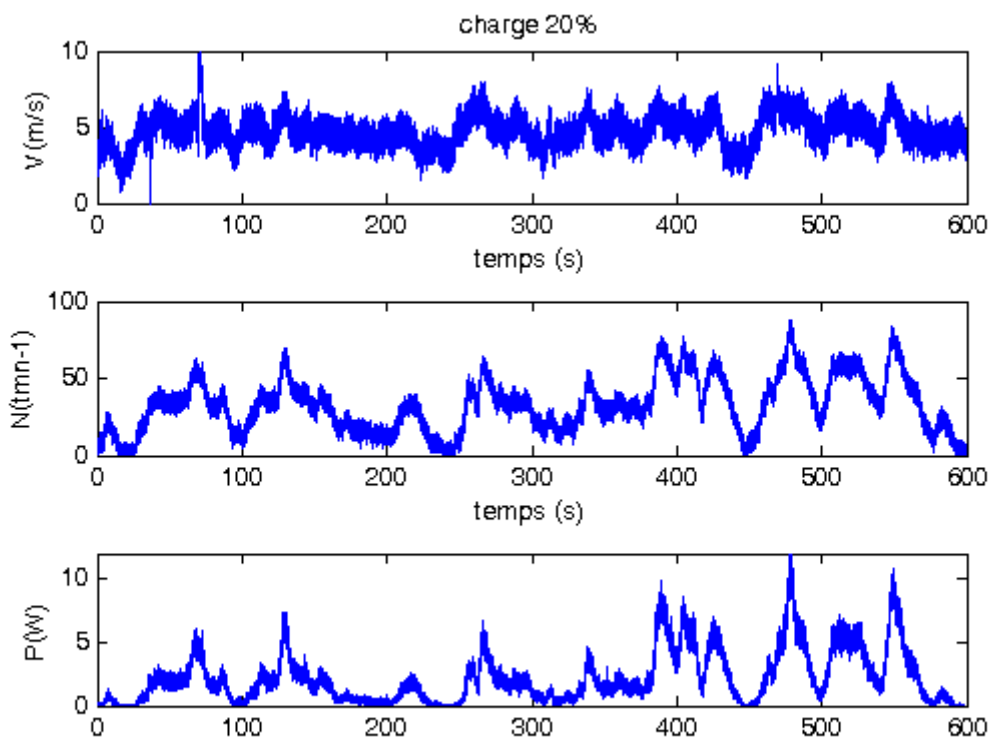
Figure 10 : Estimation de la puissance à partir de la tension et du courant

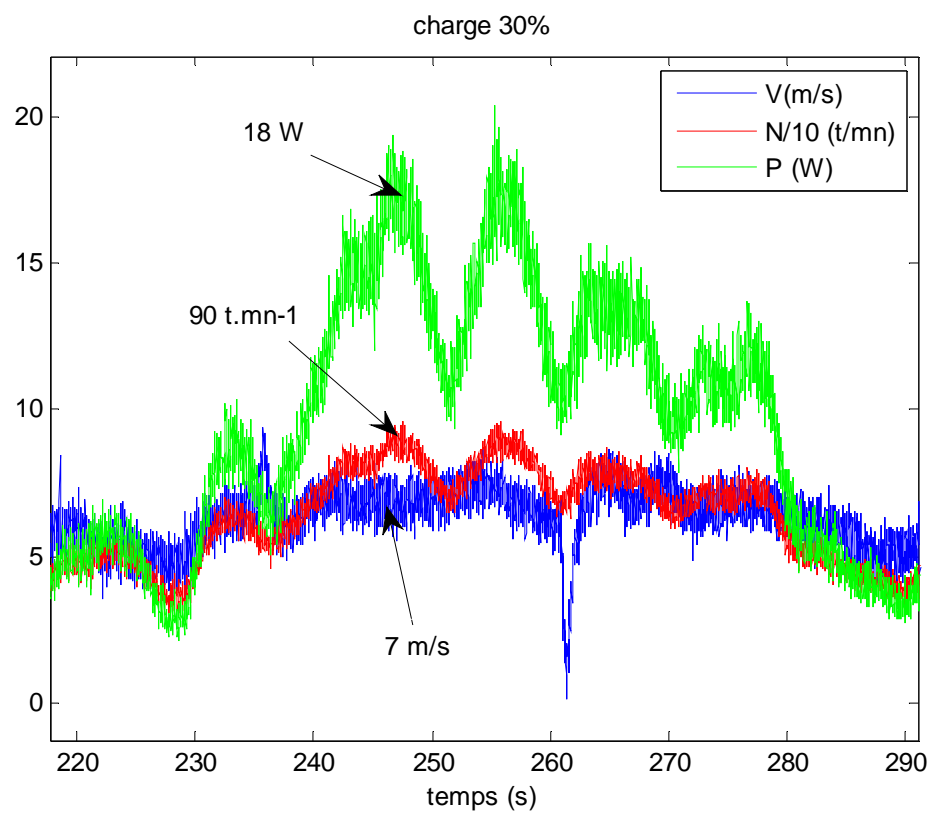
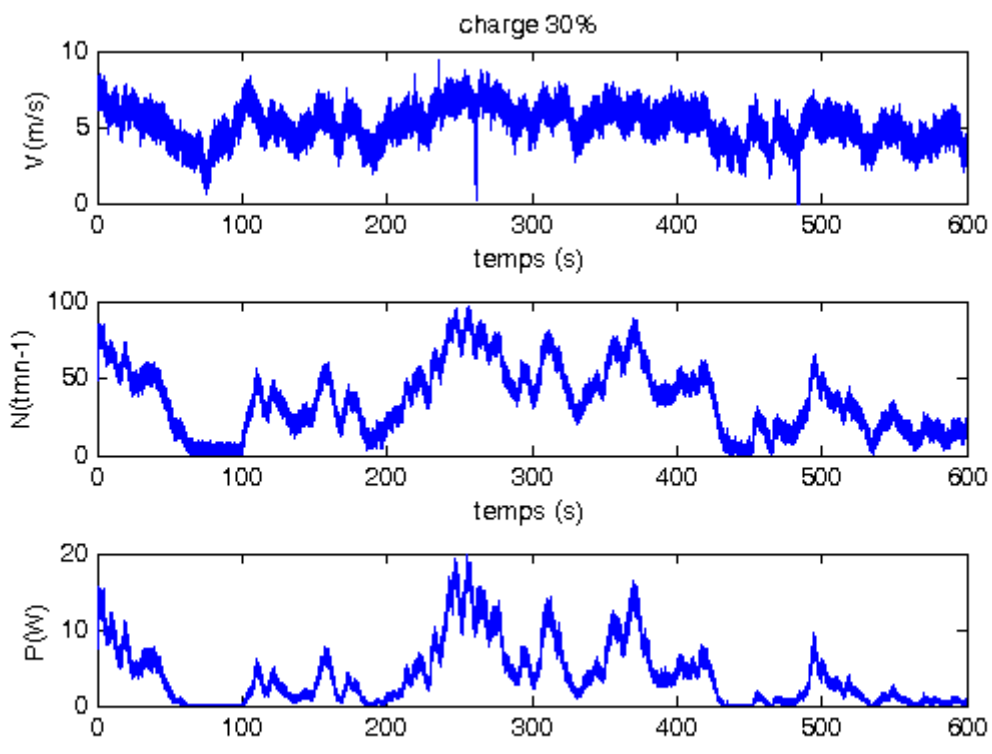
6. Relevés expérimentaux

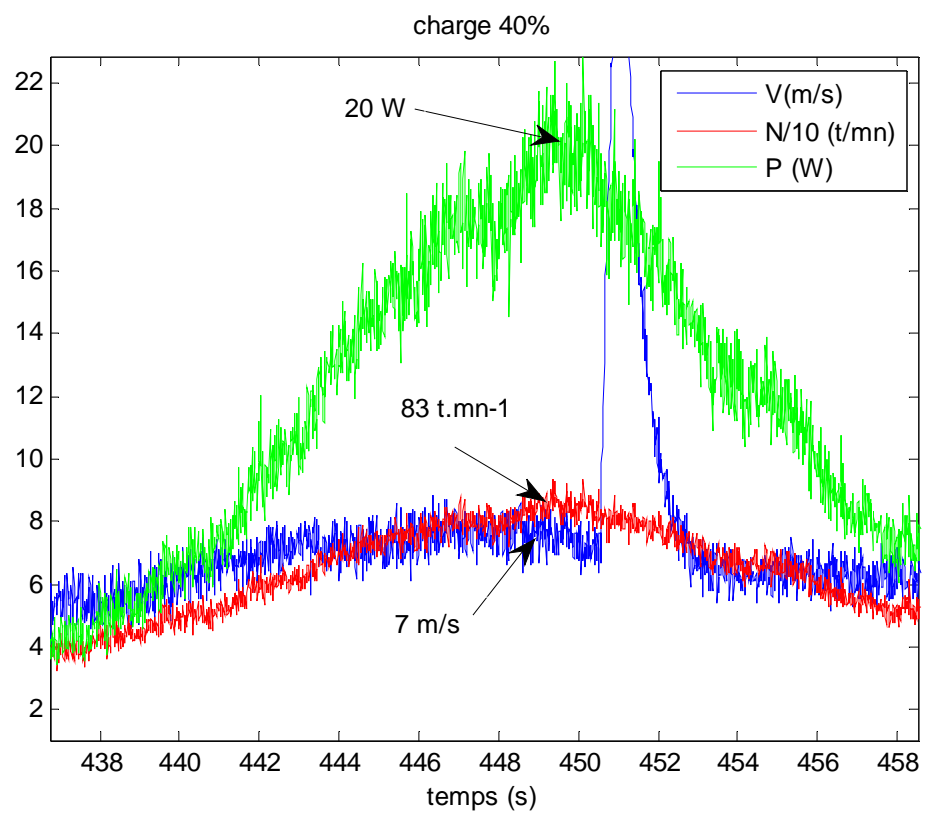
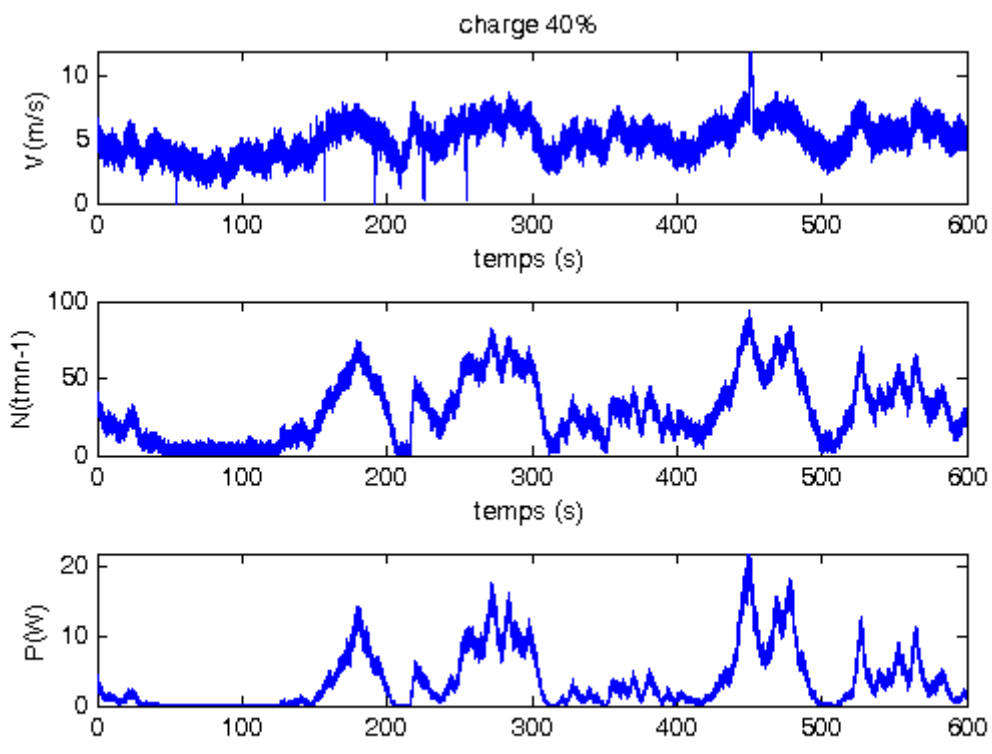
Les relevés présentés ici ont été effectués sur 2 journées. Pour chacune d'elles, on représente la puissance, la vitesse de vent et la vitesse de rotation pour 9 charges différentes (de 10% à 90%). Pour chaque relevé on effectués un zoom sur un ou plusieurs pics de puissance afin de mettre en évidence quelques points de fonctionnement particuliers.

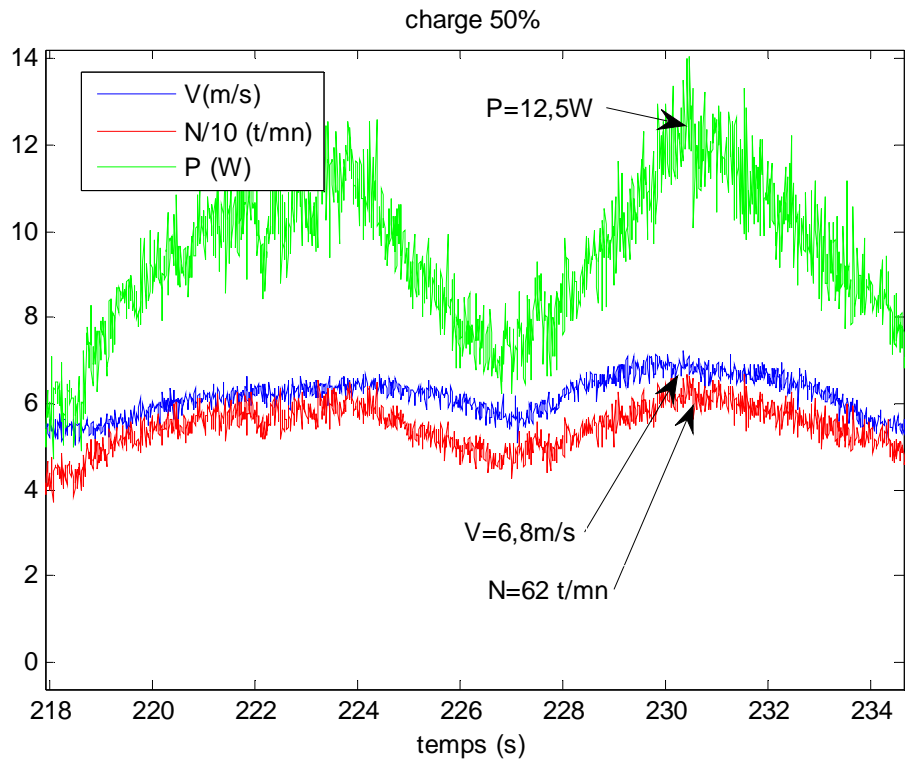
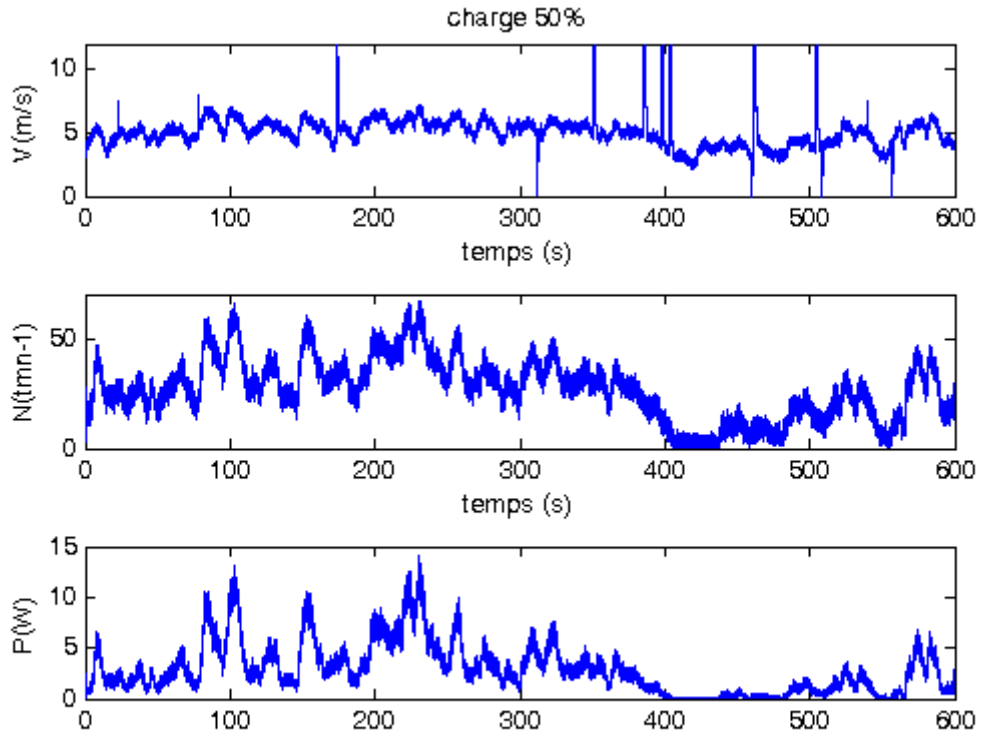
Mesures du 13 Avril 2010

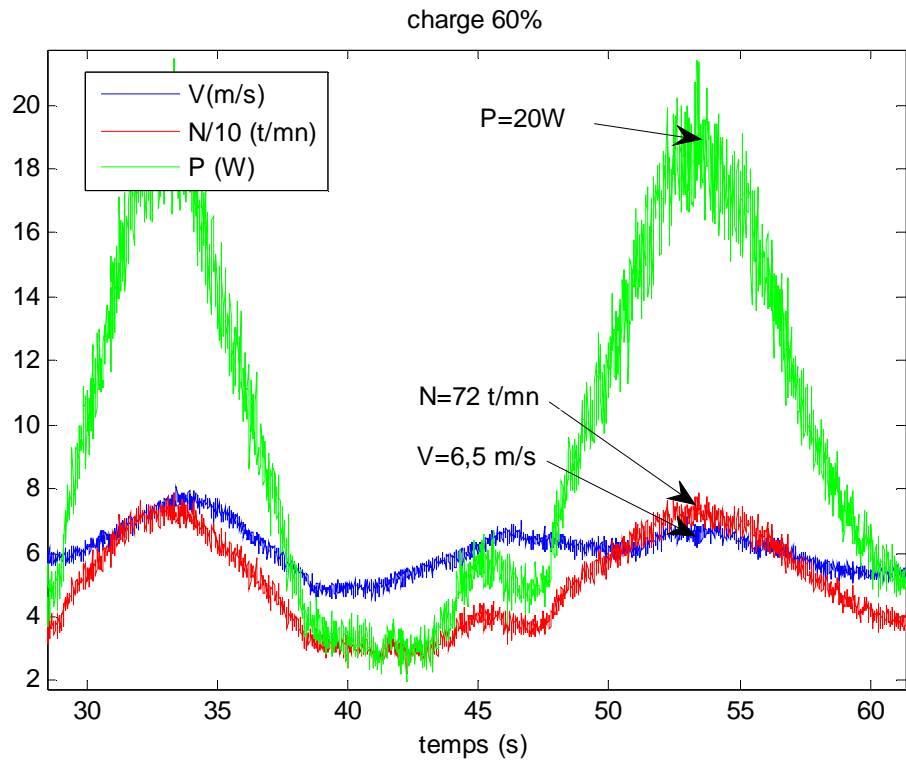
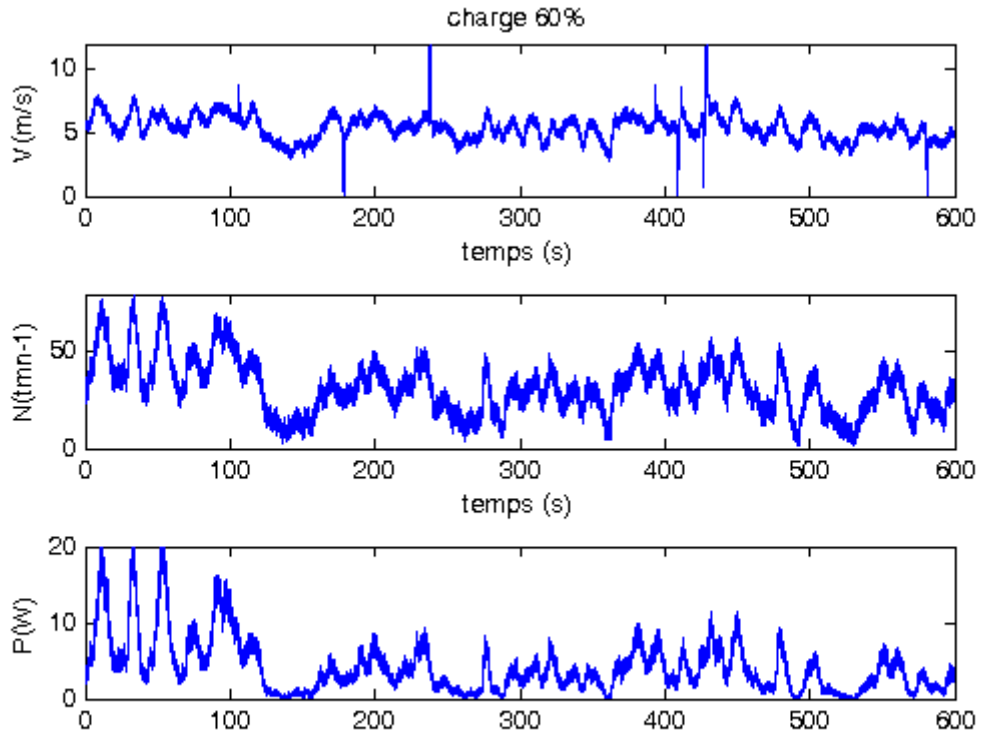


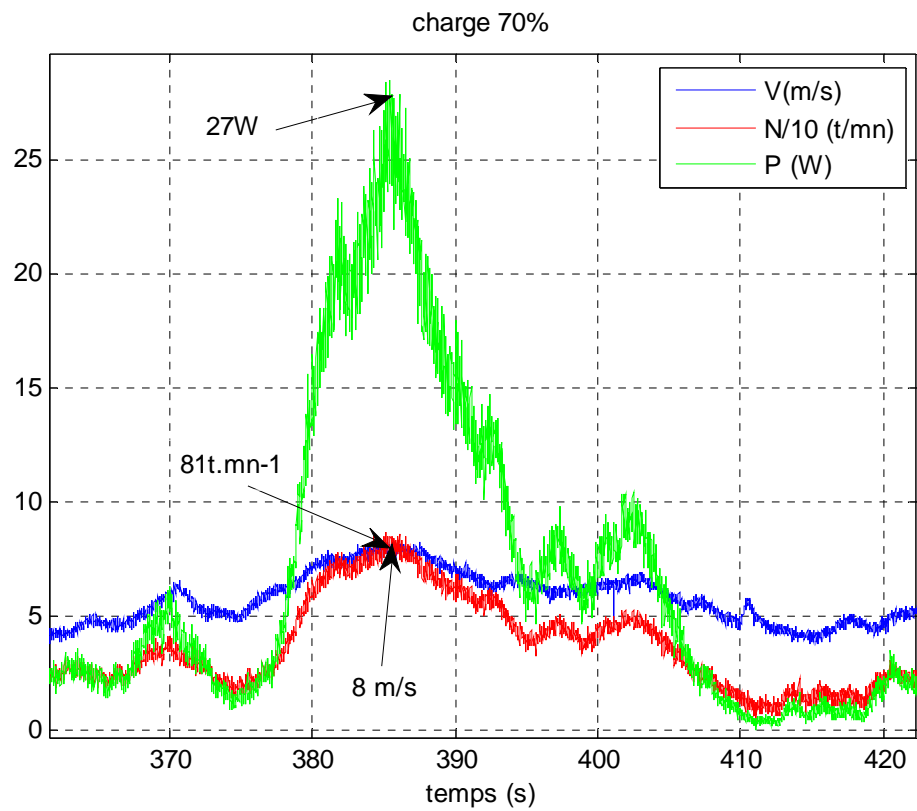
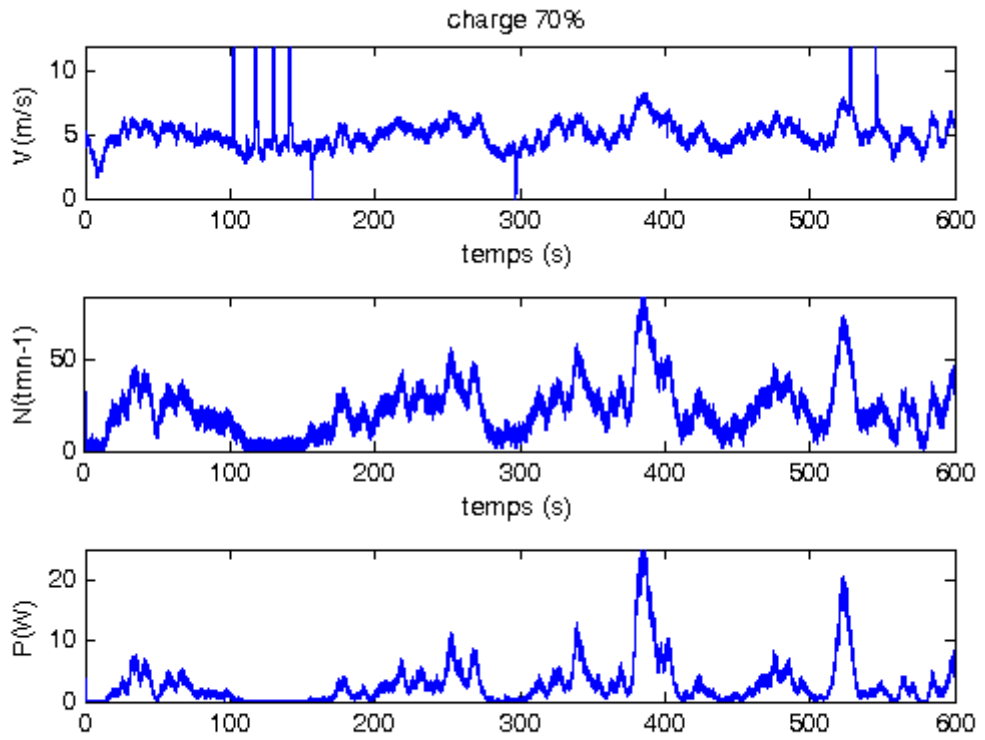


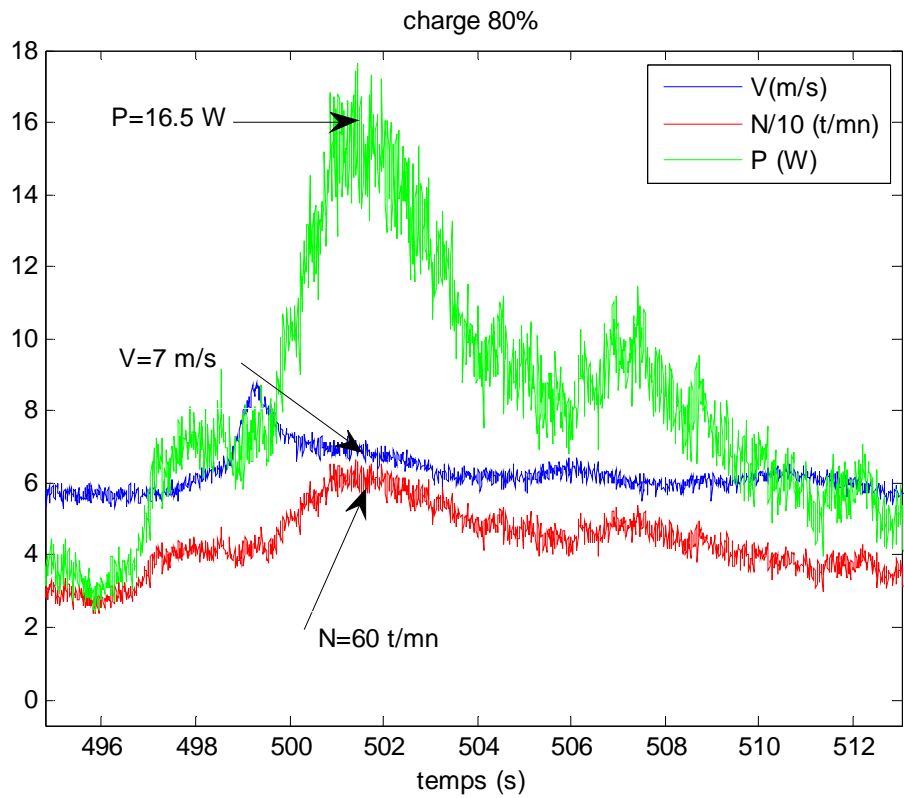
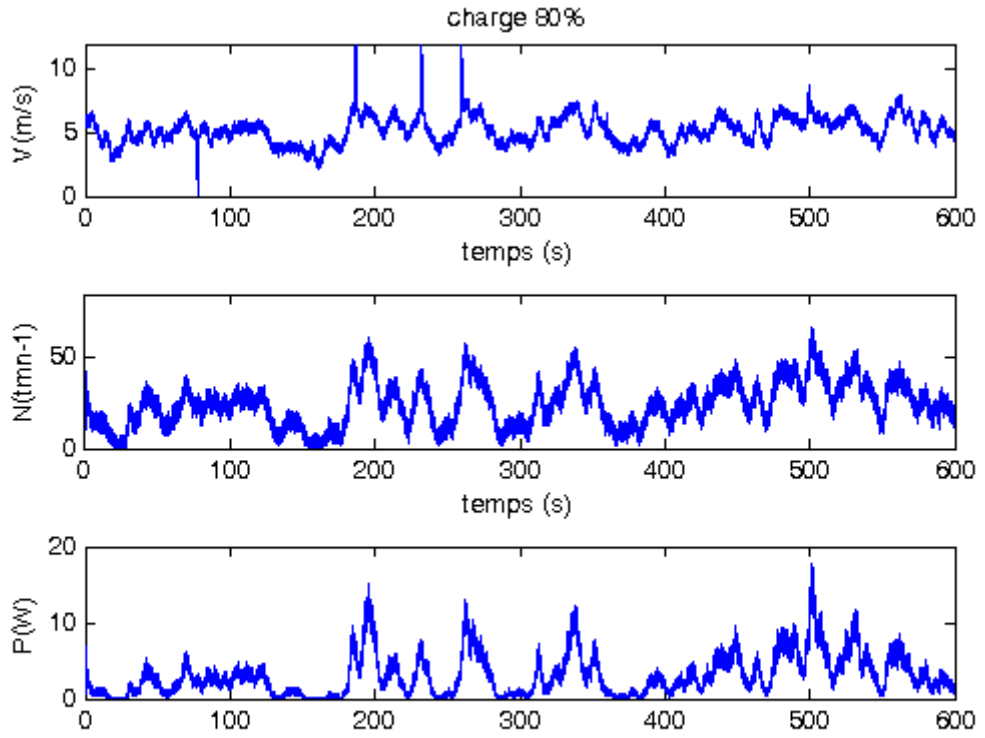


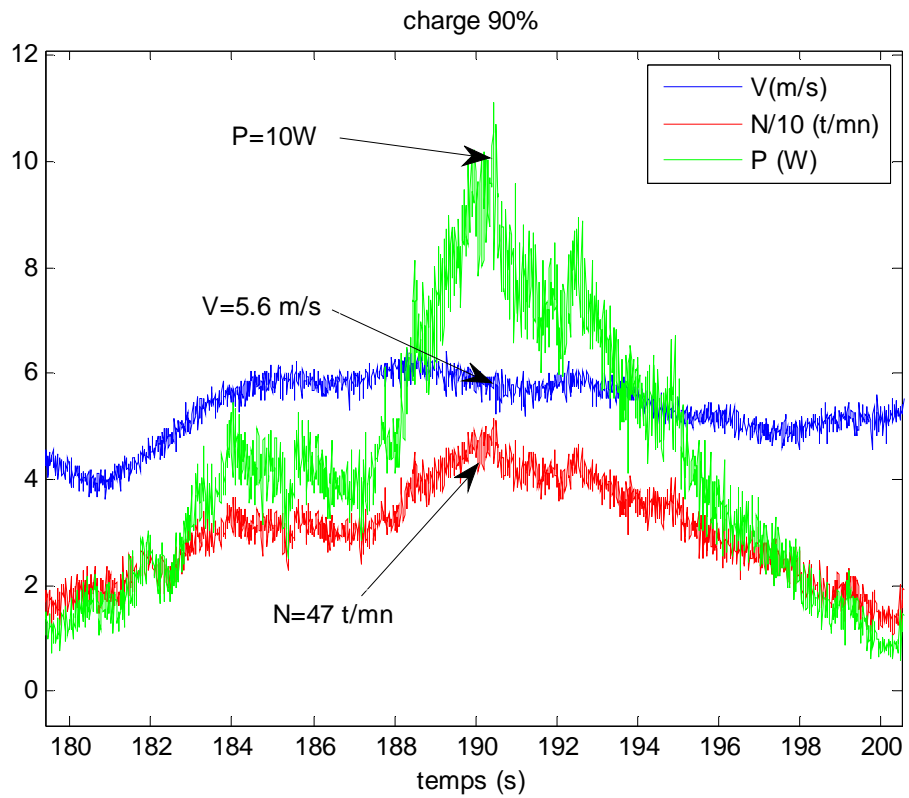
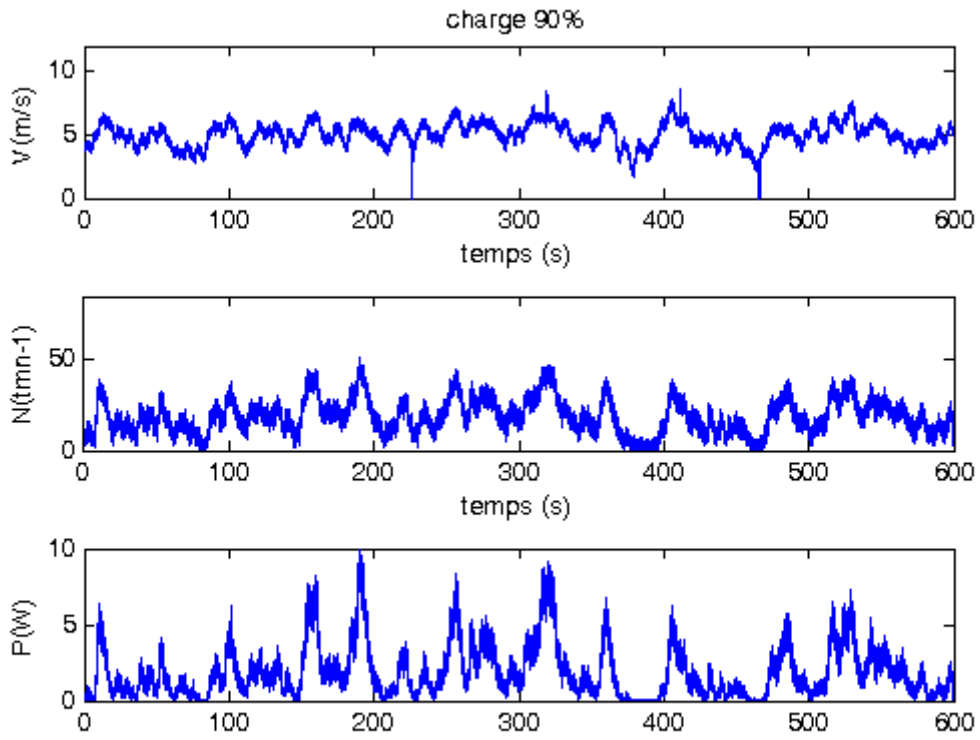




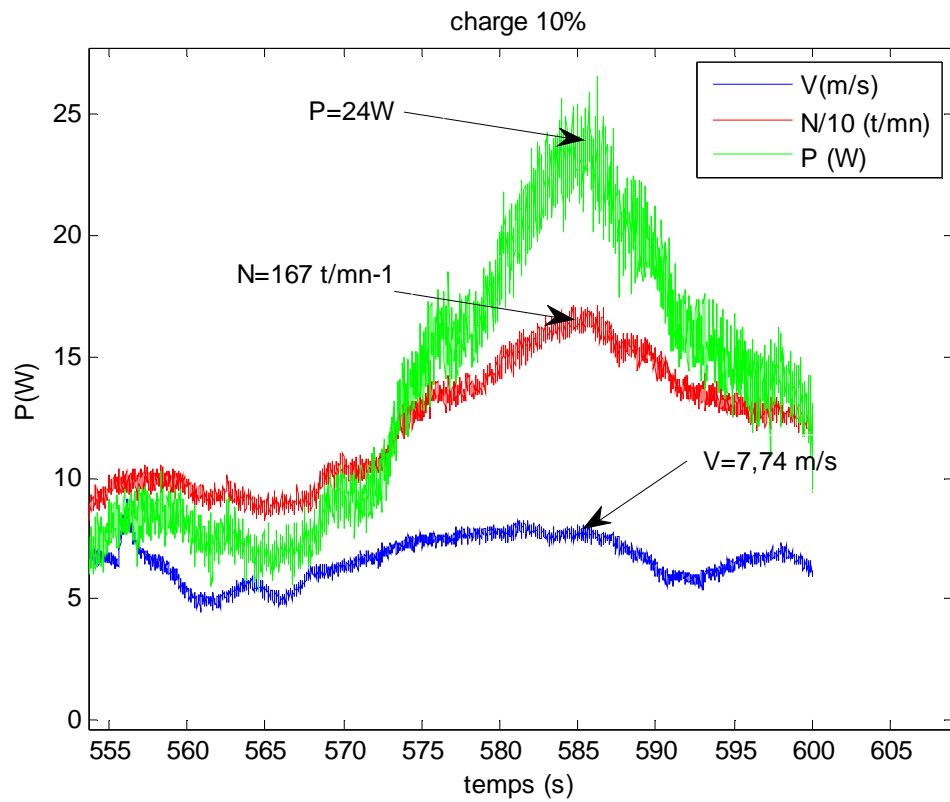
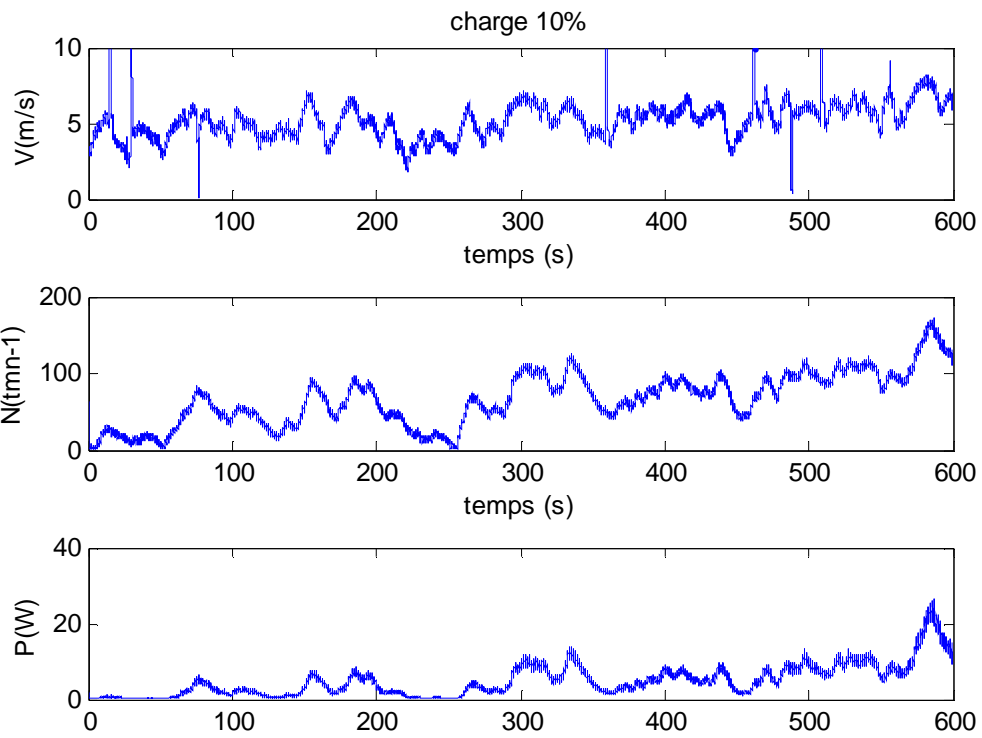


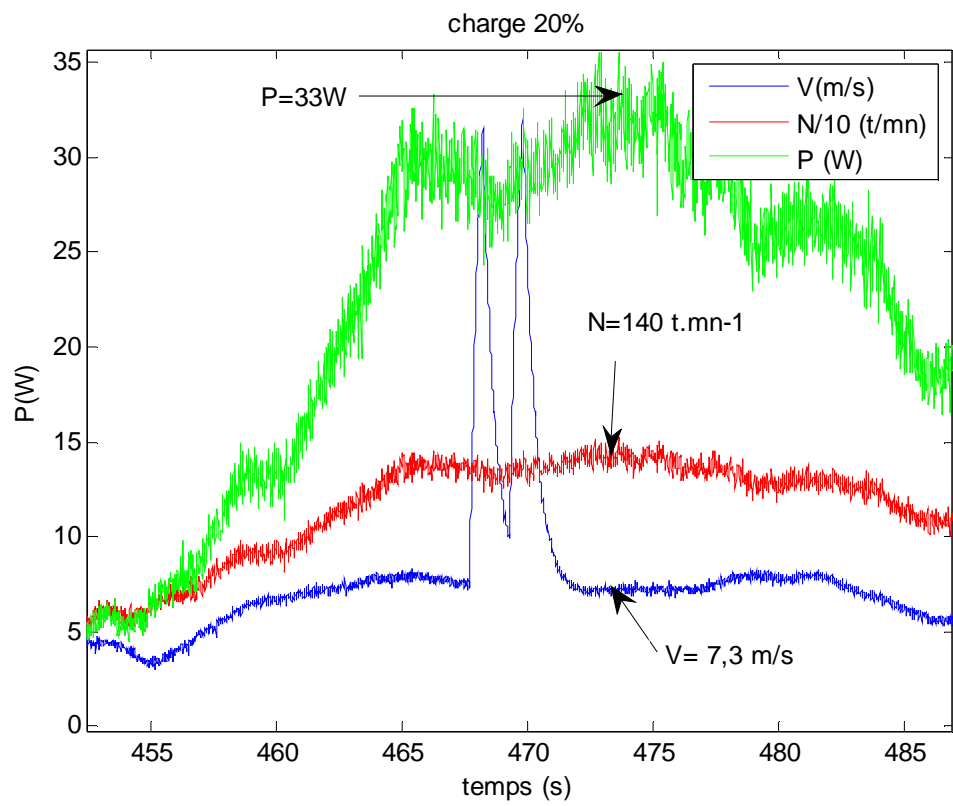
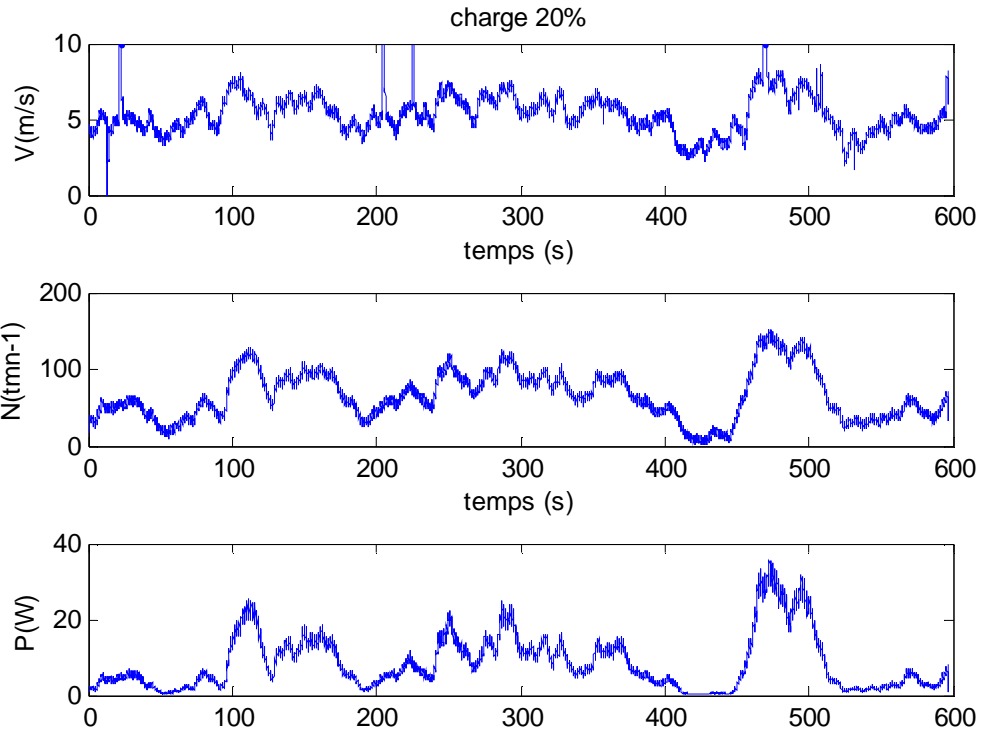


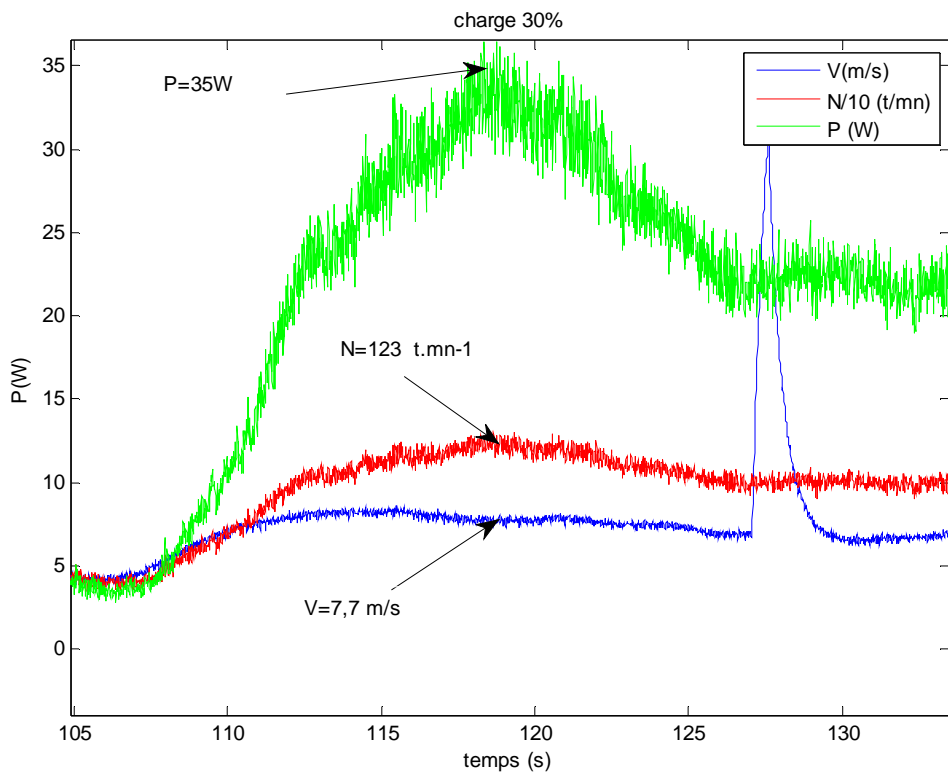
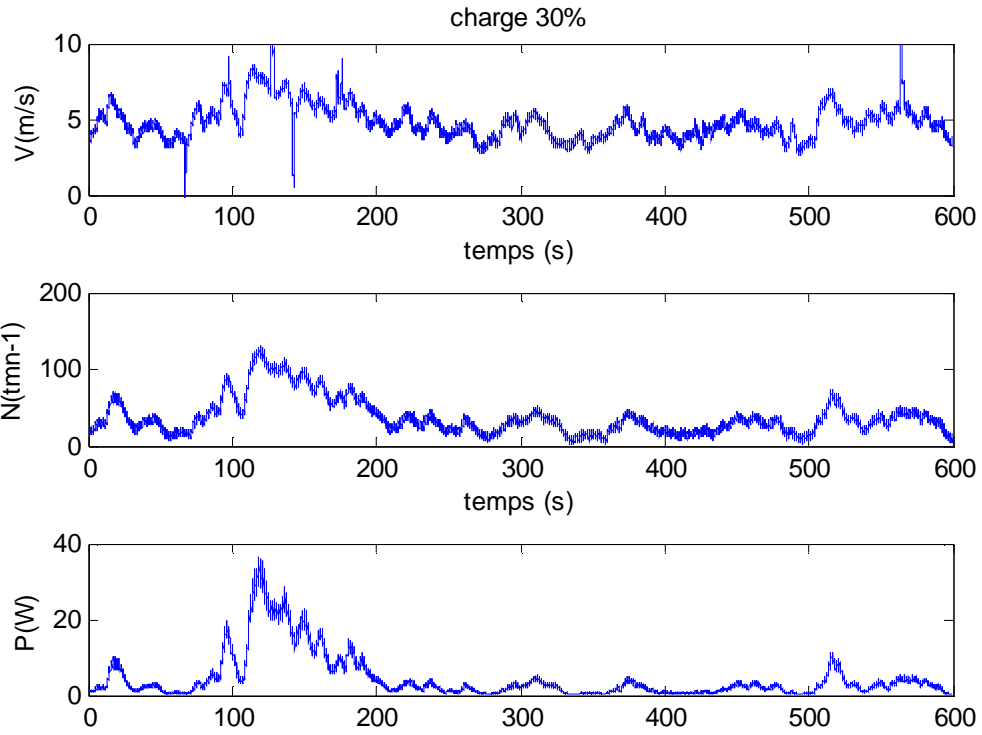


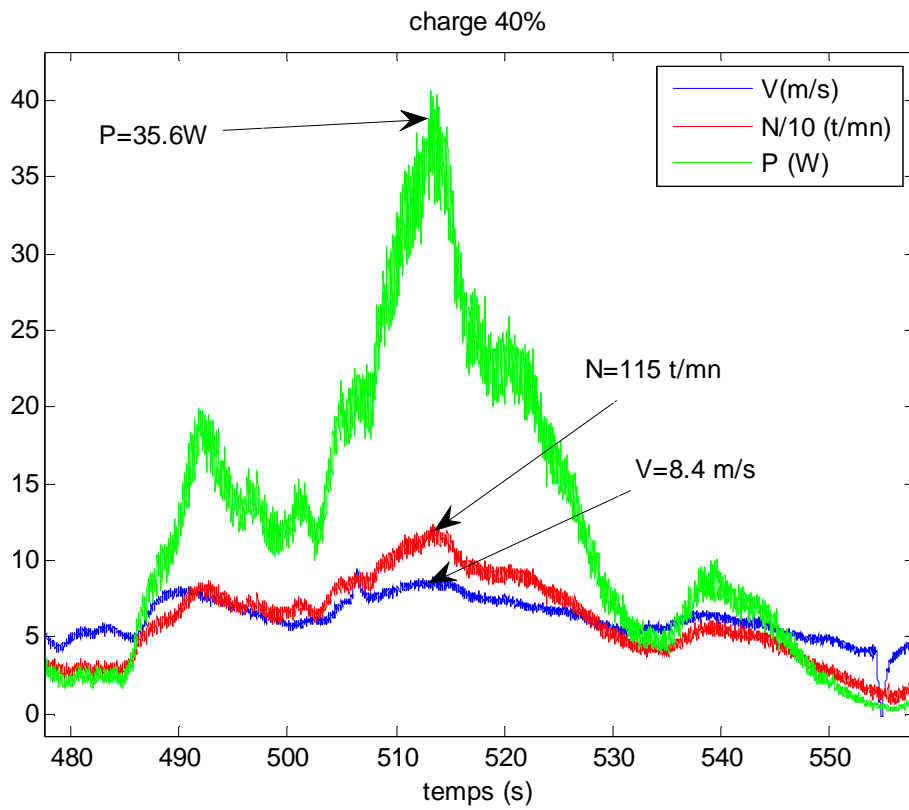
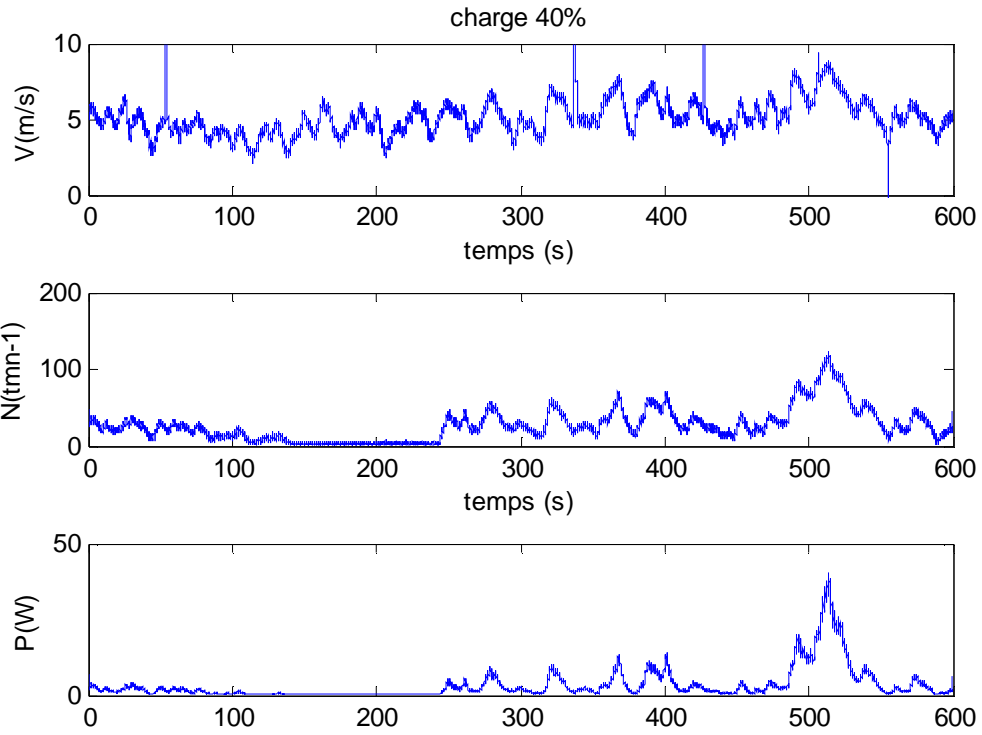


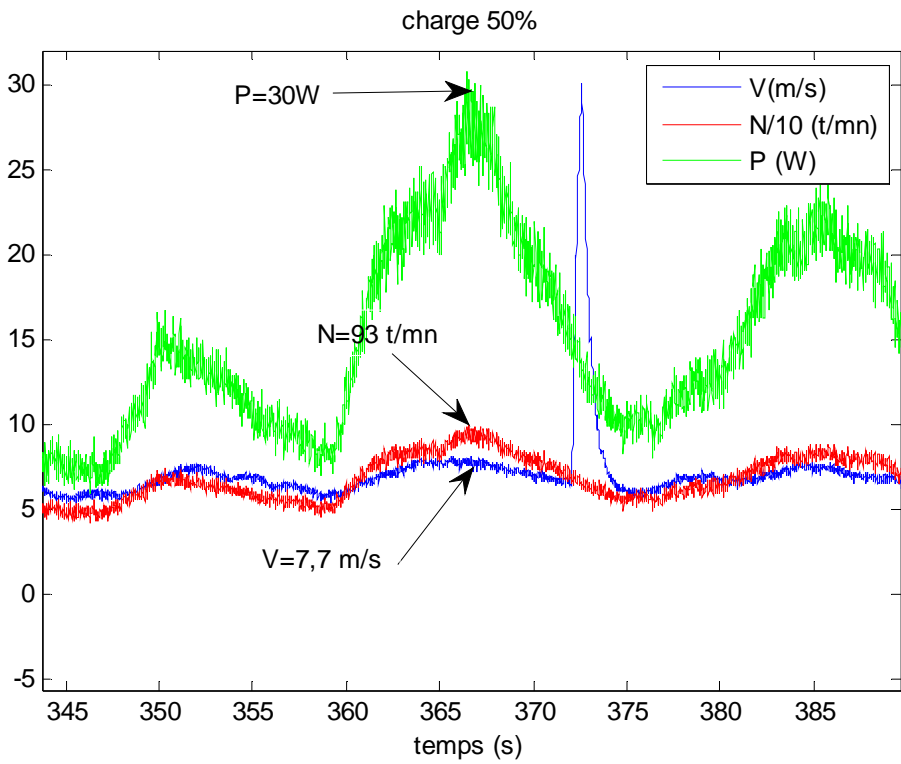
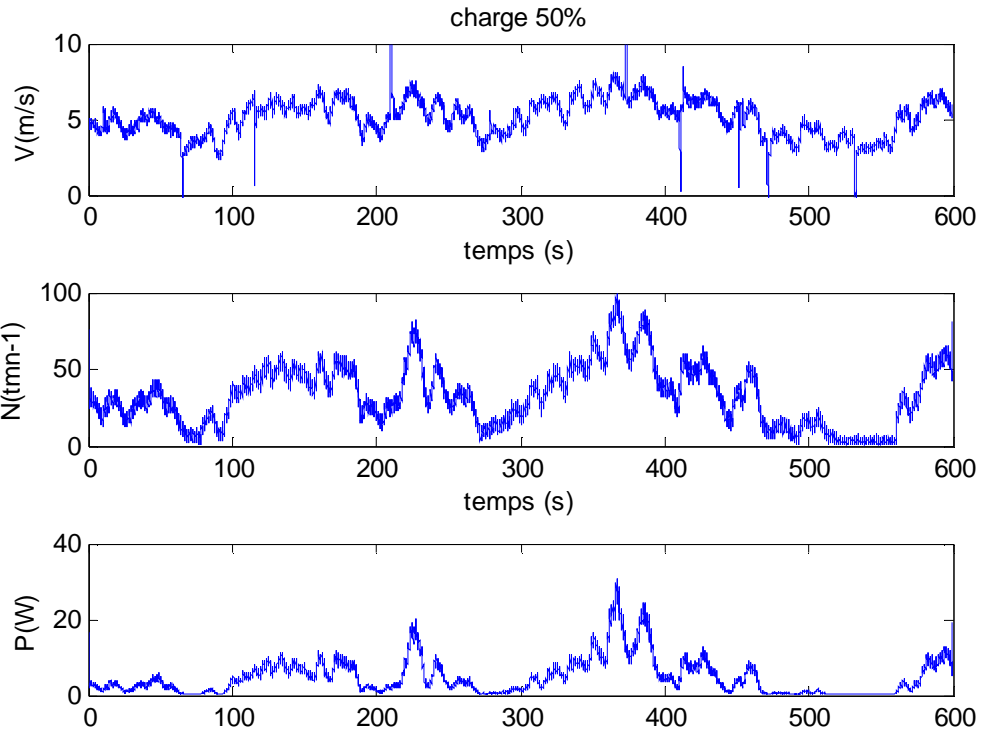
Mesures du 15 Avril 2010

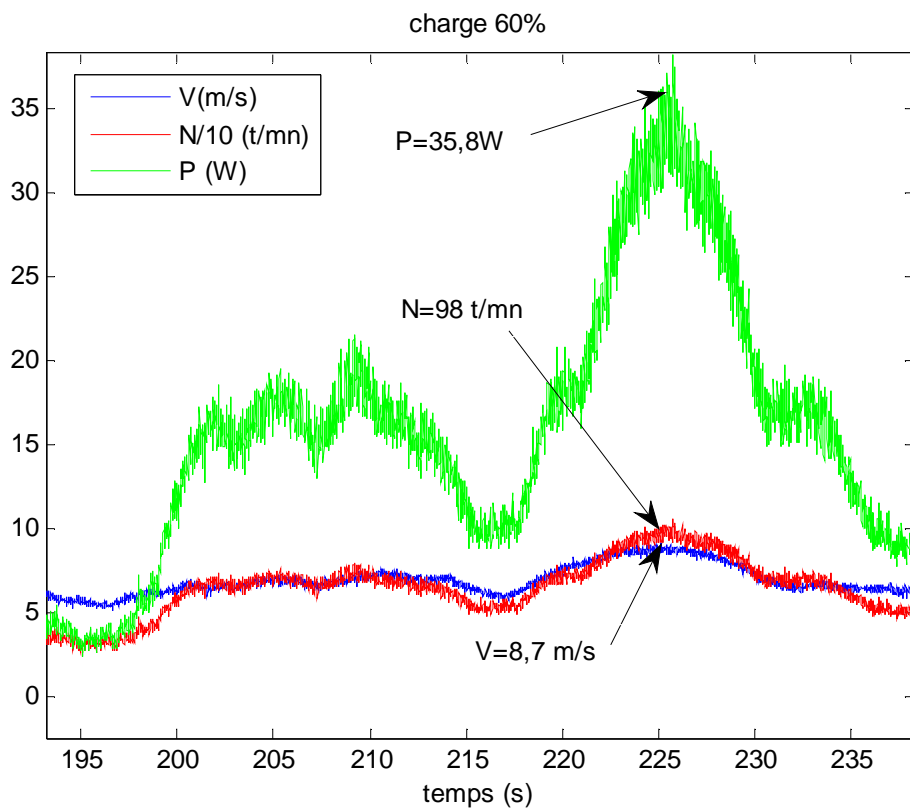
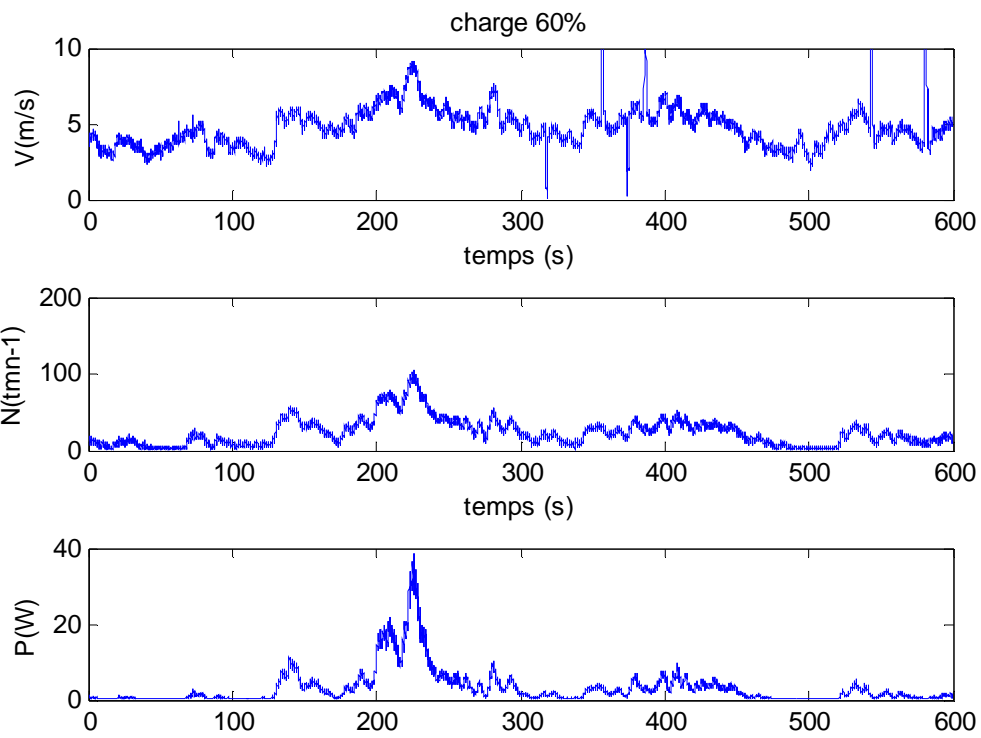


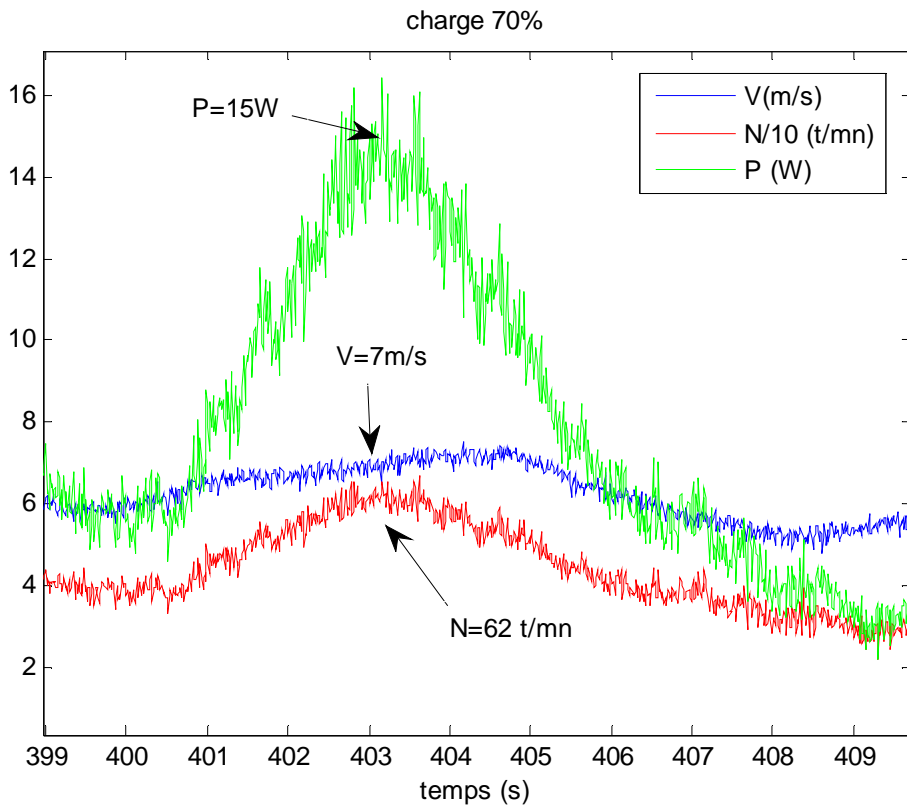
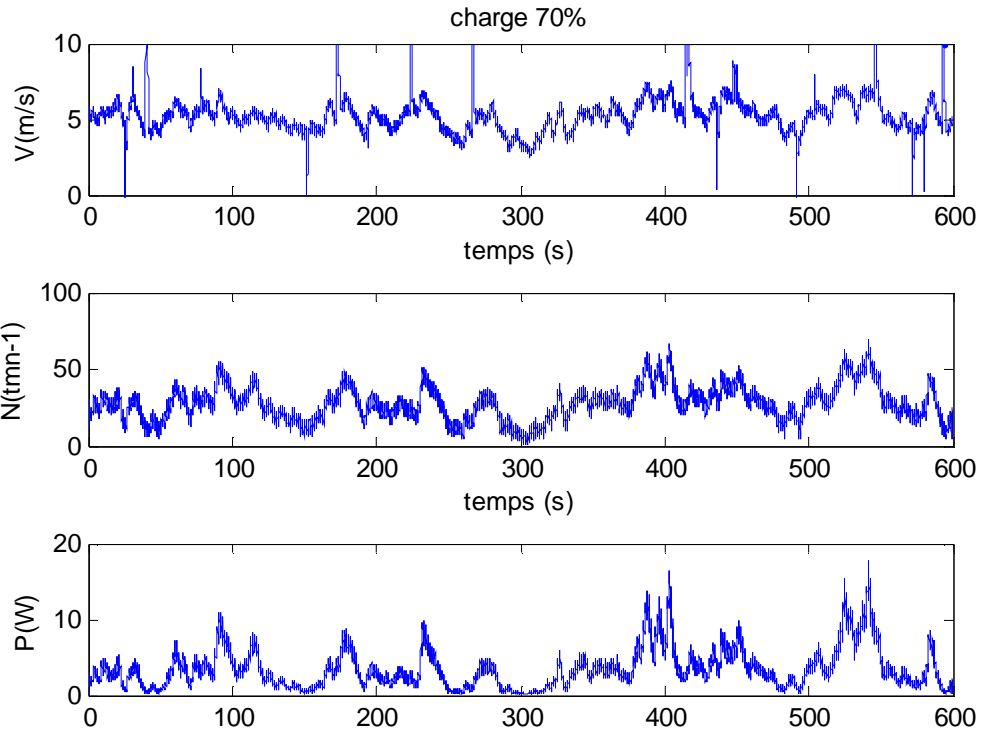




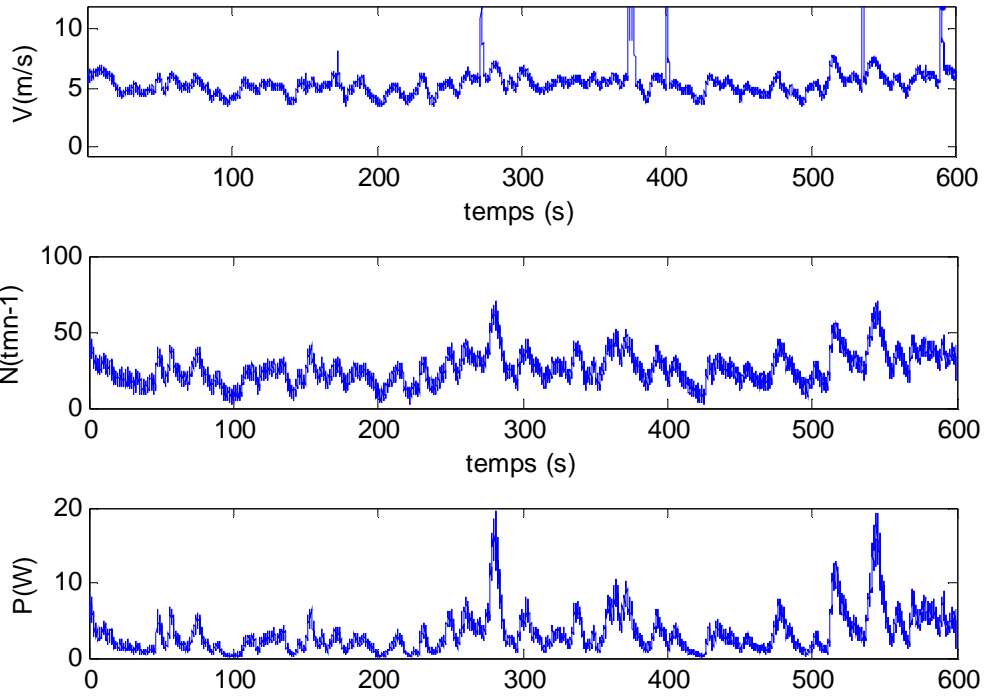




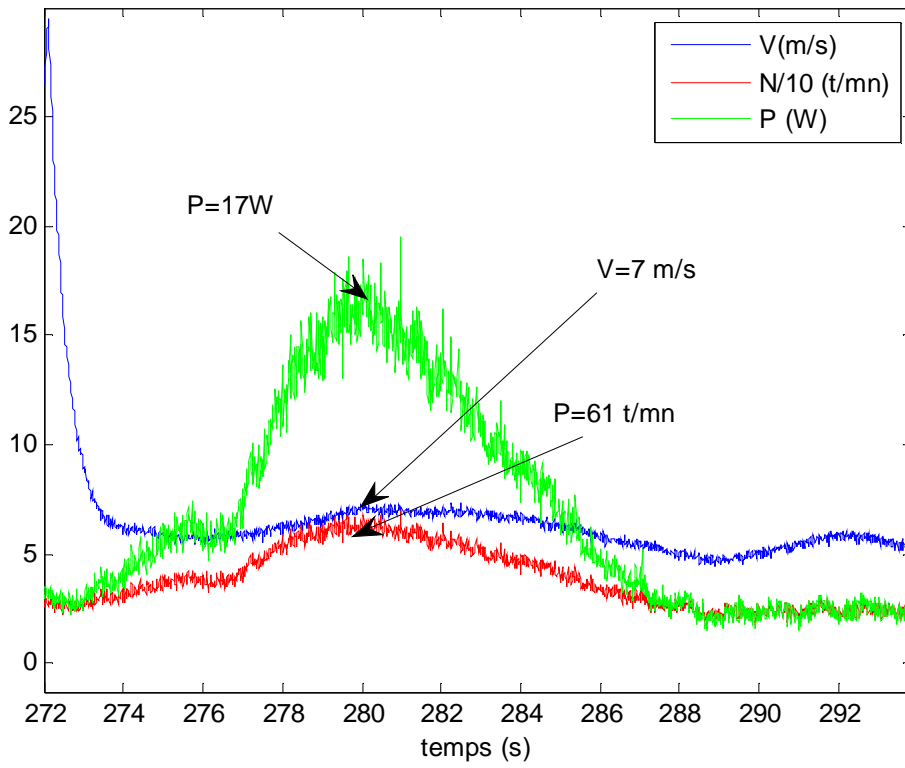




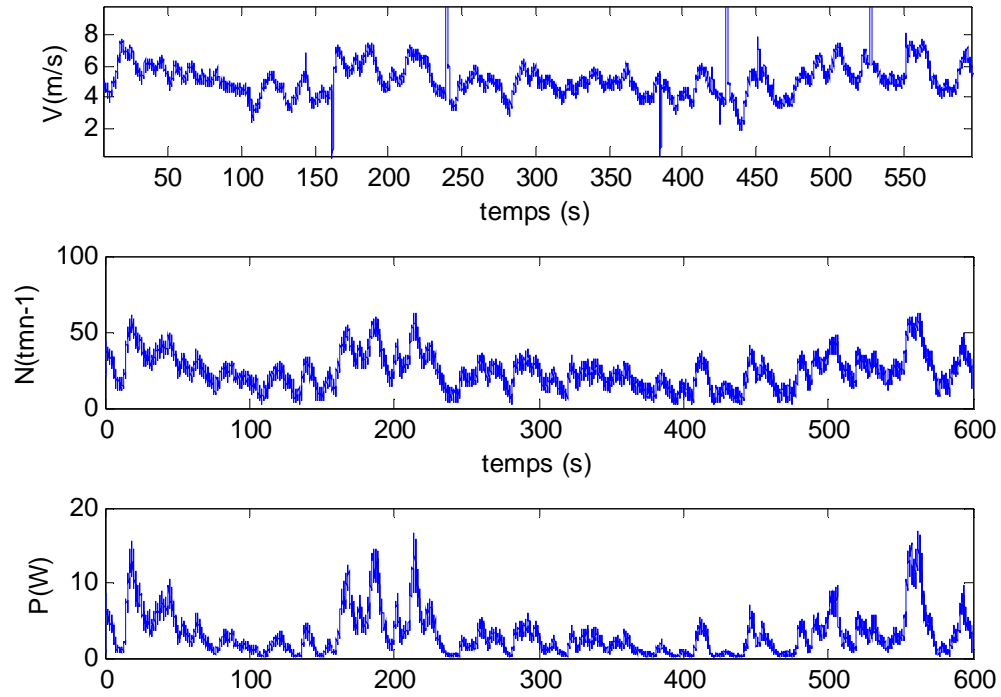
charge 80%



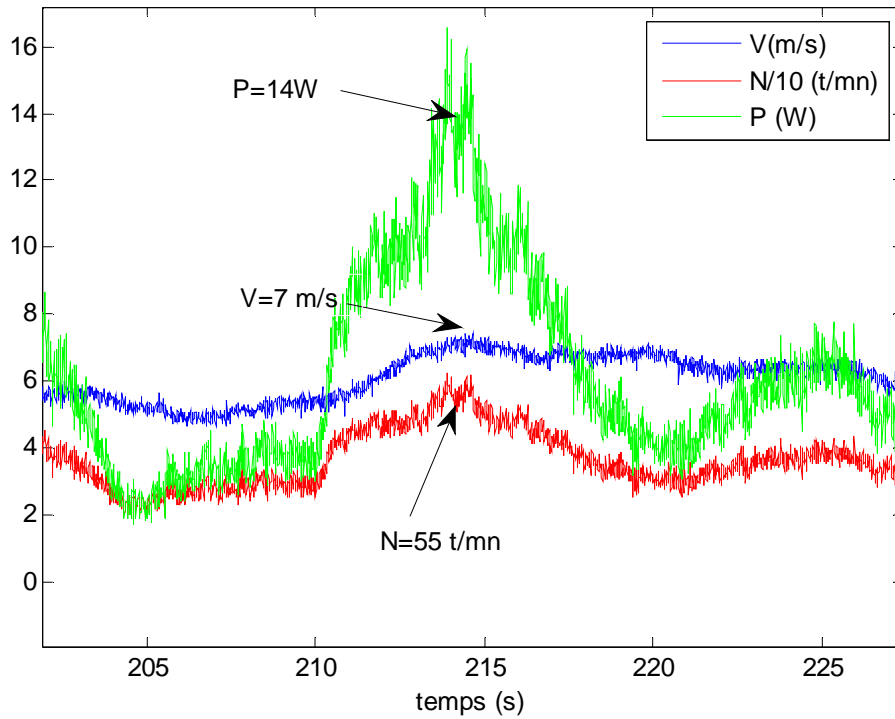
charge 80%



charge 90%



charge 90%

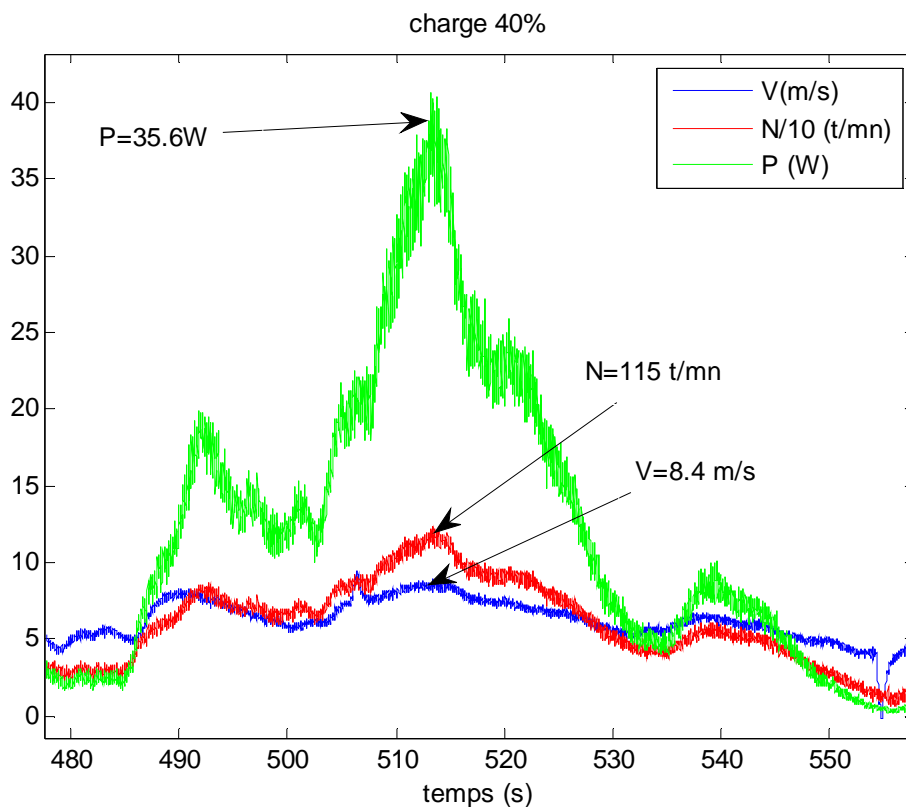


7. Conclusions

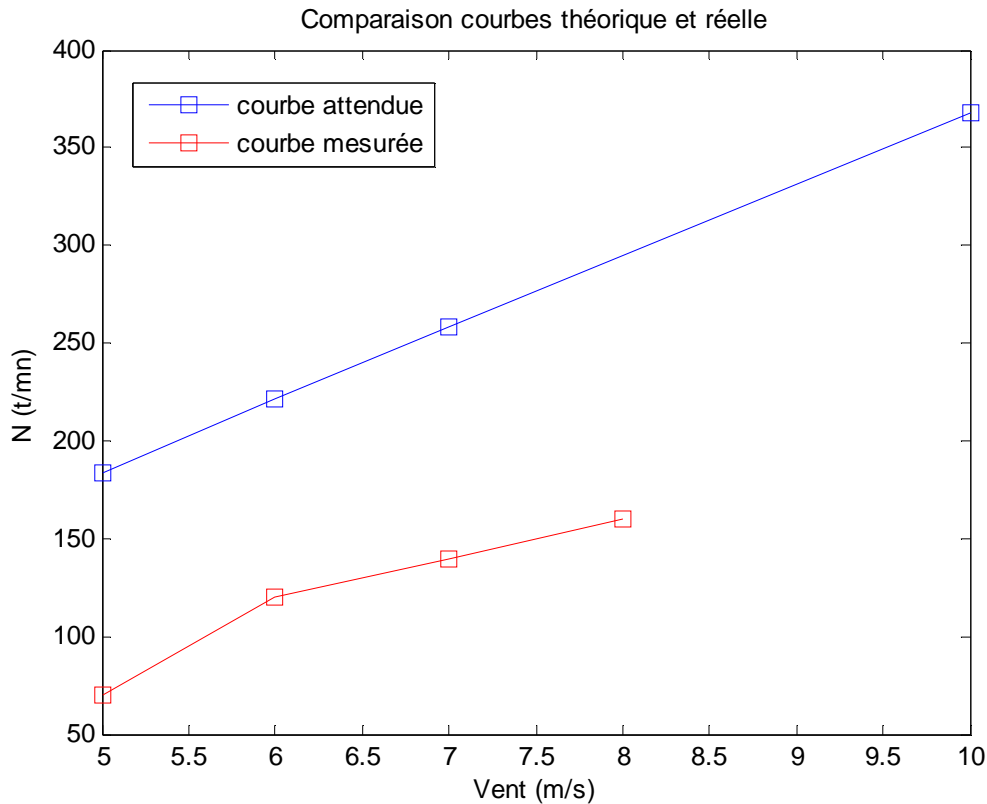
A partir des différents relevés, un certain nombre de conclusions peuvent être tirées.

Les vitesses de vent pendant l'intervalle de mesure s'étalaient de 4m/s à environ 8 m/s. La *puissance électrique* maximale produite sur l'ensemble de la durée des tests est de l'ordre de **36W** pour un pic de vent de l'ordre de **8m/s** et une vitesse de rotation de **115 t/mn** (figure suivante obtenue le 15 avril). Si on reprend le Tableau 2, le rendement pour ce point de fonctionnement est de l'ordre de 80% ce qui donne une puissance mécanique développée par l'éolienne égale à **45W**.

On rappelle que les caractéristiques mécaniques théoriques de l'éolienne pour **7m/s** sont **Pméca=78W** et **N=258 t/mn**.

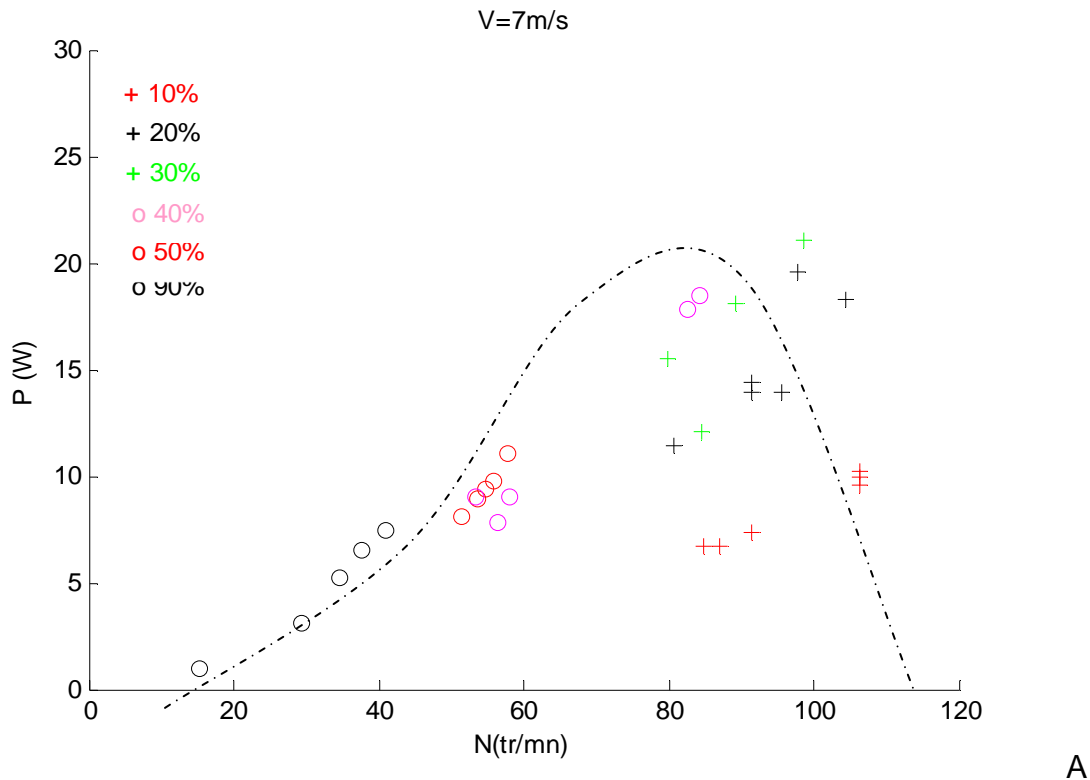


Les essais montrent que l'éolienne tourne moins vite que prévu et par conséquent développe, pour un vent donné, moins de puissance qu'attendu. On a relevé pour les vitesses de vent suivantes 5m/s, 6m/s, 7m/s et 8m/s la vitesse de rotation estimée pour la charge minimum. Pour cette charge, le couple résistant imposé par la génératrice est minimum et l'éolienne peut atteindre sa vitesse maximale. Les courbes sont données sur la figure suivante.



On note que, pour la plupart des points de fonctionnement et bien qu'elle soit pratiquement à vide, l'éolienne tourne environ deux fois moins vite que prévu ce qui justifie la faible puissance obtenue.

On pourrait penser que les charges choisies sont trop élevées et ralentissent la génératrice. On représente sur la figure suivante quelques points de fonctionnement relevés pour la vitesse $V=7\text{m/s}$ et pour différentes charges. On cherche à reconstituer la caractéristique statique de la Figure 1 pour $V=7\text{ m/s}$ bien que cela soit difficile vu le caractère transitoire du procédé de mesure. Toutefois, on voit que si la charge varie de 10% à 90%, la puissance augmente, atteint un maximum aux alentours de $P=20\text{W}$ et $N=70\text{tr/mn}$ et une charge entre 40% et 50% puis diminue pour des charges supérieures. On vérifie expérimentalement que le banc de charge choisi permet de décrire la caractéristique de l'éolienne pour cette vitesse. Si la charge avait été trop élevée, on aurait eu une concentration des points de fonctionnement à gauche de la caractéristique.



A priori, les charges choisies paraissent adaptées à l'application et rien, dans le dispositif expérimental mis en œuvre, ne justifie un tel écart entre la vitesse de rotation théorique et la vitesse de rotation relevée.

8. Choix d'une génératrice

La génératrice utilisée pour les mesures est une machine synchrone à aimant LEROY SOMER LRSPM90SL 1500tr/mn-1/3kW. Bien que cette génératrice soit surdimensionnée pour l'application finale, son rendement élevé a permis d'obtenir des résultats expérimentaux parfaitement exploitables. On pourrait s'attendre à améliorer le rendement global en choisissant une génératrice plus proche des points de fonctionnement de l'éolienne. Toutefois, il n'est pas sûr que le gain en termes de rendement soit significatif car de manière générale le rendement des machines augmente avec leur puissance. De plus, les machines LRSPM possèdent les mêmes caractéristiques mécaniques quelque soit leur puissance (dans une gamme de puissance donnée). Ainsi, une LRSPM 3kW sera identique à une 1,4kW en ce qui concerne ses parties mécaniques et son rotor. Par conséquent il est peu probable d'obtenir une amélioration significative du rendement.

Dans le domaine du petit éolien, on trouve un grand nombre de génératrices discoïdes (figure suivante).



Elles possèdent des propriétés dynamiques intéressantes et semblent adaptées à notre application, toutefois deux points restent à régler :

- 1) Les fabricants de ce type de génératrices sont peu nombreux. Souvent les concepteurs d'éoliennes fabriquent eux-mêmes leur génératrice en achetant les aimants appropriés. On trouve ainsi une multitude de plans de fabrication sur internet. La société ALXION fabrique ce type de génératrice pour éoliennes et dans les puissances qui nous intéressent. Un devis a été demandé.
- 2) Il n'est pas du tout sûr que le rendement de ces génératrices soit supérieur à celui obtenu avec notre génératrice LRSPM. En effet, si on dimensionne la génératrice pour 14m/s ce qui est la règle en général, un fonctionnement à 7m/s va entraîner une diminution significative du rendement. On donne, sur la figure suivante, les caractéristiques d'une génératrice discoïde (société ALXION) dont les caractéristiques sont proches de notre application.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ALTERNATEURS 145 STK

			145STK2M		145STK4M		145STK6M		145STK8M	
Données pour vitesse nominale	Vitesse nominale	tr/min	650	1500	650	1500	650	1500	650	1500
	Puissance nominale (1)(2)	W	571	1683	1285	3250	1937	4163	2539	5550
	Couple d'entrée nécessaire (1)(2)	N.m	11	13	25	24	35	30	46	40
	Rendement à puissance nominale (1)(2)	%	76	81	77	86	81	88	81	88
	Courant à puissance nominale (1)	A	1,4	4,2	3,2	8,1	4,9	10,4	6,4	13,9
Données pour mi-vitesse	Tension à puissance nominale (1)(2)(3)	V	133	133	133	133	133	133	133	133
	Puissance à mi-vitesse (1)(2)	W	204	667	460	1538	769	2296	1016	3007
	Couple d'entrée nécessaire à mi vitesse (1)(2)	N.m	10	11	23	25	33	35	43	46
	Rendement à mi vitesse (1)(2)	%	58	78	58	79	68	83	69	83
	Couple d'encochage (cogging)	N.m	0,2		0,4		0,6		0,8	
Résistance de phase à 20°C	Ohm	20,7	4,55	8,65	1,36	4,17	0,59	3,00	0,42	
Inductance de phase (5)	mH	106,55	23,4	61,99	9,81	34,01	4,9	26,57	3,67	
Tension à vide (Fem) de phase à 20°C (4)	V	210,5	228,6	227,1	206,7	206,3	179,9	209,8	180,0	
Inertie rotorique	10 ⁻³ Kg.m ²	1,28		2,24		3,19		4,14		

La génératrice la plus appropriée est la 145STK2M 650tr/mn / 571W. On note que le rendement au point de fonctionnement nominal est de 76% et qu'il chute à 58% à mi vitesse. Le prix de cette génératrice est 1250 euros pour une pièce et 540 euros HT pour cent pièces.

Par ailleurs, dans le domaine du petit éolien, il existe deux technologies :

- des génératrices synchrones à aimant, de la même famille que la génératrice LRSPM. Elles produisent des tensions alternatives triphasées. Leur utilisation pour la charge d'une batterie nécessiterait une conversion alternatif/continu (pont redresseur et régulation de la tension de sortie),
- des génératrices à courant continu fournissant directement une tension continue. Elles doivent être associées à un convertisseur continu/continu (hacheur) permettant de réguler la tension de sortie.

Le choix de la génératrice est lié à l'application finale (chargement d'une batterie ou alimentation d'une résistance).

9. Conclusions

Les résultats présentés dans ce rapport montrent que la vitesse de rotation de l'éolienne mesurée lors des essais est très inférieure à la vitesse attendue. La conséquence principale étant une chute de la puissance électrique produite. Ces résultats doivent être rapportés aux conditions expérimentales mises en œuvre. Tout d'abord l'équilibrage mécanique n'a pas pu être effectué de manière optimale, les modes de vibrations dépendant de la vitesse de rotation considérée. D'autre part, le positionnement de l'éolienne n'est pas forcément optimal et la présence d'obstacles éventuels autour du site d'implantation a pu influencer sur les performances aérodynamiques de l'ensemble. Ce phénomène est bien connu des spécialistes d'éolien urbain qui préconisent d'installer ces équipements sur les immeubles les plus haut afin de diminuer l'influence des autres constructions. A titre d'illustration, on se rappellera, qu'au mois d'avril, l'éolienne est restée immobile alors que la vitesse de vent était élevée mais que sa direction n'était pas adéquate. Il faudrait peut-être envisager une autre phase d'expérimentations sur un site plus dégagé et vraisemblablement avec un positionnement de l'éolienne en hauteur. Toutefois, ces problèmes de choix de site n'expliquent pas en totalité l'écart observé entre la vitesse attendue et la vitesse estimée. Il serait intéressant de reprendre les calculs théoriques afin de les confronter aux résultats expérimentaux. Enfin, en ce qui concerne le choix de la génératrice, il faut définir précisément l'application finale afin de statuer sur la technologie à adopter (génératrice alternative ou à courant continu) et surtout sur le convertisseur électronique à mettre en œuvre.