

RAPPORT de TP2

Énergie Renouvelable



Figure 1 : Illustration Énergie Renouvelable

Encadrant : Prof. Dr. D. KNITTEL

Table des matières

Introduction.....	3
Contexte & Objectif.....	3
Remerciements.....	3
1 - Éolienne sans régulation, charge en branchement directe.....	3
1.1 Étude statique.....	4
Influence de la vitesse de rotation de l'arbre (via la charge R_o).....	4
Influence de l'angle d'inclinaison des pâles (β).....	5
Influence de la vitesse du vent.....	6
Influence de la charge R_o	7
1.2 Étude dynamique.....	8
Échelon de vitesse du vent ($8 \rightarrow 14$ m/s).....	9
Échelon d'angle de calage β ($0^\circ \rightarrow 15^\circ$).....	9
Échelon de charge R_o ($1 \rightarrow 500 \Omega$).....	10
2 — Avec convertisseur DC/DC : Hacheur Boost + régulation PI.....	12
2.1 Comment ça marche.....	12
2.2 Étude statique.....	13
2.3 Étude dynamique.....	15
Échelon de vitesse du vent ($8 \rightarrow 12$ m/s).....	15
Échelon d'angle β ($0^\circ \rightarrow 15^\circ$).....	16
Échelon de charge R_o ($100 \rightarrow 300 \Omega$).....	17
3 — Exercice 2 : MPPT avec algorithme P&O.....	18
3.1 Principe du P&O.....	18
3.2 Convergence statique du MPPT.....	19
3.3 Robustesse face aux perturbations.....	20
Échelon de vent ($9 \rightarrow 10$ m/s).....	20
Échelon de charge ($200 \rightarrow 100 \Omega$).....	22
Conclusion.....	24
Annexes.....	25
A.1 Code MATLAB du MPPT P&O.....	25
A.2 Script de balayage MATLAB (exemple pour R_o).....	25
A.3 Paramètres principaux du modèle.....	26

Introduction

Contexte & Objectif

Dans ce TP, j'étudie une chaîne de conversion éolienne avec une génératrice à courant continu qui alimente une charge résistive. Le but, c'est de voir comment le système réagit quand je change différents paramètres : la vitesse du vent, l'angle des pâles, la valeur de la charge, et la vitesse de rotation de l'arbre. Je vais regarder à la fois ce qui se passe en régime établi (statique) et pendant les transitoires (dynamique).

L'idée du TP, c'est aussi de comparer trois configurations différentes :

1. D'abord, je branche directement une résistance sur la génératrice (le plus simple)
2. Ensuite, j'ajoute un hacheur Boost avec une régulation de tension (cas b)
3. Enfin, je remplace la régulation par un algorithme MPPT pour aller chercher automatiquement le maximum de puissance (exercice 2)

Remerciements

Je tiens à remercier la Faculté de physique et ingénierie de l'Université de Strasbourg pour le matériel mis à disposition, ainsi que le Professeur Dominique Knittel pour son encadrement et ses explications tout au long du TP.

1 - Éolienne sans régulation, charge en branchement directe

Dans cette première partie, je branche directement la résistance R_o aux bornes de la génératrice à courant continu, sans aucun convertisseur entre les deux. C'est le montage le plus simple possible, mais on va voir qu'il a aussi pas mal de limites.

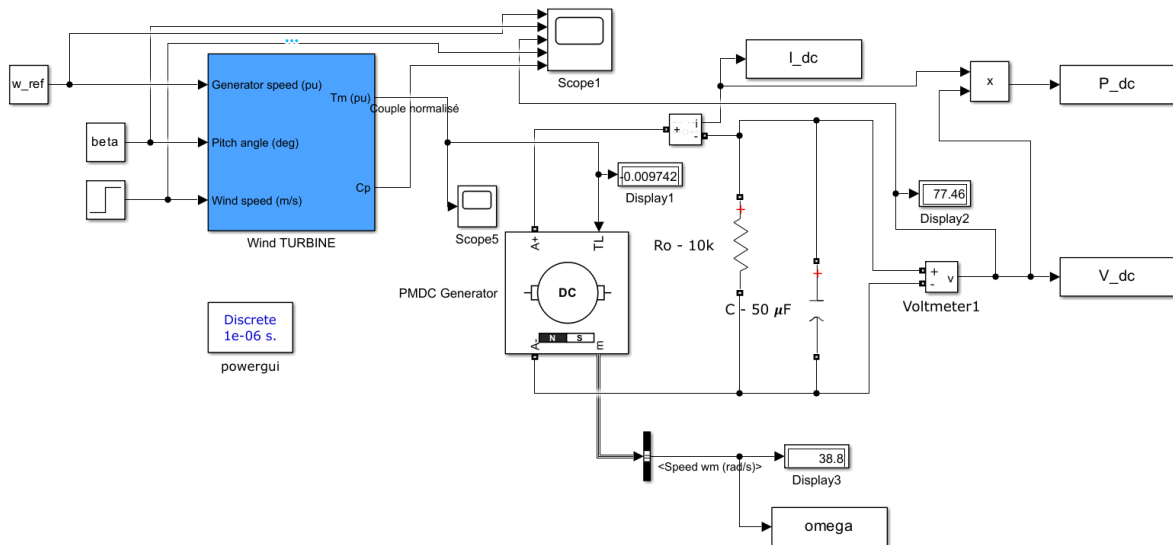


Figure 2 : Schéma Simulink du modèle sans régulation

Légende : Modèle d'éolienne avec branchement direct de la résistance R_o sur la génératrice PMDC.

1.1 Étude statique

Pour la partie statique, je fais varier un paramètre à la fois et je relève les valeurs en régime établi. J'ai écrit un script MATLAB qui balaye automatiquement les valeurs et qui trace les courbes.

Influence de la vitesse de rotation de l'arbre (via la charge Ro)

La vitesse de rotation Ω n'est pas une entrée directe du système, c'est plutôt une sortie qui dépend de l'équilibre entre le couple aérodynamique et le couple résistant. Du coup, pour faire varier Ω , je fais en réalité varier la résistance R_o car plus R_o est petite, plus la génératrice est chargée, et plus elle tourne lentement.

J'ai fait un balayage de Ro entre 0.1Ω et $10 \text{ k}\Omega$, à $V_{\text{vent}} = 15 \text{ m/s}$ et $\beta = 0^\circ$.

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R_{\text{pale}}}{V_{\text{vent}}}$$

(où $R_{\text{pale}} = 2 \text{ m}$), je peux aussi tracer le coefficient de puissance C_p en fonction de λ ci-après en figure .

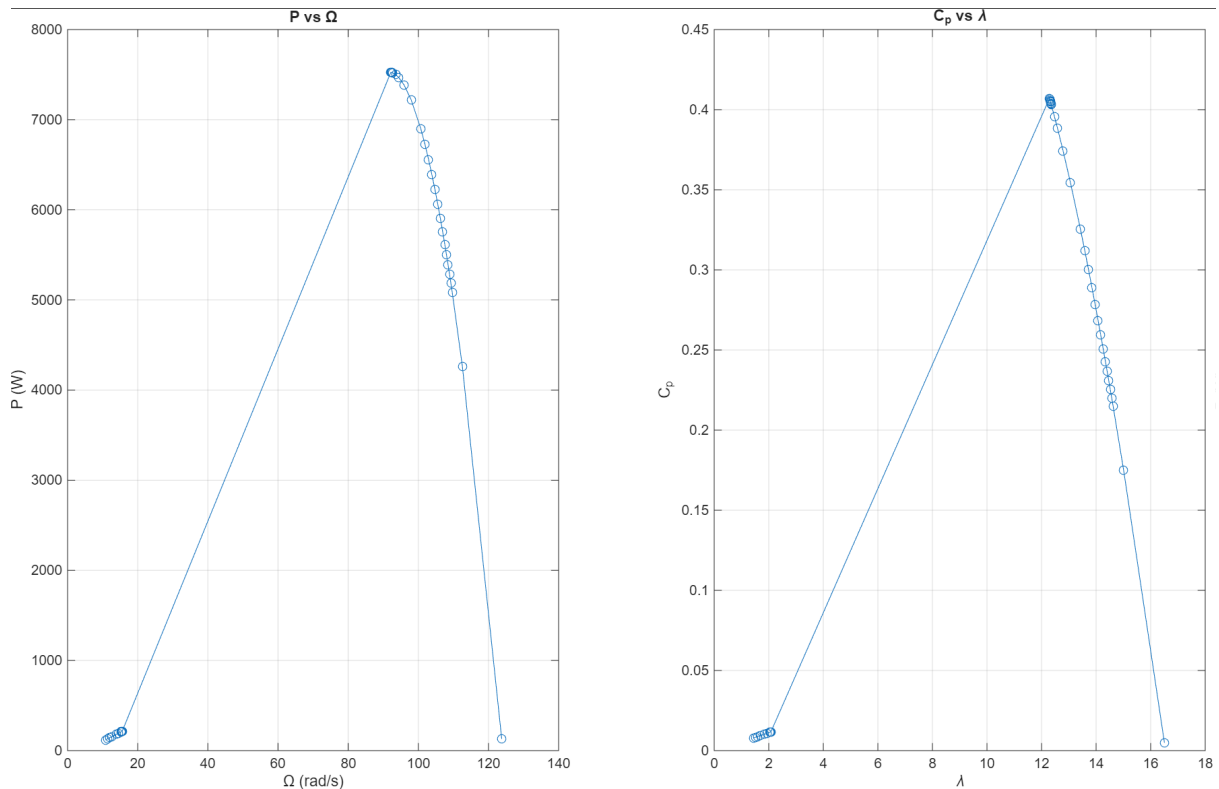


Figure 3 : Influence de la vitesse de rotation de l'arbre sur la puissance — courbes P vs Ω et C_p vs λ

Légende : À gauche on a la puissance dans la charge en fonction de la vitesse de rotation. Et à droite le coefficient de puissance C_p en fonction du tip-speed ratio λ . Le pic de C_p à ~ 0.40 pour $\lambda \approx 12$ correspond au MPP (Point de puissance maximale).

Ce que j'observe ici :

Sur la courbe P vs Ω , je vois clairement un pic autour de $\Omega \approx 92 \text{ rad/s}$, avec $P_{\text{max}} \approx 7500 \text{ W}$. C'est le **point de puissance maximale (MPP)** de la turbine. À ce point, j'ai mesuré $R_o = 1.75 \Omega \rightarrow \Omega = 92.18 \text{ rad/s} \rightarrow C_p = 0.4071 \rightarrow P = 7526.86 \text{ W}$.

Sur la courbe C_p vs λ , je retrouve la fameuse "cloche" caractéristique d'une éolienne. Le pic est à $C_{p_{\text{max}}} \approx 0.40$ pour $\lambda_{\text{opt}} \approx 12$. Au-delà de ce λ , la turbine s'emballe et le rendement aérodynamique chute.

Ce que je trouve un peu bizarre, c'est que la zone à gauche du pic est presque vide de points. C'est normal en fait car cette zone correspond à des R_o très petits, et le système n'arrive pas à trouver un point d'équilibre stable là-bas. C'est physique parce qu'à gauche du pic, n'importe quelle petite perturbation fait soit accélérer soit caler la turbine. Du coup, **avec une charge résistive directe, on ne peut tout simplement pas exploiter cette zone.**

Influence de l'angle d'inclinaison des pâles (β)

J'ai ensuite fait varier β de 0° à 30° , en gardant $R_o = 50 \Omega$ et $V_{\text{vent}} = 15 \text{ m/s}$ constants ci-dessous en figure 4.

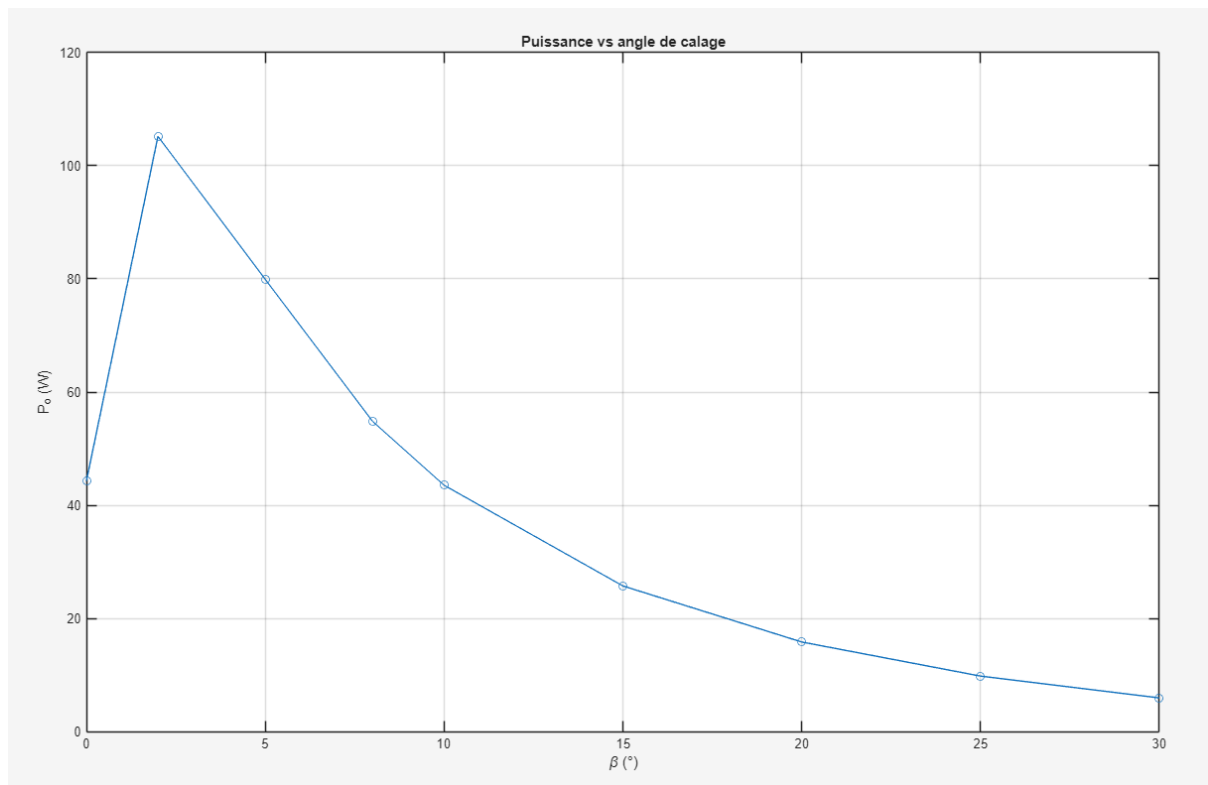


Figure 4 : Influence de l'angle de calage β sur la puissance

Ce que j'observe :

Le maximum n'est pas exactement à $\beta = 0^\circ$ comme je m'y attendais, mais autour de $\beta \approx 2^\circ$ ($P_{\text{max}} \approx 105 \text{ W}$). C'est un peu surprenant au premier abord, mais en y réfléchissant je pense que c'est lié à deux choses :

1. La fonction $C_p(\lambda, \beta)$ du bloc Simulink a une petite particularité numérique près de $\beta = 0$ (il y a un terme en $1/(\beta^3+1)$ qui fait un saut brutal entre $\beta = 0$ et $\beta = 2^\circ$).
2. Comme je balaye β à R_o fixe, le point de fonctionnement (λ, Ω) se déplace en même temps. Donc je ne lis pas une vraie "coupe à λ constant", mais plutôt une trajectoire sur la surface $C_p(\lambda, \beta)$.

Au-delà de $\beta = 2^\circ$, P chute fortement et tend vers 0 quand $\beta = 30^\circ$. **C'est exactement le principe du pitch control** utilisé sur les vraies éoliennes, car quand le vent est trop fort, on incline les pâles pour décrocher aérodynamiquement et limiter la puissance captée (sinon la machine se détruirait).

Influence de la vitesse du vent

J'ai fait varier V_{vent} de 4 à 20 m/s, à $Ro = 50 \Omega$ et $\beta = 0^\circ$.

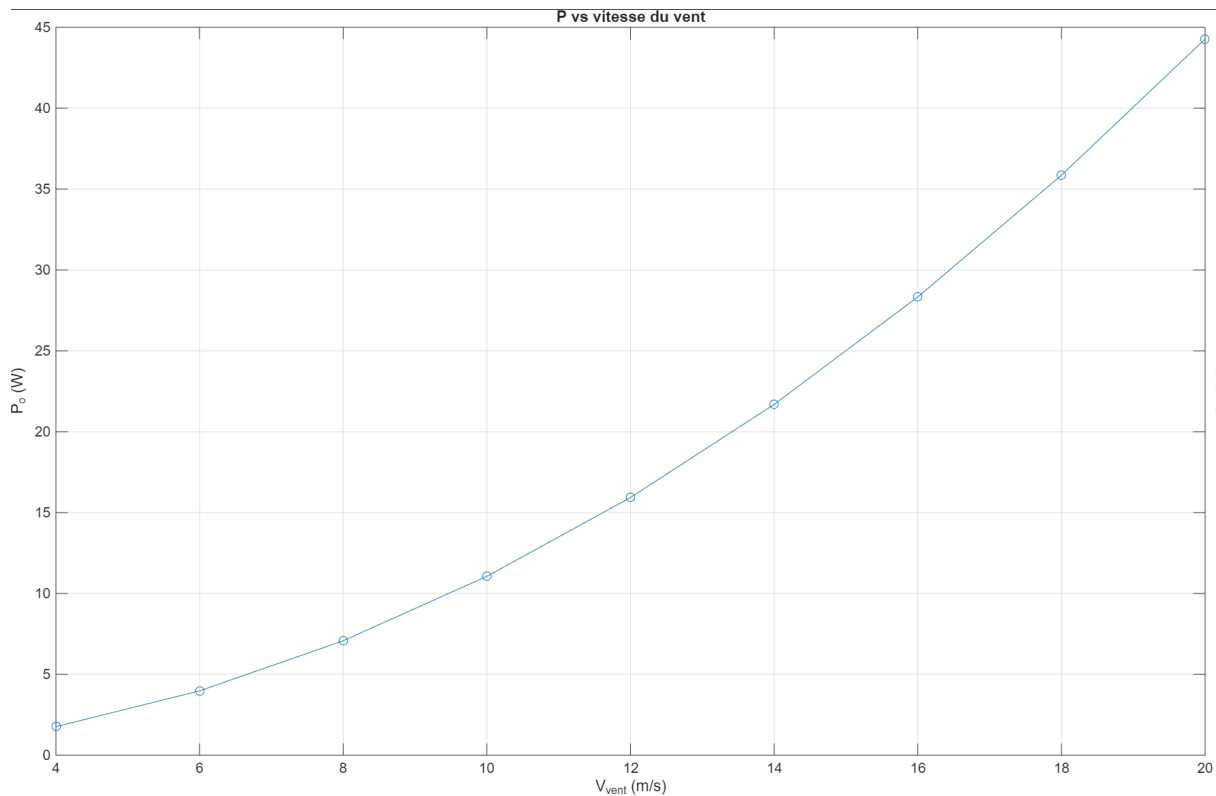


Figure 5 : Influence de la vitesse du vent sur la puissance

Ce que j'observe :

La courbe est nettement croissante, presque cubique. Ça colle bien avec la théorie : la puissance aérodynamique disponible dans le vent est proportionnelle à V^3 . À $V = 20$ m/s je relève $P \approx 44$ W, contre seulement $P \approx 2$ W à $V = 4$ m/s. La puissance varie donc d'un facteur 20+ pour un facteur 5 sur la vitesse, ce qui est cohérent avec une loi en V^3 ($5^3 = 125$, mais on n'est pas à C_{p_max} ici donc c'est moins violent).

Influence de la charge R_o

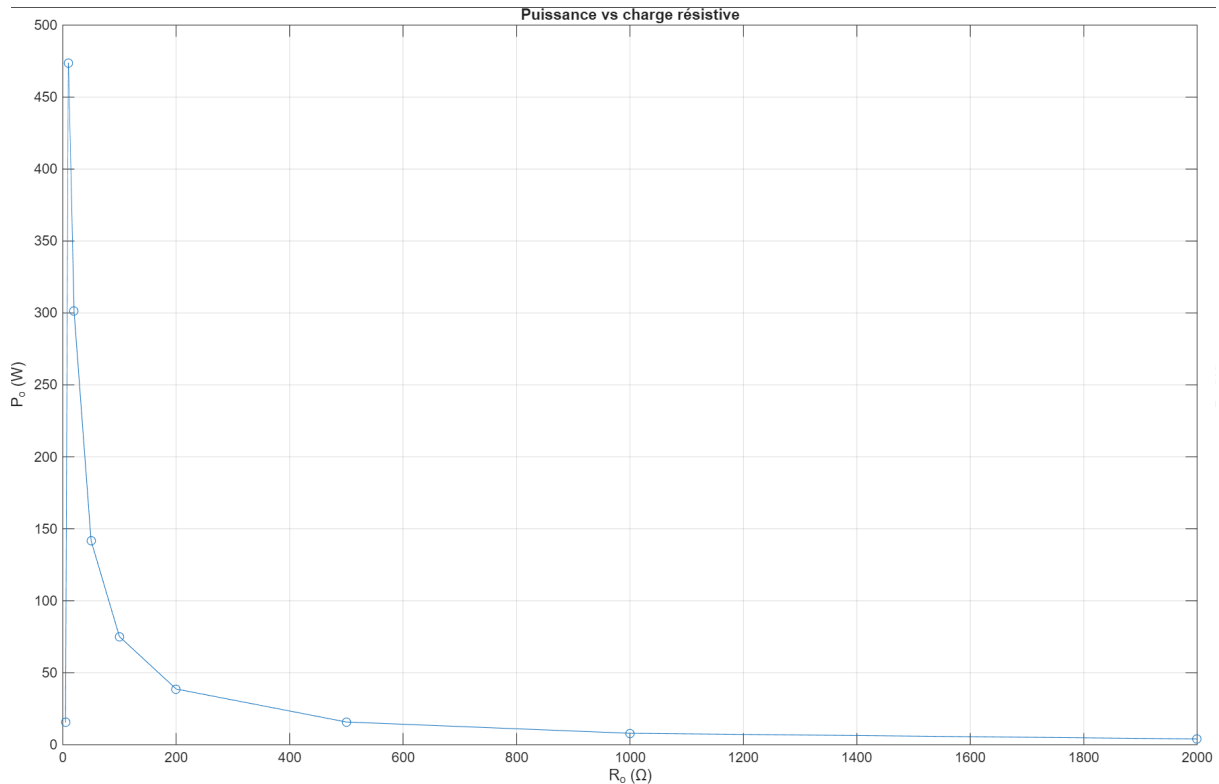


Figure 6 : Influence de la charge R_o sur la puissance

Ce que j'observe :

La courbe a un pic très marqué pour $R_o \approx 5 \Omega$ ($P \approx 475 \text{ W}$). Quand R_o augmente, la puissance dissipée chute rapidement vers 0 (le système se vide à vide).

Quand R_o est très petit, on tend aussi vers 0 (court-circuit).

Conclusion partie statique cas a :

Avec une charge résistive directe, je ne peux pas vraiment choisir le point de fonctionnement. C'est la valeur de R_o qui l'impose, et il se situe quasi systématiquement à droite du pic de C_p (zone stable). Pour vraiment travailler au MPP, il faudrait pouvoir découpler électriquement la charge de la génératrice

C'est exactement ce que fait un convertisseur DC/DC (hacheur), surtout s'il est combiné avec une commande MPPT (P&O, IncCond, etc.) qui ajuste dynamiquement le rapport cyclique pour rester au sommet de la courbe $C_p(\lambda)$.

1.2 Étude dynamique

Pour la partie dynamique, je ne fais plus de balayage : je lance une seule simulation pendant 5 secondes, avec un **échelon** à $t = 2$ s sur le paramètre que je veux étudier, et je trace les sorties en fonction du temps.

Échelon de vitesse du vent (8 → 14 m/s)

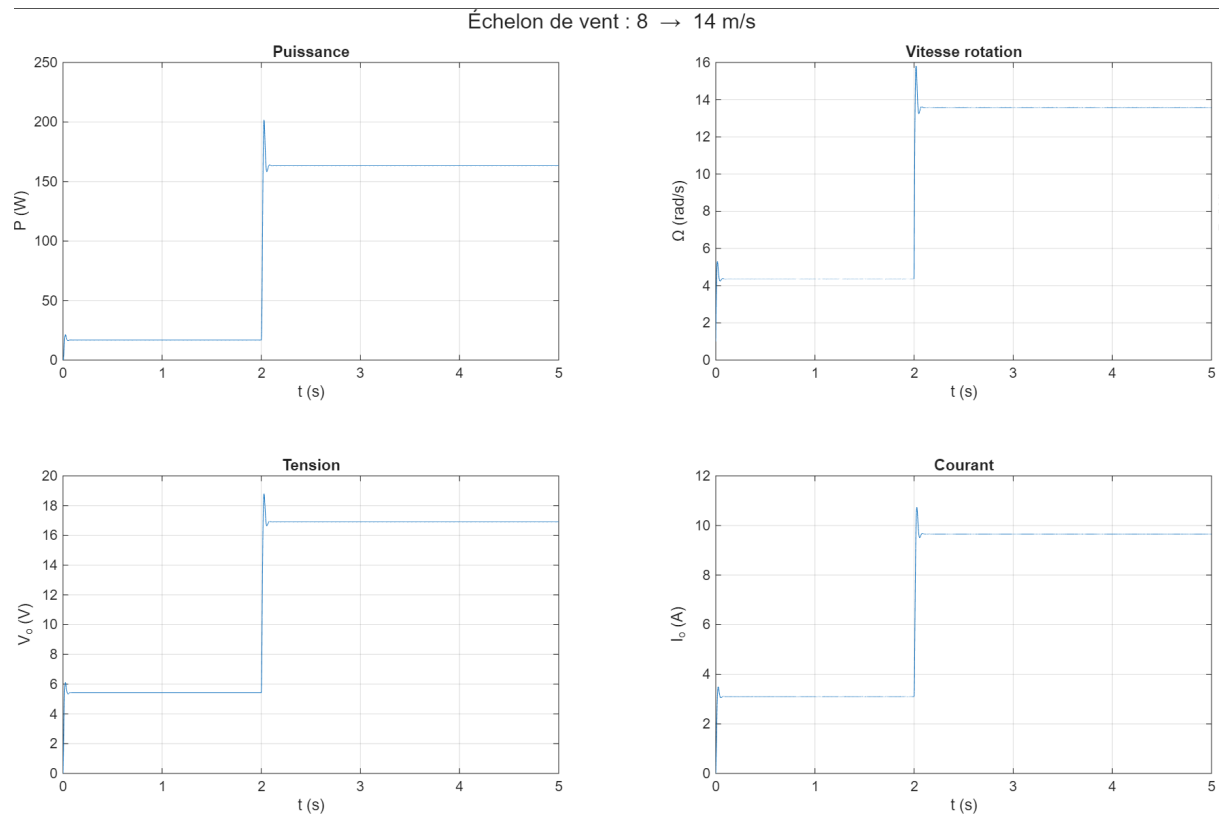


Figure 7 : Influence d'un échelon de vent 8→14 m/s

Ce que j'observe :

Avant l'échelon ($V = 8$ m/s) : $\Omega \approx 4.3$ rad/s, $V_o \approx 5.5$ V, $I_o \approx 3$ A, $P \approx 17$ W. Après l'échelon ($V = 14$ m/s) : $\Omega \approx 13.5$ rad/s, $V_o \approx 17$ V, $I_o \approx 9.6$ A, $P \approx 163$ W.

Le système réagit très vite (temps de réponse ~ 0.1 s) avec un petit dépassement sur Ω vers 16 rad/s. La puissance est multipliée par ~ 10 alors que la vitesse du vent n'a été multipliée que par 1.75 — c'est cohérent parce qu'en plus de l'effet V^3 , le point de fonctionnement glisse aussi sur la courbe $C_p(\lambda)$.

Le point important : V_o augmente librement avec V_{vent} . Il n'y a aucune régulation, donc la tension de sortie suit complètement ce qui se passe dans le vent.

Échelon d'angle de calage β ($0^\circ \rightarrow 15^\circ$)

Pour cet essai, je suis parti du MPP ($R_o = 1.75 \Omega$, $V = 15 \text{ m/s}$, $\beta = 0^\circ$, $P \approx 7.5 \text{ kW}$).

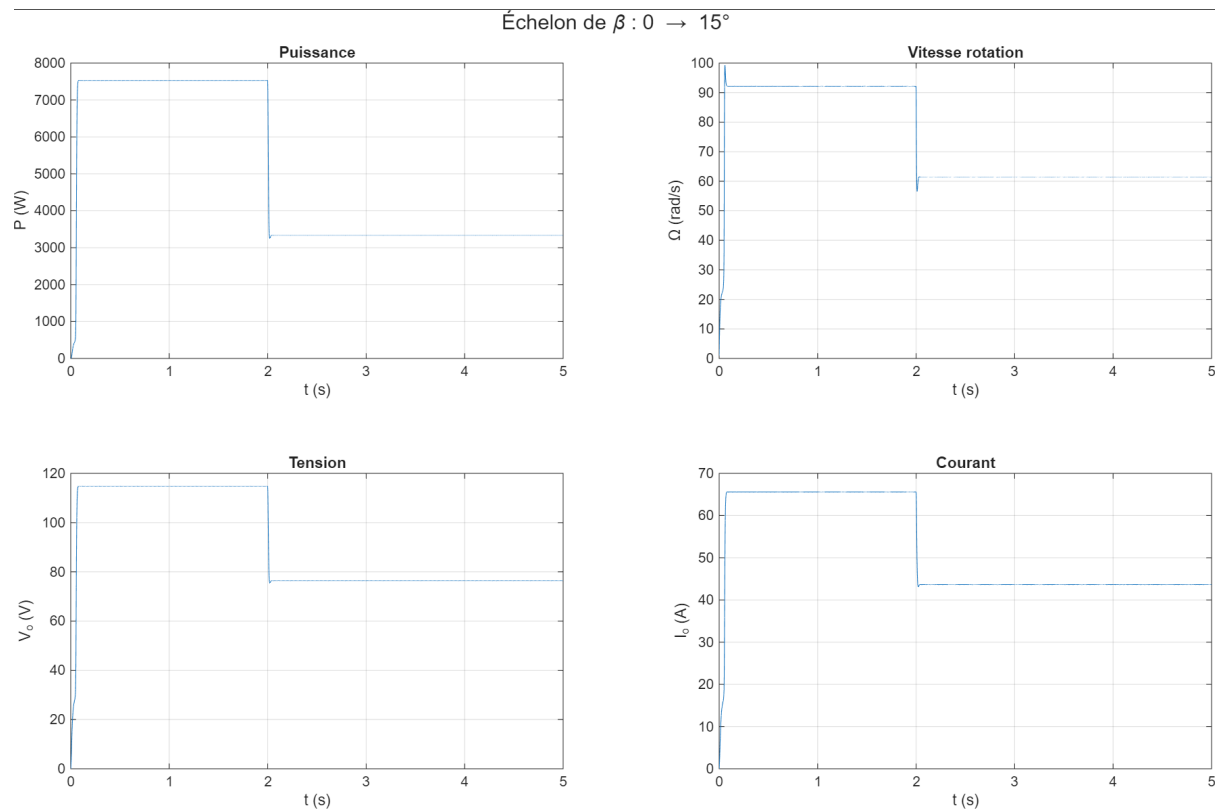


Figure 8 : Influence d'un échelon d'angle de calage β $0 \rightarrow 15^\circ$

Ce que j'observe :

Quand β passe de 0° à 15° , **C_p chute immédiatement** parce que les pâles décrochent. Ça entraîne :

- Une décélération du rotor : Ω passe de 92 à 61 rad/s
- Une chute de V_o : $115 \text{ V} \rightarrow 76 \text{ V}$
- Une chute de I_o : $66 \text{ A} \rightarrow 44 \text{ A}$
- Et au final P chute de 7500 W à 3300 W, soit une **diminution de 56 %**.

Cette manipulation valide bien le rôle du pitch control comme mécanisme de protection. Sur une vraie éolienne, par vent fort, on augmente β pour "déverser" l'excès de puissance aérodynamique et garder le système dans ses limites mécaniques/électriques.

Échelon de charge R_o ($1 \rightarrow 500 \Omega$)

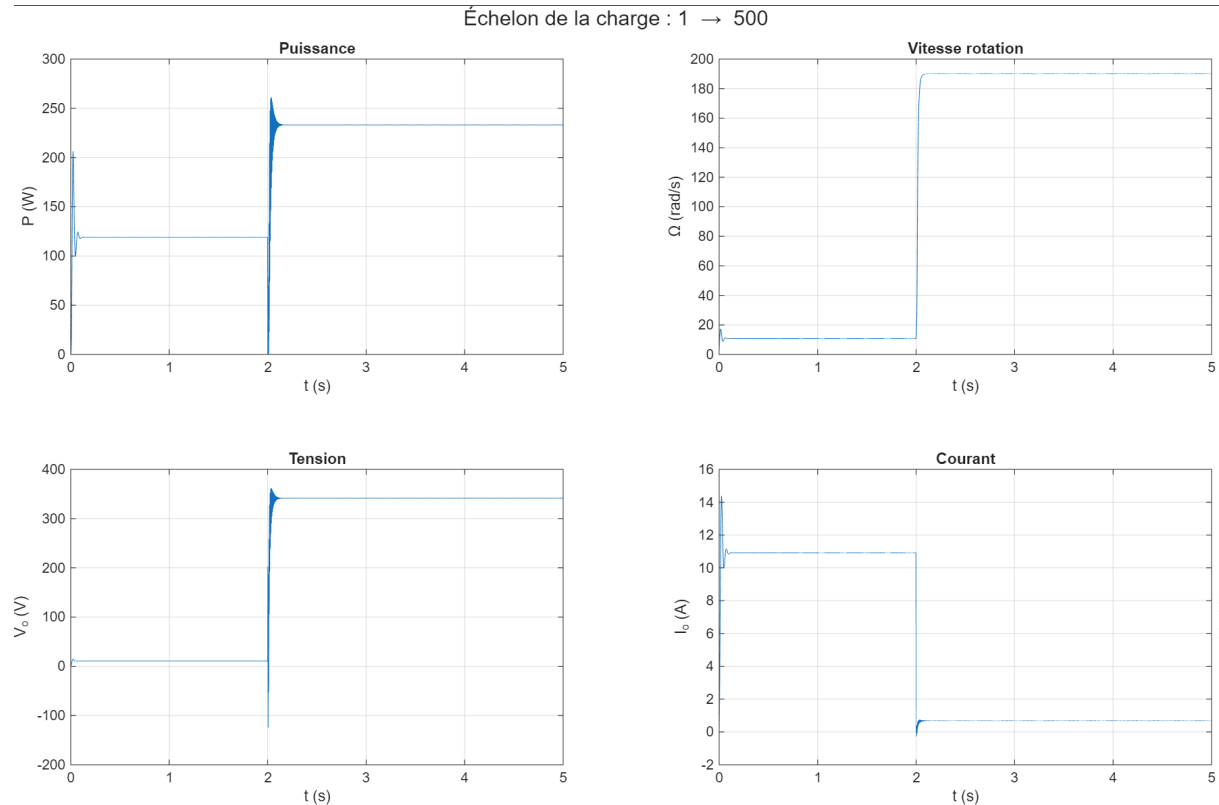


Figure 9 : Influence d'un échelon de charge R_o $1 \rightarrow 500 \Omega$

Ce que j'observe :

À $t = 2$ s, je passe brutalement de $R_o = 1 \Omega$ à $R_o = 500 \Omega$. Le système réagit fortement :

- Ω bondit de 11 à 190 rad/s (la turbine s'emballe parce qu'elle est presque à vide)
- V_o monte de 11 V à 340 V (facteur $\times 31$ carrément!)
- I_o chute de 11 A à 0.7 A
- P passe de 120 W à 235 W

Je vois aussi un **pic transitoire négatif** sur V_o (-125 V) au moment de l'échelon. C'est la décharge brutale du condensateur de $50 \mu F$ quand la charge change. Le système met environ 0.3 s à se stabiliser sur le nouveau point.

Ce qui est intéressant pour moi, c'est de voir à quel point V_o varie librement quand on change R_o . Ce n'est clairement pas acceptable si on veut alimenter une vraie charge sensible à la tension : il faut absolument une régulation.

2 — Avec convertisseur DC/DC : Hacheur Boost + régulation PI

Dans cette partie, j'ajoute un hacheur Boost entre la génératrice et la charge, avec une régulation PI sur la tension de sortie V_o , ci-dessous en figure 10.

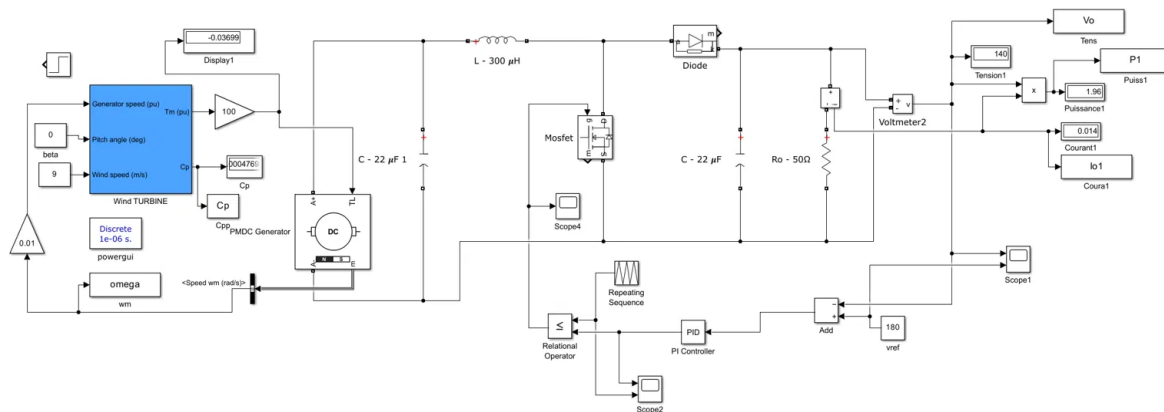


Figure 10 : Schéma Simulink avec hacheur Boost et régulation

2.1 Comment ça marche

Un hacheur Boost, c'est un convertisseur qui **élève** la tension. En régime établi, on a :

$$V_o = \frac{V_{\text{PMDC}}}{1 - \alpha}$$

où α est le rapport cyclique (entre 0 et 1). Plus α est grand, plus la tension de sortie est élevée. Donc avec ce convertisseur, je peux fixer V_o à n'importe quelle valeur supérieure à V_{PMDC} en jouant sur α .

Le PWM est généré par comparaison entre une porteuse triangulaire à 10 kHz (bloc Repeating Sequence) et le signal α (sortie du PI). La sortie du comparateur pilote la gate du MOSFET.

Le PI prend en entrée l'erreur ($V_{\text{ref}} - V_o$) et sort α . Au début, j'ai eu pas mal de soucis avec ce PI : trop agressif, ça oscillait sans fin. J'ai dû baisser les gains à **P = 0.0001 et I = 0.05** pour avoir quelque chose de stable, et j'ai aussi ajouté une saturation [0.01 ; 0.99] sur α pour éviter qu'il parte dans des valeurs aberrantes.

J'ai aussi dû changer le solveur en **Fixed-step ode4 avec un pas de 1 µs**, sinon le système oscillait à cause du switching à 10 kHz.

2.2 Étude statique

Pour cette partie, je règle $V_{\text{vent}} = 10 \text{ m/s}$, $\beta = 0^\circ$, $V_{\text{ref}} = 140 \text{ V}$, et je balaye R_o entre 10Ω et $10 \text{ k}\Omega$.

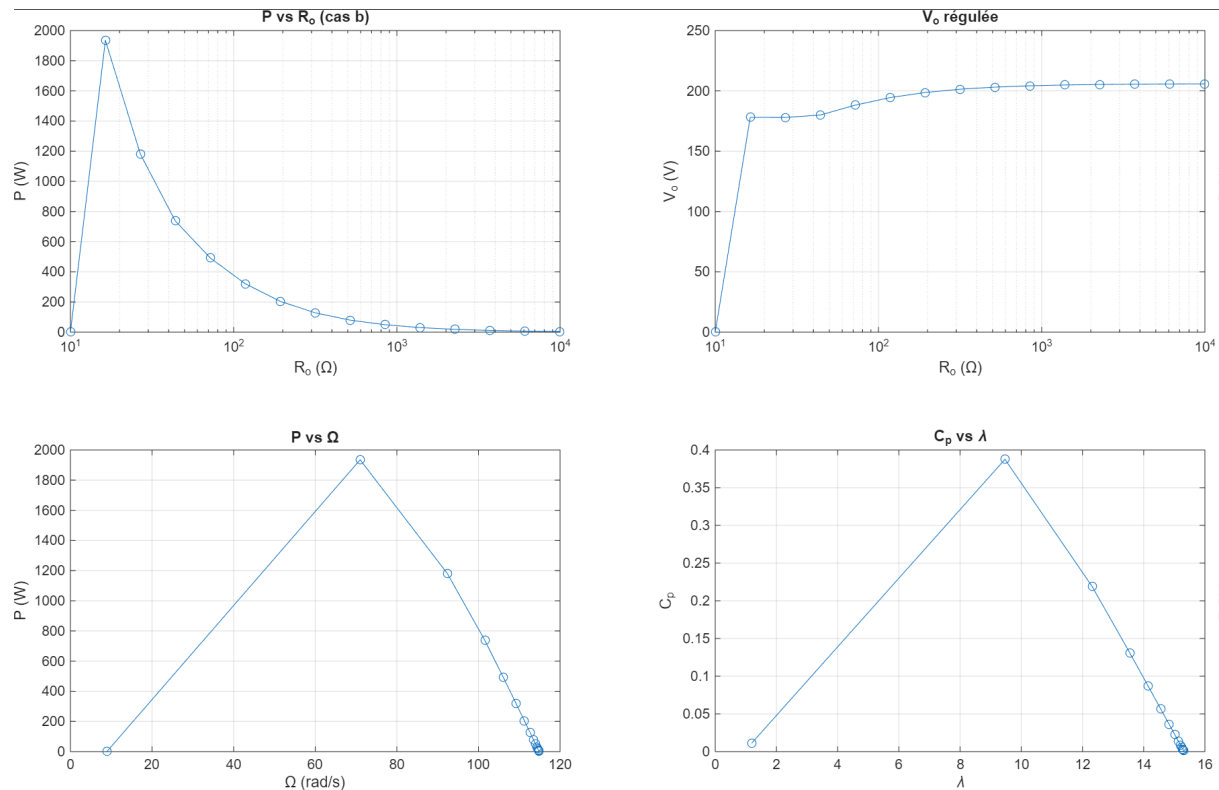


Figure 11 : Caractéristiques statiques de la puissance vs R_o avec hacheur et régulation

Ce que j'observe :

Le résultat le plus important : **V_o reste à 140 V quasi-constant sur 3 décades de R_o** (de 10Ω à $10 \text{ k}\Omega$). C'est exactement ce qu'on attendait du Boost régulé. La régulation **découple effectivement la tension de sortie de la charge**.

Le seul point qui décroche, c'est $R_o = 10 \Omega$, parce que la puissance demandée ($140^2/10 = 1960 \text{ W}$) dépasse ce que la turbine peut fournir à $V = 10 \text{ m/s}$. Du coup la régulation sature.

Sur la courbe P vs R_o , j'ai un pic à $P_{\text{max}} \approx 1200 \text{ W}$ pour $R_o \approx 18 \Omega$.

Sur la courbe C_p vs λ , je retrouve la cloche, mais avec un $C_{p_{\text{max}}} \approx 0.225$ seulement. C'est nettement moins que les 0.40 que j'avais en cas a ! Ça vient du fait que **mon choix de $V_{\text{ref}} = 140 \text{ V}$ n'est pas optimal énergétiquement** : il ne correspond pas au MPP. Pour s'approcher du MPP, il faudrait que V_{ref} ait une valeur précise (qui dépend de V_{vent} et de R_o), donc en pratique il faut un MPPT.

Aspect	Cas a (R directe)	Cas b (Boost+régul)
Vo selon Ro	Vo varie fortement	Vo = 140 V constant
Cp_max atteint	0.40 (à V=15)	0.225 (à V=10)
P_max	7500 W (à V=15)	1200 W (à V=10)
Contrôle Vo	aucun	total

Tableau 1 : Comparatif statique Cas a vs Cas b

En résumé : la régulation fonctionne bien pour fixer Vo, mais elle ne garantit pas qu'on soit au MPP. Pour atteindre le MPP, il faut bien choisir Vref, et ce choix dépend des conditions extérieures.

J'ai aussi essayé avec **Vref = 200 V** (un meilleur choix), et là j'ai obtenu Cp_max ≈ 0.39 pour Ro ≈ 18 Ω. Mais ça ne marche que pour cette valeur précise de Ro et de V_vent : dès que ça change, on sort du MPP.

2.3 Étude dynamique

Je garde le hacheur et la régulation, et je teste les mêmes trois échelons que pour le cas a.

Échelon de vitesse du vent (8 → 12 m/s)

J'ai fait un premier essai avec $V_{ref} = 180 \text{ V}$, mais la régulation saturait dès que V_{vent} dépassait une certaine valeur (le Boost ne peut pas baisser V_o en dessous de V_{PMDC}). Du coup j'ai relancé avec **$V_{ref} = 280 \text{ V}$ et $R_o = 100 \Omega$** pour avoir une régulation bien active.

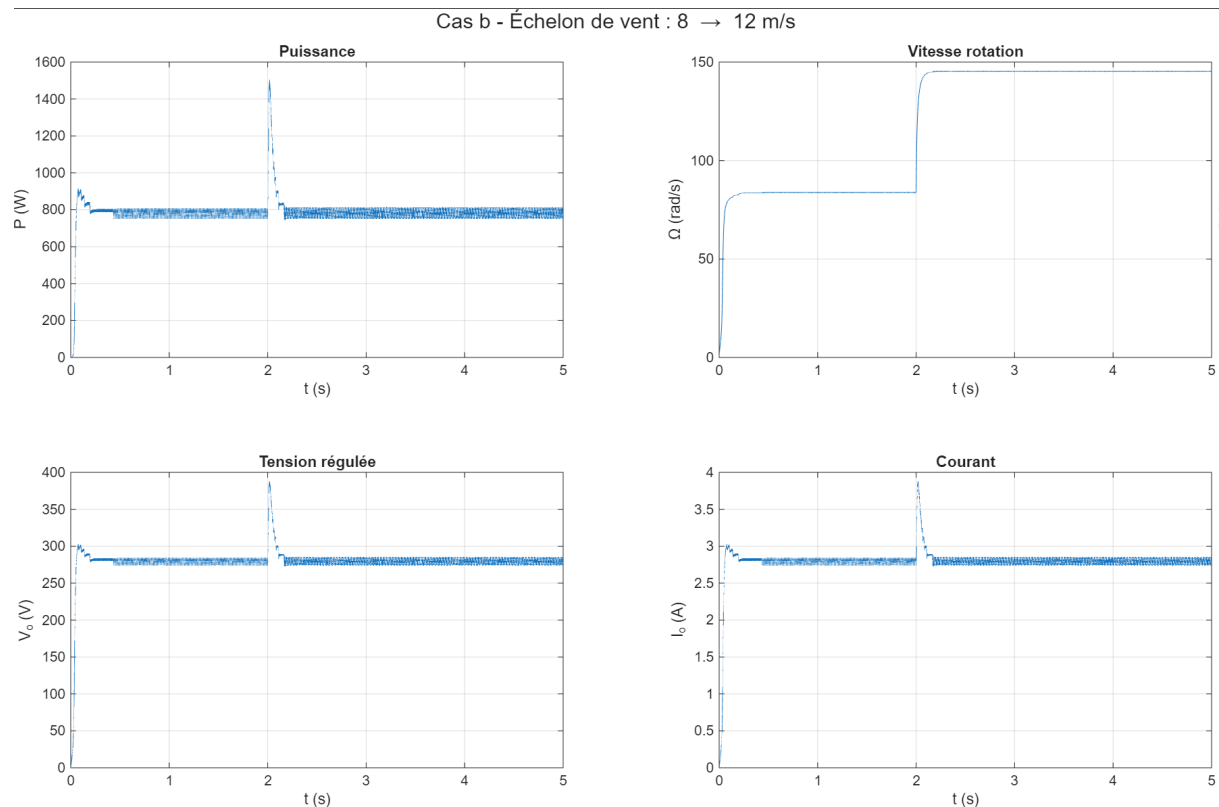


Figure 12 : Caractéristiques dynamiques de P , Ω , V_o , I_o en fonction du temps - échelon vitesse du vent

Ce que j'observe :

- Avant l'échelon ($V = 8 \text{ m/s}$) : V_o stable à $280 \text{ V} = V_{ref}$ ✓
- À $t = 2 \text{ s}$: overshoot transitoire à 380 V ($\sim 36 \%$), puis retour rapide à 280 V
- Après l'échelon ($V = 12 \text{ m/s}$) : V_o retrouve 280 V ✓
- Temps de réponse : $\sim 0.2 \text{ s}$

Le résultat est super parlant : contrairement au cas a où V_o augmentait définitivement avec V_{vent} , ici **V_o revient toujours à sa consigne** quelle que soit la perturbation. C'est tout l'intérêt de la régulation.

Remarque sur la limite du Boost : lors d'un essai préliminaire avec $V_{ref} = 180$ V, j'ai bien vu qu'un Boost ne peut **jamais** abaisser la tension. Si à $V = 12$ m/s, V_{PMDC} dépasse V_{ref} , alors α sature à 0.01 (sa borne min) et la régulation décroche. C'est pour ça qu'en pratique sur les vraies éoliennes on utilise plutôt un **Buck-Boost** (qui peut faire les deux), ou alors un onduleur connecté au réseau qui régule côté DC bus (cf cours de M. F. SCHWARTZ)

Échelon d'angle β ($0^\circ \rightarrow 15^\circ$)

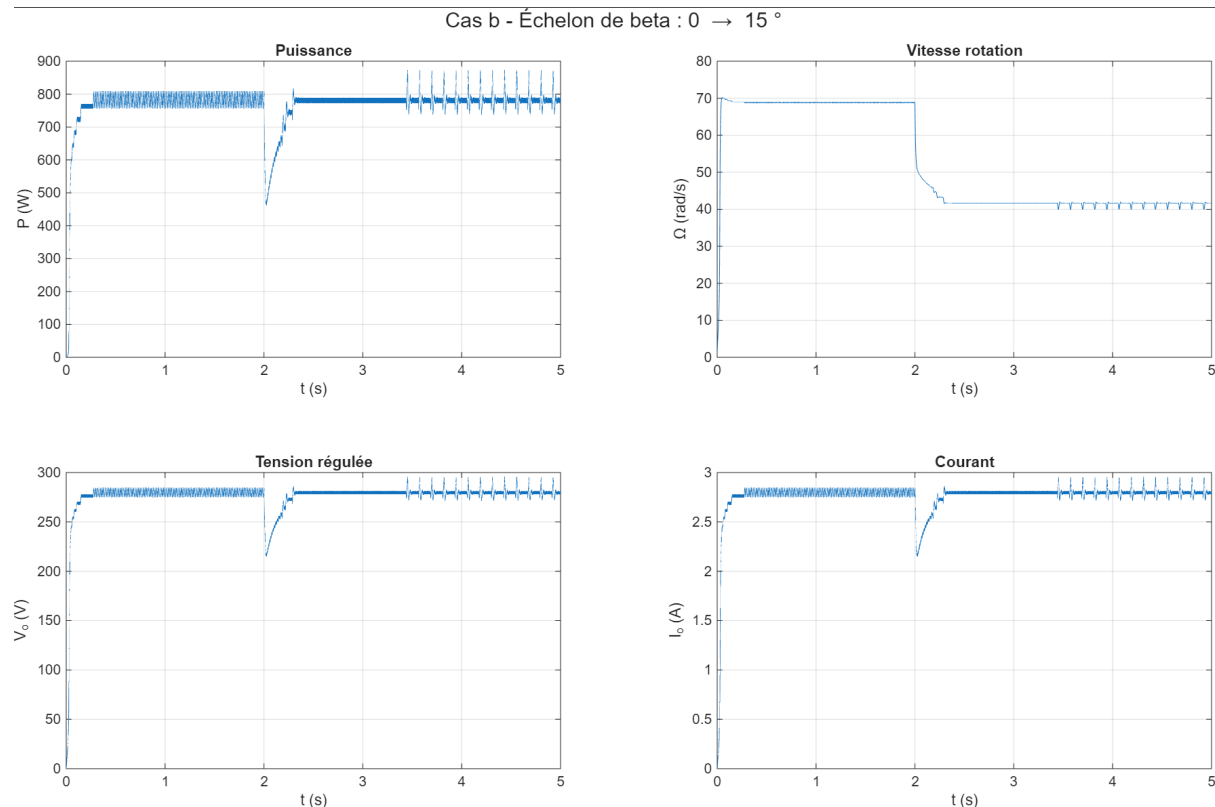


Figure 13 : Caractéristiques dynamiques de P , Ω , V_o , I_o en fonction du temps - échelon beta

Ce que j'observe :

Quand β passe de 0° à 15° :

- Ω chute de 70 à 42 rad/s (les pâles décrochent, signature aéro du pitch control)
- Mais **V_o reste à 280 V** grâce à la régulation
- La puissance reste quasi-constante (800 W $\rightarrow$ 780 W, seulement -3 %)
- Petit creux transitoire sur V_o à 215 V à $t = 2$ s, puis retour en 0.3 s

C'est très différent du cas a ! Là, le hacheur **compense** la perturbation aérodynamique : il augmente α pour boost plus fort, et il récupère la même puissance électrique malgré la baisse de Ω . C'est vraiment ce qu'on attend d'un convertisseur régulé : il découple la dynamique aérodynamique de la charge électrique.

Échelon de charge R_o ($12 \rightarrow 300 \Omega$)

Pour cet essai, j'ai utilisé un Variable Resistor piloté par un Step représenté en figure 14 ci-dessous.

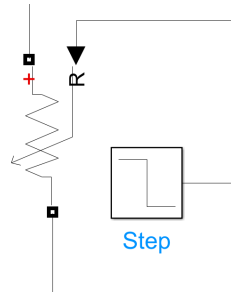


Figure 14 : Schéma Simulink avec la résistance variable et l'échelon

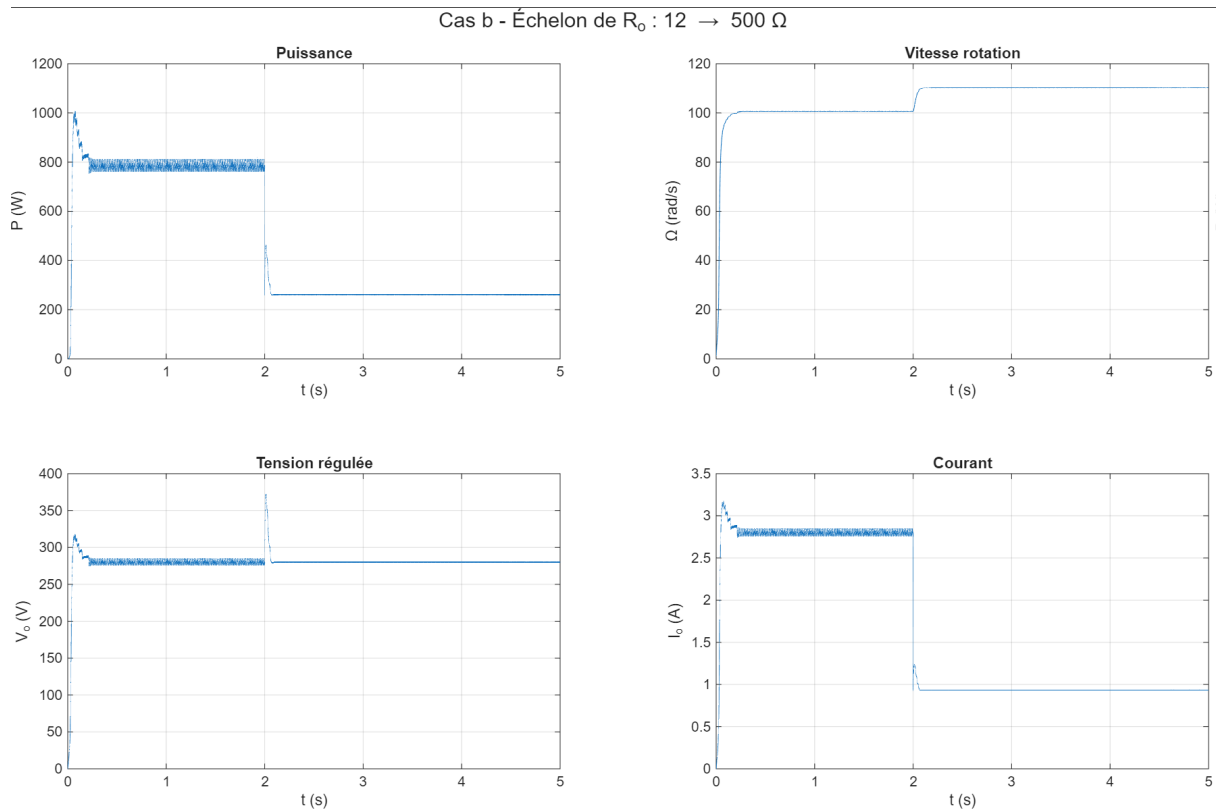


Figure 15 : Caractéristiques dynamiques de P , Ω , V_o , I_o en fonction du temps - échelon R_o

Ce que j'observe :

- Avant ($R_o = 100 \Omega$) : $\Omega = 100 \text{ rad/s}$, $V_o = 280 \text{ V}$, $I_o = 2.8 \text{ A}$, $P = 800 \text{ W}$
- Après ($R_o = 300 \Omega$) : $\Omega = 110 \text{ rad/s}$, **$V_o = 280 \text{ V}$ (toujours régulé !)**, $I_o = 0.93 \text{ A}$, $P = 260 \text{ W}$
- Pic transitoire à 370 V pendant $\sim 0.1 \text{ s}$, puis retour à 280 V

Le courant chute proportionnellement ($I_o = 280/300 = 0.93 \text{ A}$ ✓). La puissance chute aussi car la charge est moins gourmande. Ω augmente un peu parce que la turbine est moins freinée électriquement.

Le point clé : V_o reste fixe quel que soit R_o . Comparé au cas a où V_o passait de 11 V à 340 V ($\times 31$!) pour un échelon similaire, ici V_o reste sur sa consigne. La régulation rejette parfaitement les perturbations de charge.

Échelon	V_o cas a	V_o cas b
$V_{\text{vent}} (8 \rightarrow 12)$	$5 \rightarrow 17 \text{ V}$	280 V constant
$\beta (0 \rightarrow 15^\circ)$	$115 \rightarrow 76 \text{ V}$	280 V constant
R_o	$11 \rightarrow 340 \text{ V}$	280 V constant

Tableau 2 : Comparatif dynamique Cas a vs Cas b

Conclusion partie 2 : la régulation V_o , c'est super pour avoir une tension stable, mais ce n'est pas suffisant si on veut maximiser la puissance captée. Pour ça, il faut un algorithme MPPT.

3 — Exercice 2 : MPPT avec algorithme P&O

Maintenant je passe au MPPT. Je supprime la consigne fixe V_{ref} et le PI, et je les remplace par un algorithme **Perturb & Observe** qui va chercher tout seul le meilleur point de fonctionnement.

3.1 Principe du P&O

L'idée du P&O est super simple : on tâtonne. À chaque période (j'ai choisi 1 ms), on :

1. Mesure V_{PMDC} et I_L
2. Calcule $P = V \times I$
3. Compare avec P précédent :
 - Si P a augmenté $\rightarrow$ on continue dans le même sens (on garde le signe de $\Delta\alpha$)
 - Si P a diminué $\rightarrow$ on inverse (on change le signe de $\Delta\alpha$)

Au final, le système oscille en permanence autour du MPP, mais il y reste.

J'ai utilisé un bloc MATLAB Function dans Simulink avec le code en [annexe A1](#).

Note importante : j'ai dû inverser les signes "+" et "-" du StepSize par rapport au code original qui était fait pour du photovoltaïque. Sur une éolienne avec Boost, la relation entre α et V_{PMDC} est inversée par rapport au PV (augmenter $\alpha \rightarrow$ diminuer V_{PMDC}), donc il fallait corriger.

Paramètres choisis :

- StepSize = $1e-4$
- Sample time du MPPT = 1 ms (sinon l'algo s'exécute trop vite et le système n'a pas le temps de réagir)
- α initial = 0.5

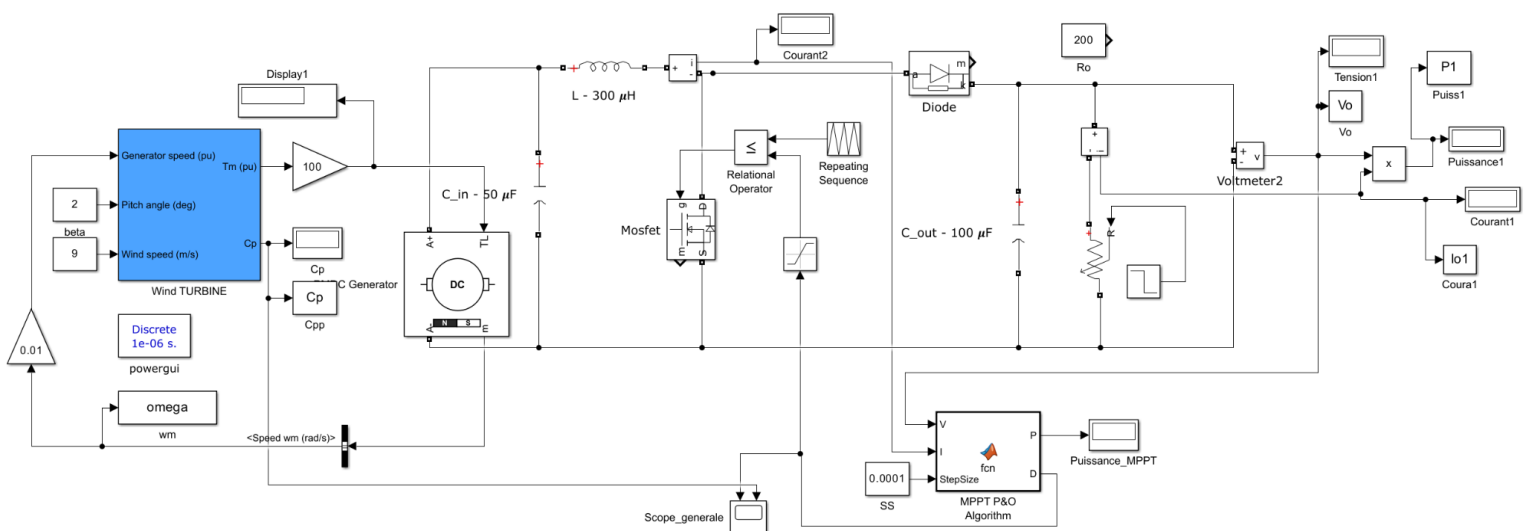


Figure 16 : Schéma Simulink avec MPPT P&O

3.2 Convergence statique du MPPT

J'ai lancé une simu de 10 s avec $V_{\text{vent}} = 9 \text{ m/s}$, $\beta = 2^\circ$, $R_o = 100 \Omega$.

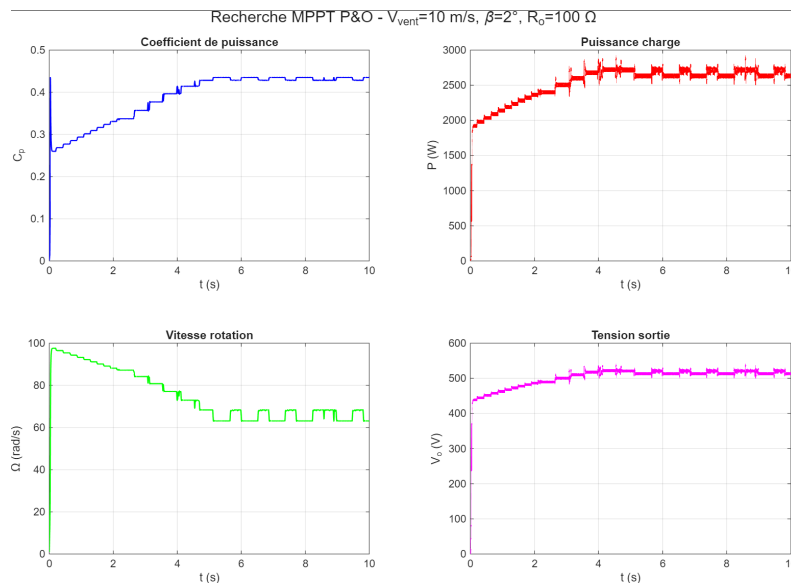


Figure 17 : Convergence statique — C_p , P_{charge} , Ω , V_o en fonction du temps

Ce que j'observe :

L'algorithme P&O converge progressivement vers le MPP :

- C_p passe de 0.25 à **0.44** en environ 5 s
- P_{charge} monte de 1100 W à **2700 W** ($\times 2.4$!)
- Ω s'adapte tout seul : descend de 90 rad/s à environ 65 rad/s (la valeur optimale pour λ_{opt})
- V_o n'est plus régulée, elle évolue librement et se stabilise vers 510 V

Je vois bien le **comportement en escalier** typique du P&O : chaque "marche" correspond à un petit pas d'incrément de α . À la fin, on voit des oscillations en zig-zag autour du sommet : c'est normal, le P&O ne reste jamais immobile, il tâtonne en permanence.

Comparaison avec les autres cas :

Cas	C_p atteint	P_{max}
a (R directe, $V=15$)	0.40 (par chance)	7500 W
b (Boost régulé, $V=10$)	0.225 ($V_{\text{ref}}=140$) ou 0.39 (V_{ref} optimisé)	1200 W à 2000 W
c (MPPT P&O, $V=9$)	0.44 (automatique)	2700 W

Tableau 3 : Comparatif statique Cas a vs Cas b vs Cas c

Le MPPT, contrairement aux deux autres cas, **trouve tout seul le MPP** sans que j'aie besoin de configurer quoi que ce soit à l'avance. C'est sa grande force.

3.3 Robustesse face aux perturbations

Pour vraiment montrer la puissance du MPPT, j'ai fait deux essais dynamiques : un échelon de vent et un échelon de charge.

Échelon de vent (9 → 10 m/s)

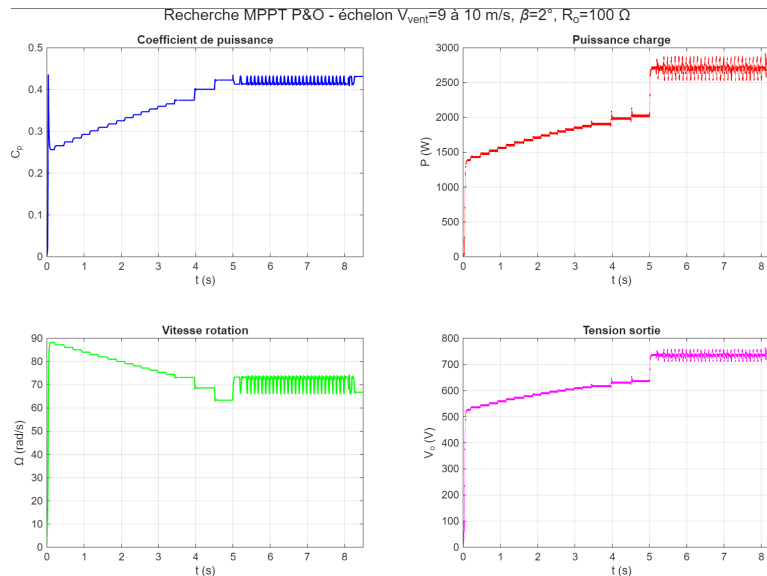


Figure 18 : Convergence dynamique — C_p , P_{charge} , Ω , V_o en fonction du temps

Ce que j'observe :

- Phase 1 ($V = 9$ m/s, $t < 5$ s) : MPPT converge, $C_p = 0.42$, $P = 2000$ W
- À $t = 5$ s : transition douce
- Phase 2 ($V = 10$ m/s, $t > 5$ s) : **C_p reste à 0.43**, P monte à 2700 W, Ω se stabilise à 70 rad/s

Le MPPT s'adapte parfaitement au changement de vitesse du vent. Il n'y a pas besoin de re-configurer quoi que ce soit, l'algorithme retrouve tout seul le nouveau MPP en quelques itérations.

J'ai aussi essayé un échelon plus violent (9 → 12 m/s) :

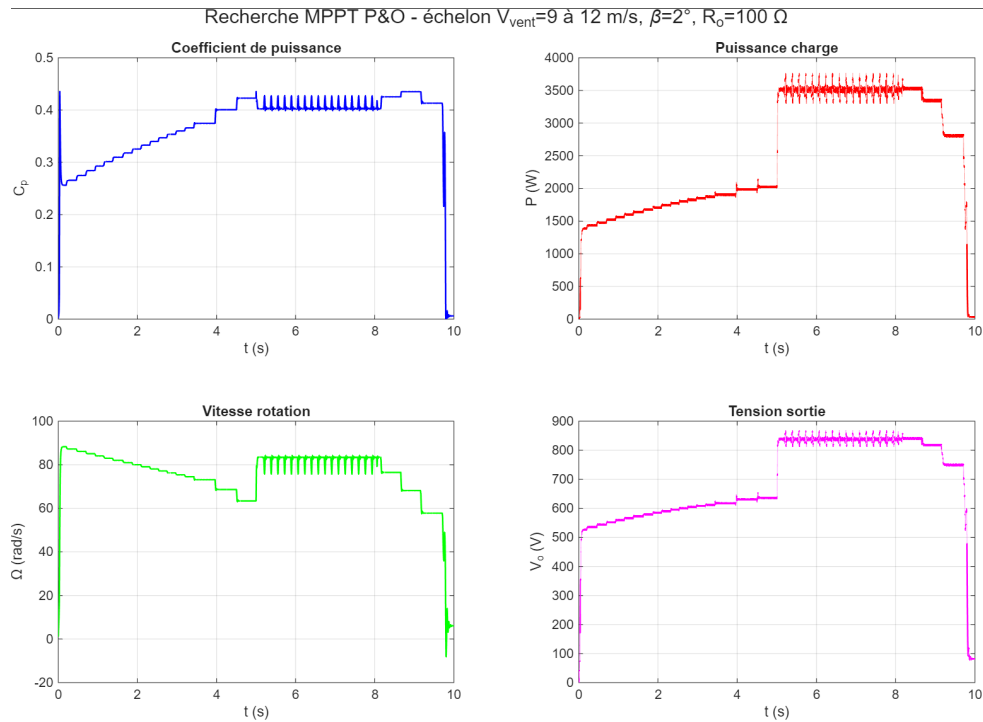


Figure 19 : Divergence dynamique — C_p , P_{charge} , Ω , V_o en fonction du temps

Là, j'ai vu une instabilité numérique à partir de $t \approx 9$ s : V_o monte à 850 V et le système commence à diverger. Je pense que c'est dû à la saturation du Boost en très forte puissance — un dimensionnement réel imposerait un C_{out} plus grand et un MOSFET dimensionné pour $V_o > 700$ V. Mais la phase de transition (entre 5 et 8 s) montre quand même bien que le MPPT s'adapte : C_p se restabilise à 0.41 et P monte à 3500 W.

Échelon de charge (200 $\rightarrow$ 100 Ω)

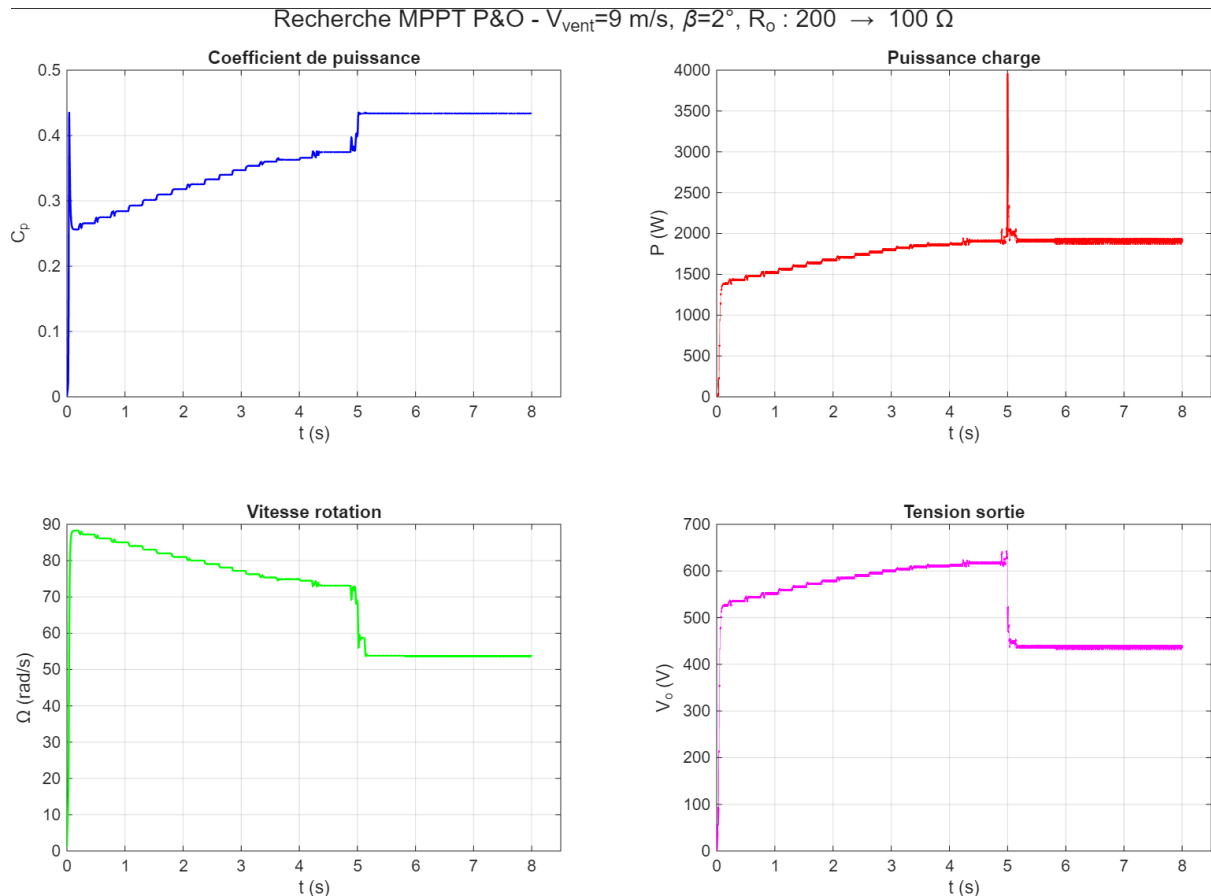


Figure 20 : Convergence dynamique — C_p , P_{charge} , Ω , V_o en fonction du temps

Ce que j'observe :

- Avant ($R_o = 200 \Omega$) : C_p converge à 0.30, $P = 2100 \text{ W}$, $\Omega = 92 \text{ rad/s}$, $V_o = 650 \text{ V}$
- À $t = 5 \text{ s}$: pic transitoire de P à 4200 W pendant $\sim 50 \text{ ms}$, chute brève de V_o à 470 V
- Après ($R_o = 100 \Omega$) : **C_p remonte à 0.38**, $P = 2600 \text{ W}$, $\Omega = 80 \text{ rad/s}$, $V_o = 510 \text{ V}$

Ce qui est intéressant, c'est que **C_p est même plus élevé après l'échelon qu'avant !** Je pense que c'est parce que le MPPT était coincé sur un palier local à 0.30 avant l'échelon, et la perturbation lui a permis d'en sortir et de trouver un meilleur point.

J'ai aussi tenté un échelon plus violent ($200 \rightarrow 50 \Omega$) :

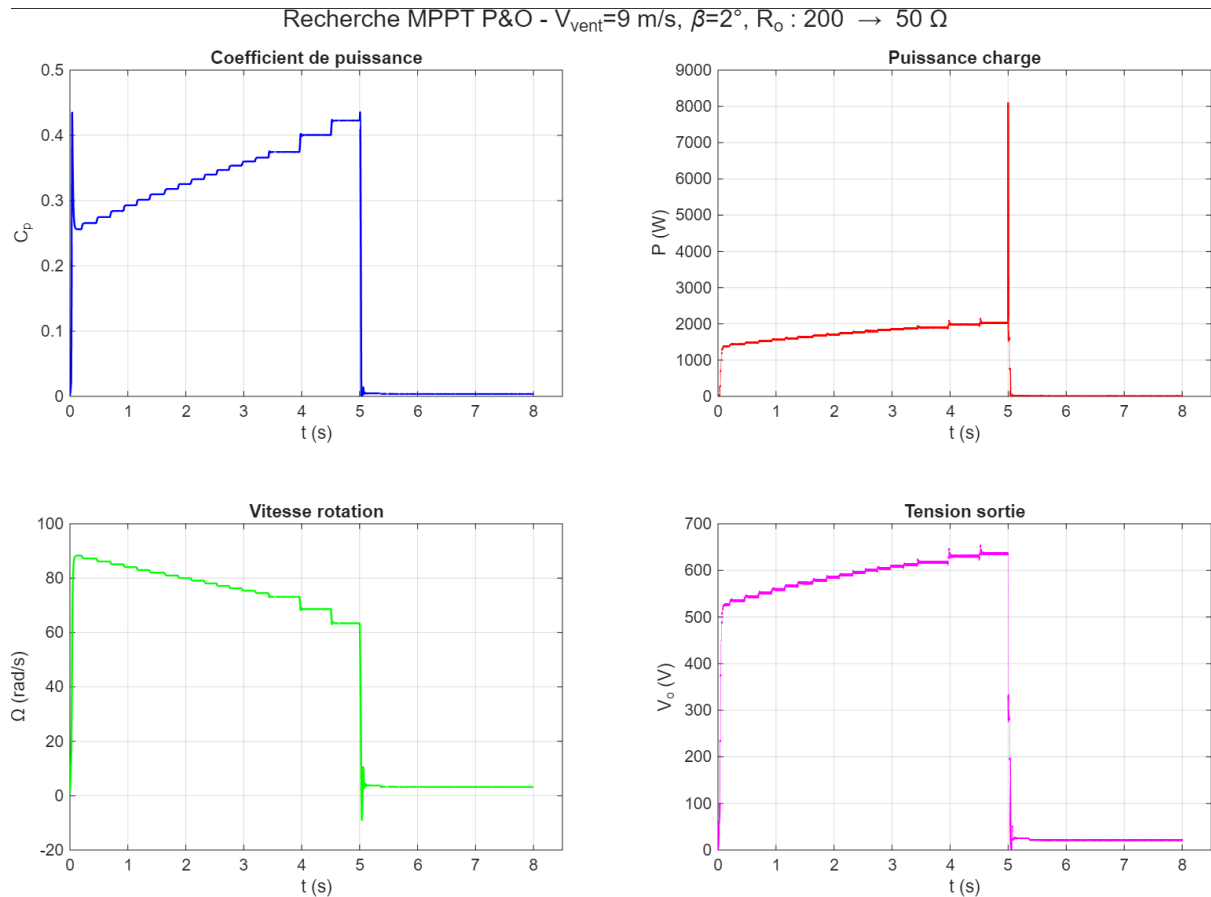


Figure 21 : Divergence dynamique — C_p , P_{charge} , Ω , V_o en fonction du temps

Là le système s'effondre complètement à $t = 5 \text{ s}$. C'est parce que avec $V_o \approx 620 \text{ V}$ et R_o qui passe brutalement à 50Ω , le courant demandé devient énorme ($I_{\text{pic}} \approx 12 \text{ A} \rightarrow P_{\text{pic}} \approx 7700 \text{ W}$), bien au-delà de ce que la turbine peut fournir. Le condensateur $C_{\text{out}} = 22 \mu\text{F}$ se vide en quelques ms et tout s'écroule.

Conclusion : le MPPT est robuste, mais il y a des limites physiques au système (composants, puissance disponible) qu'il ne peut pas dépasser.

Conclusion

Dans ce TP, j'ai étudié trois configurations différentes d'une éolienne avec génératrice à courant continu, et j'ai pu comparer leurs avantages et leurs limites.

Le cas a (branchement direct) est le plus simple, mais on ne maîtrise rien : ni la tension de sortie, ni le point de fonctionnement. On peut tomber par chance sur le MPP avec la bonne valeur de R_o , mais dès que les conditions changent (vent, charge), on en sort.

Le cas b (hacheur Boost + régulation V_o) apporte un vrai plus : V_o devient indépendante de R_o et des variations de vent (dans la limite des saturations). Mais ce contrôle de V_o ne garantit pas qu'on soit au MPP : il faut bien choisir V_{ref} , et ce choix n'est valable que pour des conditions précises. J'ai aussi vu une limite intrinsèque du Boost qui ne peut **jamais** abaisser la tension, d'où l'intérêt d'un Buck-Boost dans les systèmes réels.

L'exercice 2 (MPPT P&O) est clairement la solution la plus aboutie. L'algorithme trouve tout seul le MPP, **sans aucune configuration manuelle**, et s'adapte automatiquement aux variations de vent et de charge. J'ai atteint $C_p = 0.44$ (proche du max théorique de la turbine), avec une puissance captée significativement supérieure aux deux autres cas. Le MPPT a aussi montré sa robustesse face à des perturbations brutales, même si évidemment il y a des limites physiques (dimensionnement des composants, puissance turbine).

Ce que je retiens de ce TP, c'est que **plus on rajoute de l'intelligence dans la commande, plus on extrait de puissance du système**, et ça sans changer le matériel. C'est exactement le genre de raisonnement qu'on retrouve dans les vraies éoliennes modernes : électronique de puissance + algorithmes de commande adaptatifs (MPPT, pitch control, régulation de vitesse, etc.).

Annexes

A.1 Code MATLAB du MPPT P&O

```
function [P, D] = fcn(V, I, StepSize)
    persistent Pprev Vprev Dprev
    if isempty(Pprev)
        Pprev = 0;
        Vprev = 0;
        Dprev = 0.5;
    end
    P = V * I;
    if (P - Pprev) > 0
        if (V - Vprev) > 0
            D = Dprev + StepSize;
        else
            D = Dprev - StepSize;
        end
    else
        if (V - Vprev) > 0
            D = Dprev - StepSize;
        else
            D = Dprev + StepSize;
        end
    end
    Pprev = P; Vprev = V; Dprev = D;
end
```

A.2 Script de balayage MATLAB (exemple pour Ro)

```
Ro_values = logspace(-1, 4, 20);
P_mesures = zeros(1, length(Ro_values));
W_mesures = zeros(1, length(Ro_values));
Cp_mesures = zeros(1, length(Ro_values));

for i = 1:length(Ro_values)
    set_param('FINALSIMULATION_1/Ro', 'Resistance', num2str(Ro_values(i)));
    sim('FINALSIMULATION_1');
    P_mesures(i) = P.Data(end);
    W_mesures(i) = omega.Data(end);
    Cp_mesures(i) = Cp.Data(end);
end

lambda = W_mesures * R_pale / V_vent;

figure;
subplot(1,2,1); plot(W_mesures, P_mesures, '-o');
xlabel("\Omega (rad/s)"); ylabel('P (W)'); grid on;
subplot(1,2,2); plot(lambda, Cp_mesures, '-o');
xlabel("\lambda"); ylabel('C_p'); grid on;
```

A.3 Paramètres principaux du modèle

Composant	Valeur
Rayon des pâles R_{pale}	2 m
Puissance nominale turbine	120 W (base)
Vitesse de vent de base	12 m/s
C_p max (nominal)	0.73
PMDC k_e (constante de couple)	1.8 N·m/A
PMDC R_a	0.78 Ω
PMDC L_a	0.016 H
Inertie J	0.01 kg·m ²
Capacité C entrée hacheur	22 μ F
Inductance hacheur L	300 μ H
Capacité C sortie hacheur	22 μ F
Fréquence PWM	10 kHz
Pas du solveur	1 μ s (Fixed-step ode4)