



Optimisation de l'extraction d'énergie photovoltaïque par commandes intelligentes et hybrides

Étude comparative et implémentation des algorithmes P&O, RNA et SVR-P&O



Filière : 5ème année Génie Électrique.
Option : Automatique, Robotique et Informatique
Industrielle.

Plan



Partie 1

Introduction

Partie 2

Différentes approches

Partie 3

Commande classique
(p&o)

Partie 4

commandes intelligentes

Partie 5

commande hybride (svr-p&o)

Partie 6

conclusion et perspectives



1.1 : Contexte général

- **Cadre du projet :** Étude et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque sous l'environnement MATLAB/Simulink.



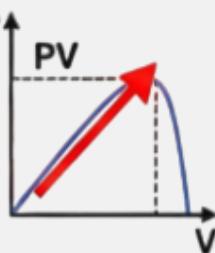
- **Système étudié :** L'installation comprend trois blocs principaux : un générateur PV (SunPower SER-228P), un convertisseur DC-DC (Boost) et une charge.

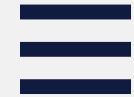


- **Défi énergétique :** La puissance délivrée par un panneau solaire est non linéaire et varie fortement selon les conditions climatiques (Éclairage et Température).

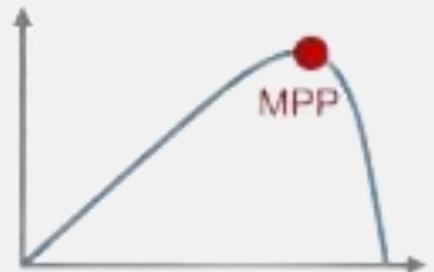


- **Rôle du MPPT :** Pour maximiser le rendement, il est indispensable d'intégrer une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui ajuste le point de fonctionnement du système en temps réel.

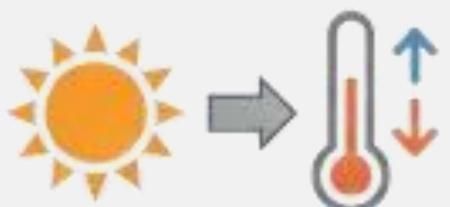




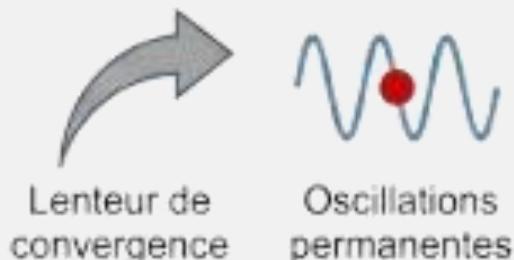
1.2 : La Problématique



Non-linéarité du système : La puissance délivrée par un panneau PV n'est pas constante. Elle suit une courbe non-linéaire avec un **unique point de fonctionnement optimal (MPP)**.



Influence Climatique : Ce point optimal se **déplace constamment** en fonction des **variations de l'éclairement (E)** et de la **température (T)**.

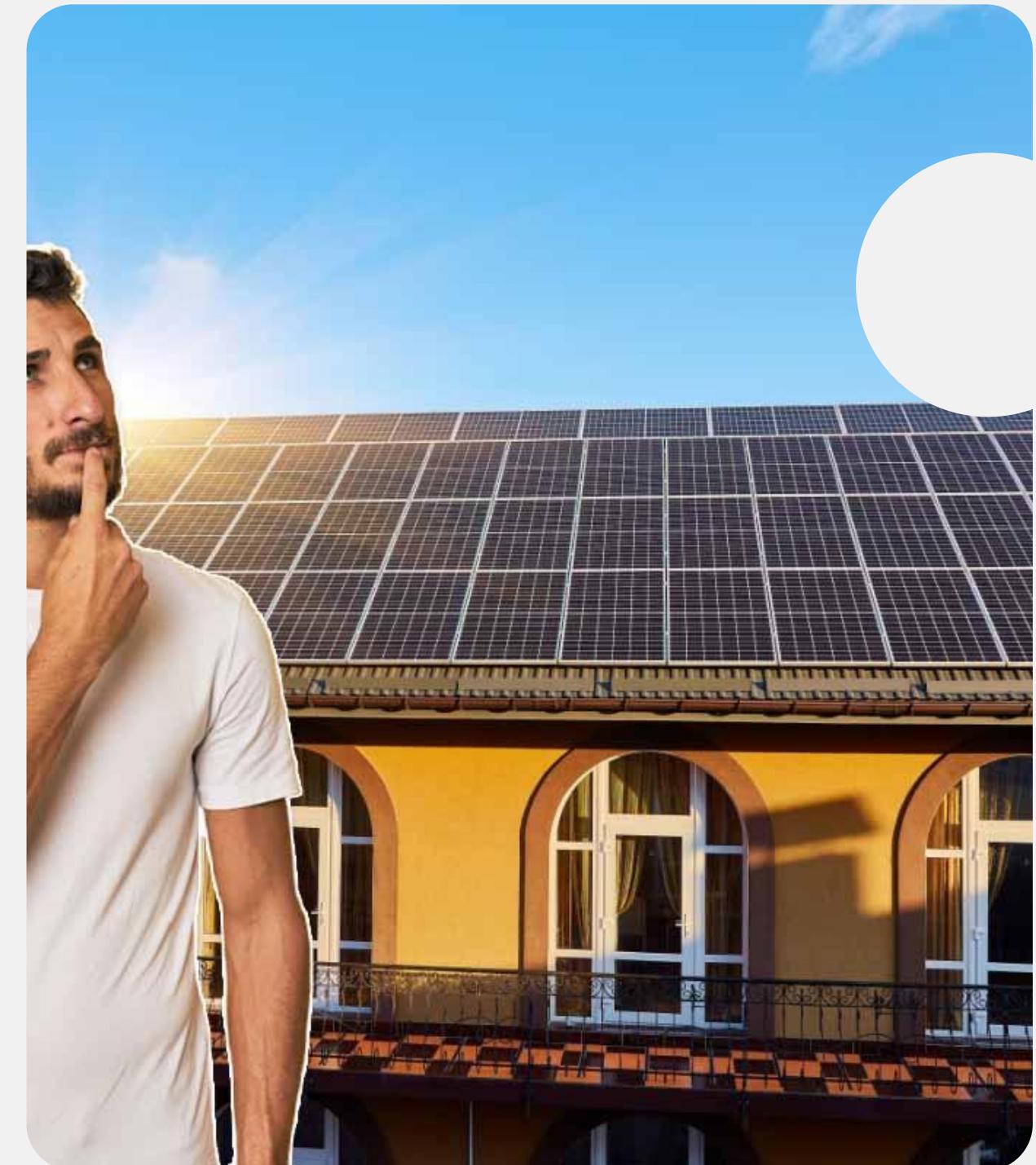


Lenteur de convergence

Oscillations permanentes

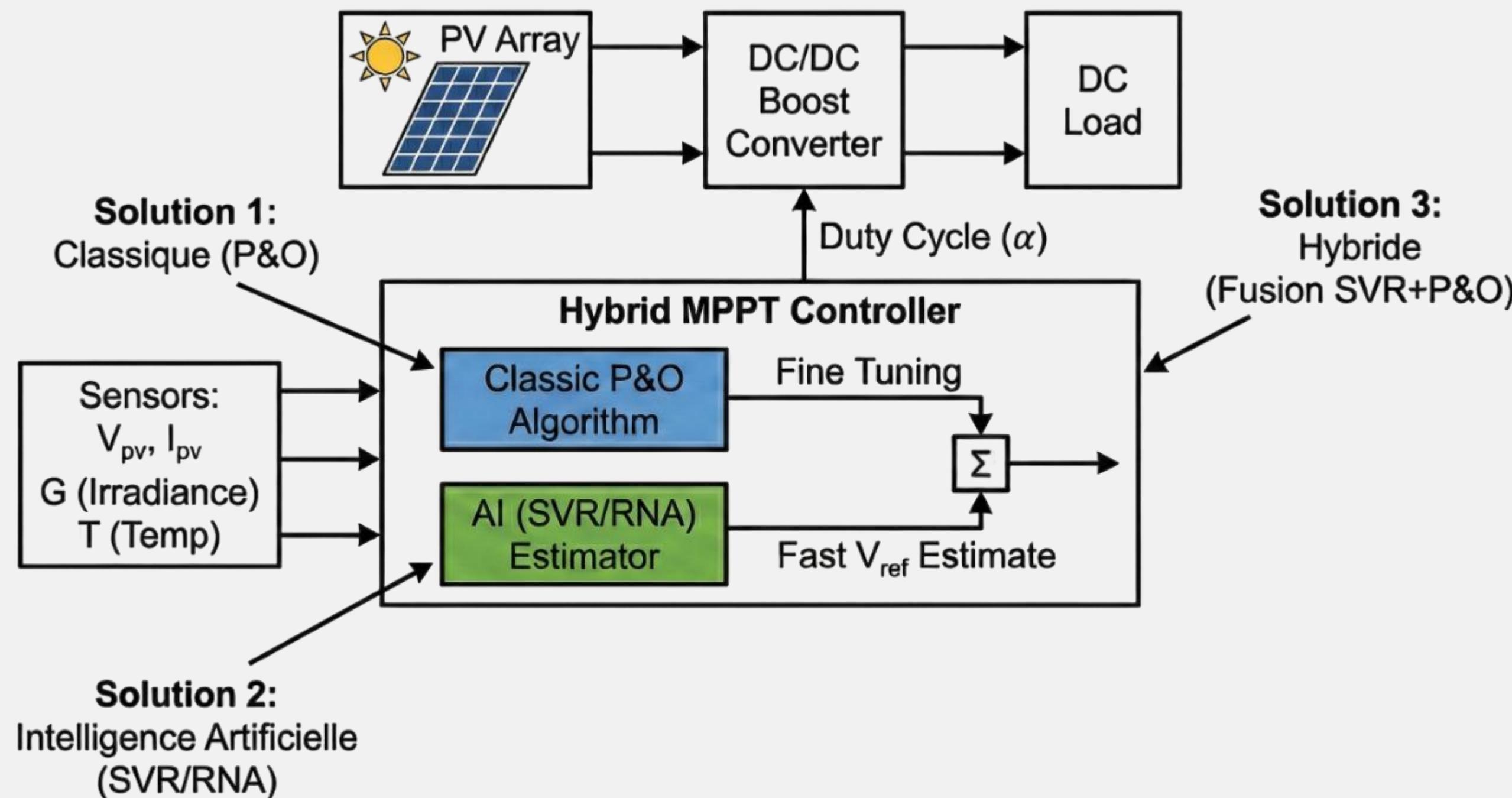
Limites des commandes classiques (P&O) : L'algorithme standard souffre de défauts majeurs :

1. Lenteur de convergence lors des changements brusques de météo.
2. Oscillations permanentes autour du MPP, entraînant une perte d'énergie continue.



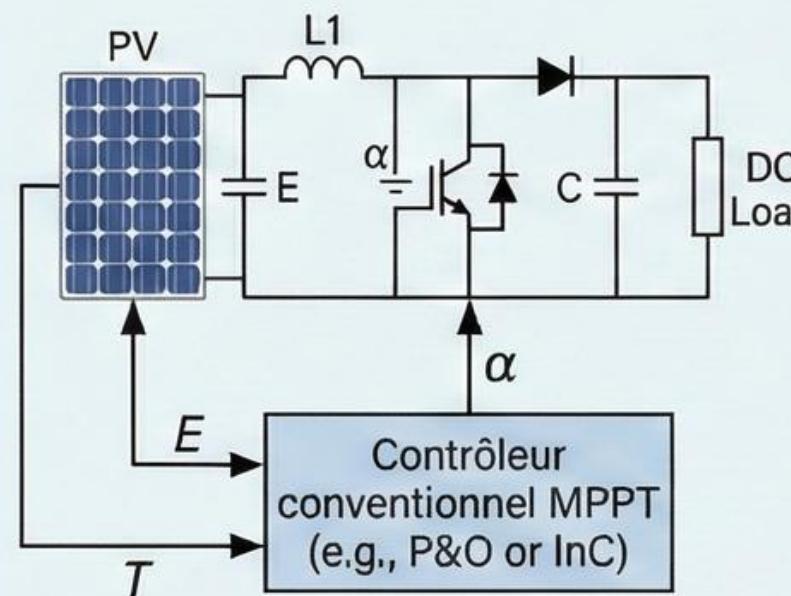
1.3 : Cahier des Charges

- **Objectif Principal :** Maximiser le rendement énergétique en assurant une poursuite du MPP rapide et stable.
- **Solutions mises en œuvre :**



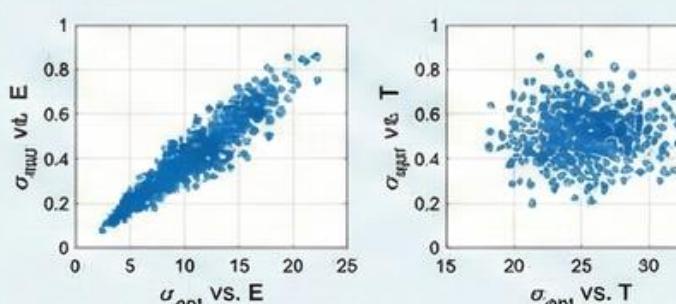
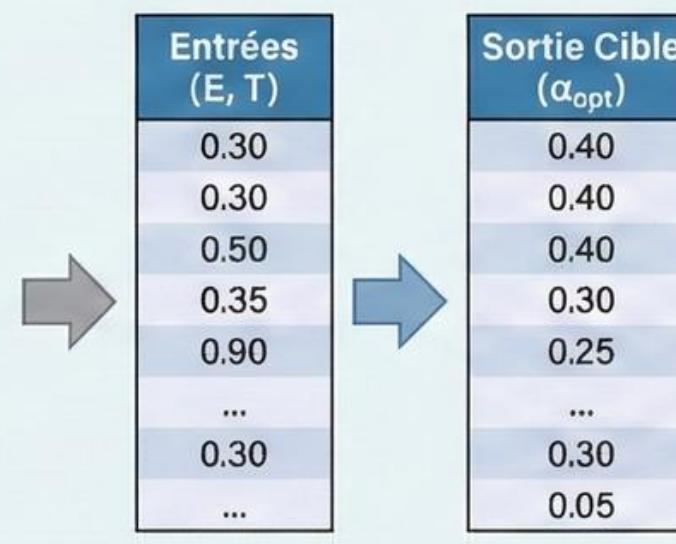
1.4 : Démarche Adoptée

1. Modélisation Simulink (Générateur de Référence)



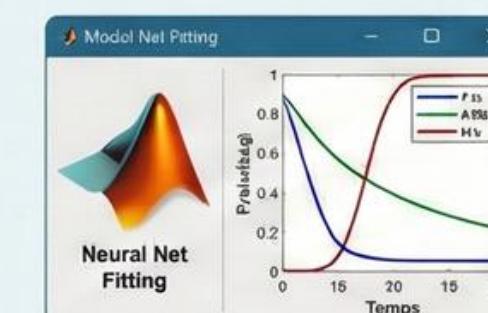
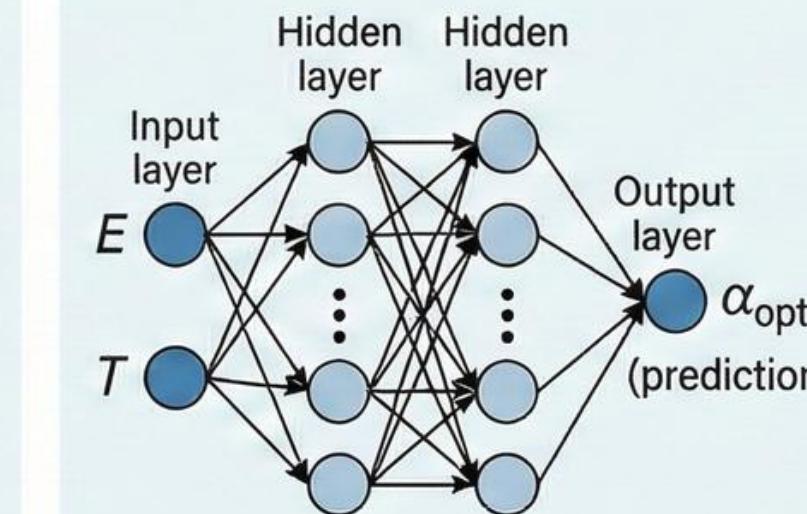
Simulation de l'ensemble PV+Boost+MPPT conventionnel pour obtenir α_{opt} .

2. Génération du Dataset



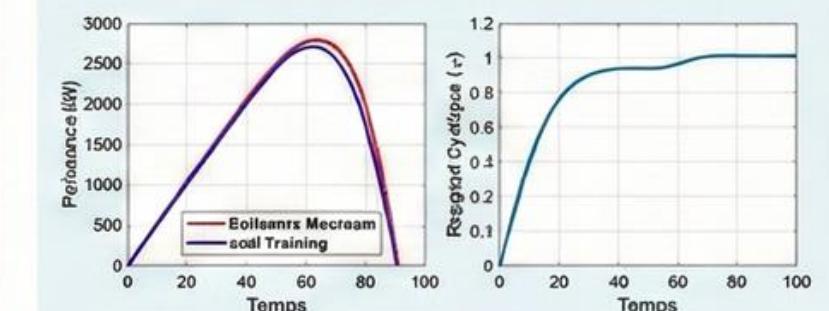
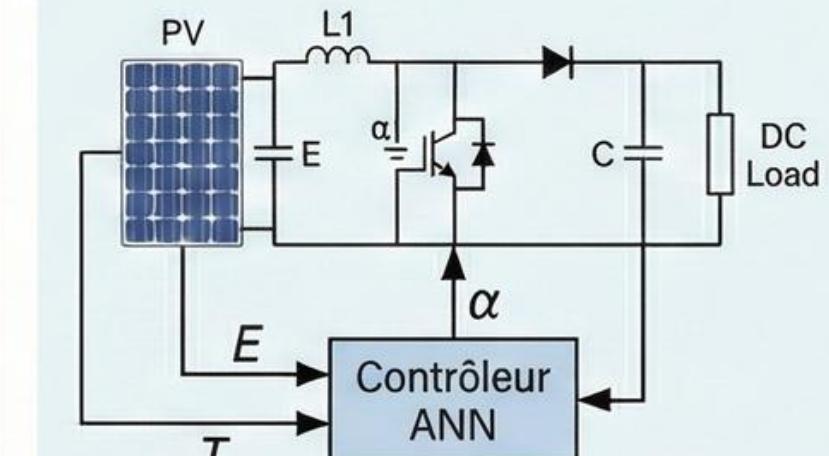
Collecte des couples (E, T, α_{opt}) pour l'entraînement.

3. Entraînement



Entraînement du modèle ANN pour prédire α_{opt} .

4. Validation et Performances (Intégration)



RMSE/MSE

Comparaison avec le modèle de référence et évaluation des erreurs.

2.1 : Architecture du Système Photovoltaïque

- Le système est modélisé sous l'environnement MATLAB/Simulink.
- Il est composé de 3 blocs principaux en cascade :

- Générateur PV: Source d'énergie (Panneaux solaires).
- Convertisseur DC-DC (Boost): Interface d'adaptation de puissance pilotée par le MPPT.
- Charge: Charge résistive consommatrice.

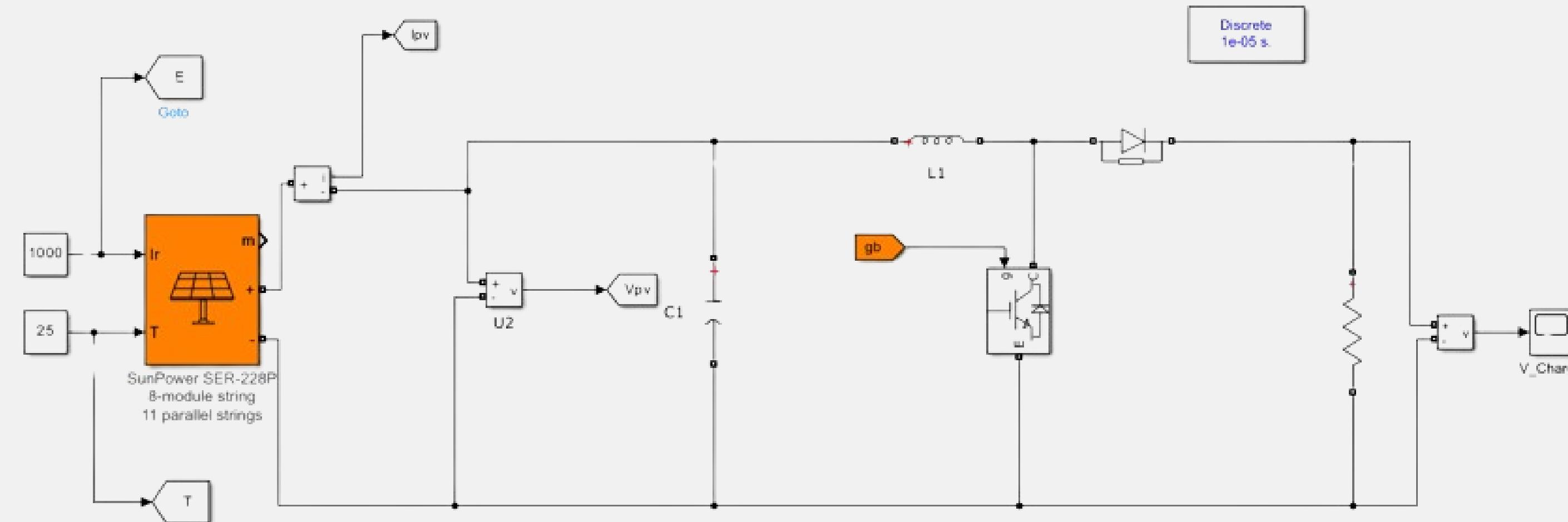
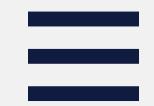


Figure 1: Implémentation Du Système Photovoltaïque Global Sur Simulink



Caractéristiques du Système PV SunPower & Dimensionnement



Caractéristiques du Panneau PV (SunPower SER-228P)

Modèle	SunPower SER-228P
Conditions de test (STC)	1000 W/m ² , 25°C
Puissance Maximale (Pmax)	228 W
Tension Circuit Ouvert (Voc)	38.1 V
Courant Court-Circuit (Isc)	8.36 A
MPP: Tension (Vmp)	29.8 V
Courant (Imp)	7.63 A

Dimensionnement du Convertisseur & Charge

Inductance (L)	0.45 mH
Capacité d'entrée (Cin)	600 uF
Capacité de sortie (Cout)	1600 uF
Fréquence de découpage (Fsw)	2 kHz
Charge Résistive (R)	20.5 Ohms

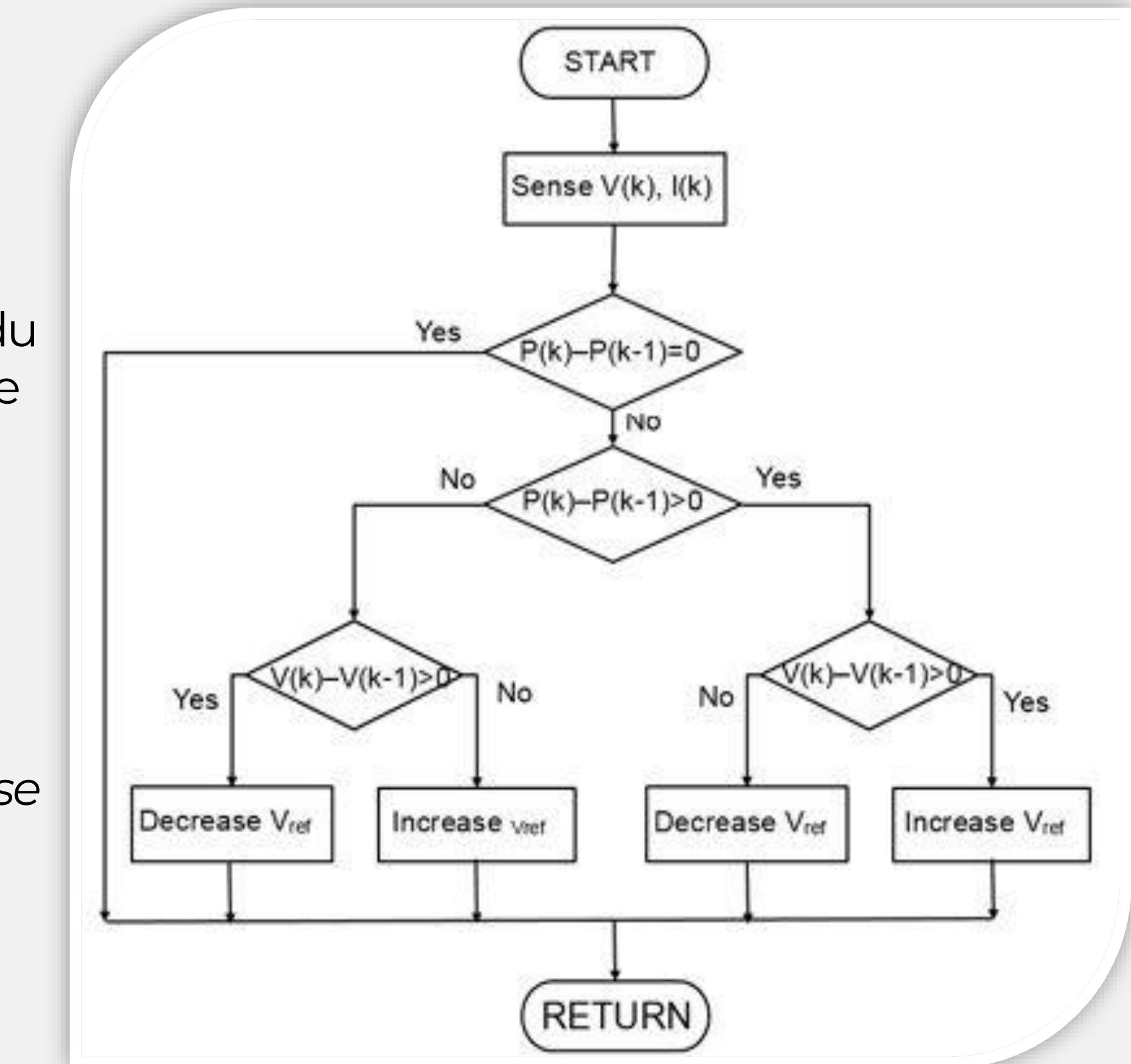
3.1: Principe de la Commande P&O

- **Principe de fonctionnement :**

- ✓ C'est une méthode d'escalade ("Hill Climbing").
L'algorithme modifie périodiquement la tension du panneau (V_{pv}) et observe la variation de puissance (P).

- **Logique de commande :**

- ✓ Si la puissance augmente ($\text{Variation } P > 0$), on continue la perturbation dans le même sens.
- ✓ Si la puissance diminue ($\text{Variation } P < 0$), on inverse le sens de la perturbation.





3.2 : Implémentation Simulink (P&O)

- **Modélisation** : L'algorithme est intégré dans Simulink via un bloc de fonction MATLAB ("Function Block").
- **Entrées du bloc :**
 - Tension du panneau (V_{pv})
 - Courant du panneau (I_{pv})
- **Sortie du bloc :**
 - Génération du signal PWM (gb)
- **Fonctionnement** : Le bloc calcule la puissance instantanée ($P = V \times I$) et ajuste le rapport cyclique pas à pas pour trouver le maximum.

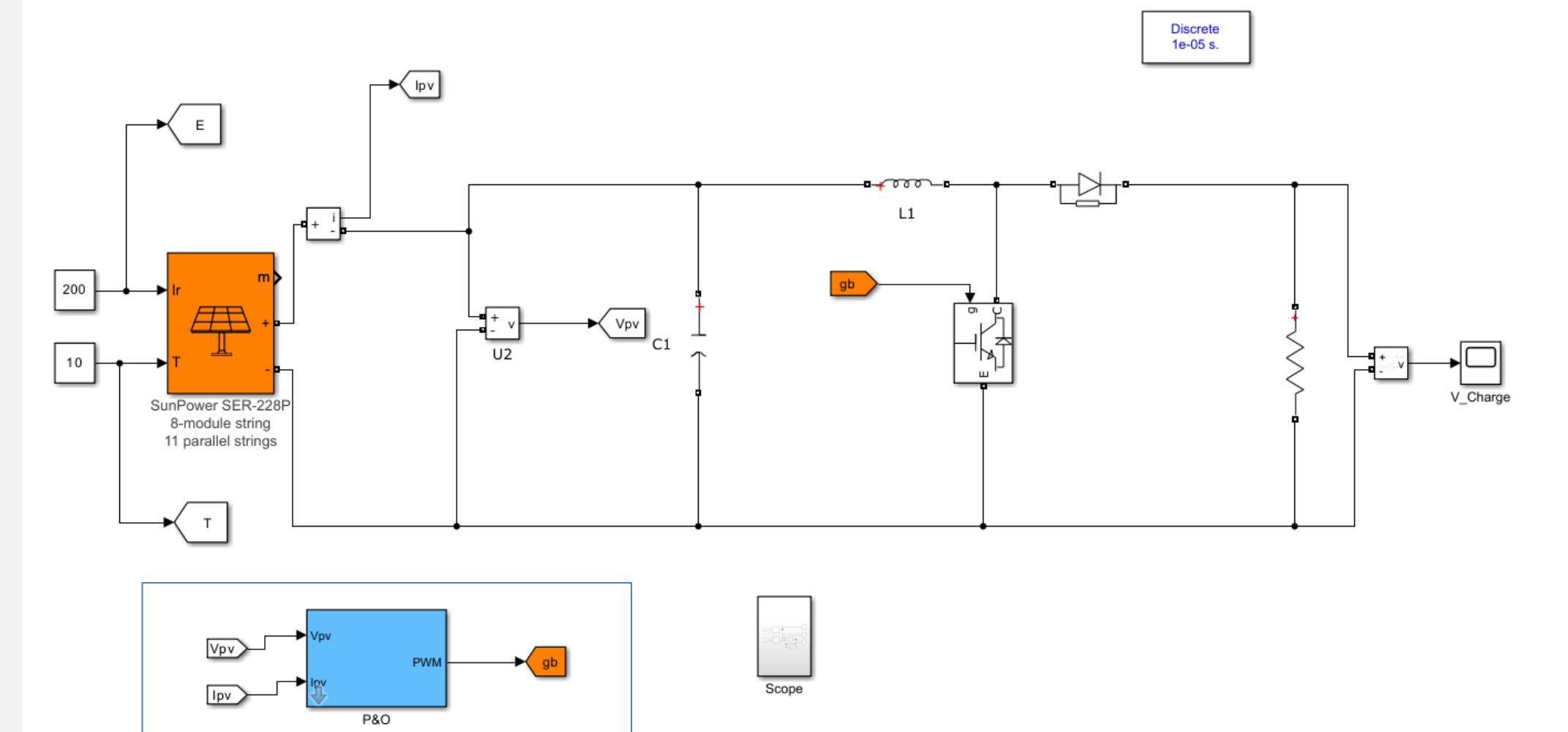


Figure 2 : Modélisation de l'algorithme Perturber et Observer (P&O) via un bloc de fonction MATLAB sous Simulink

3.3 : Résultats et Interprétation

Observation : La courbe de puissance montre que le système atteint la zone optimale mais ne se stabilise jamais complètement.

Temps de réponse : Environ 125 millisecondes.

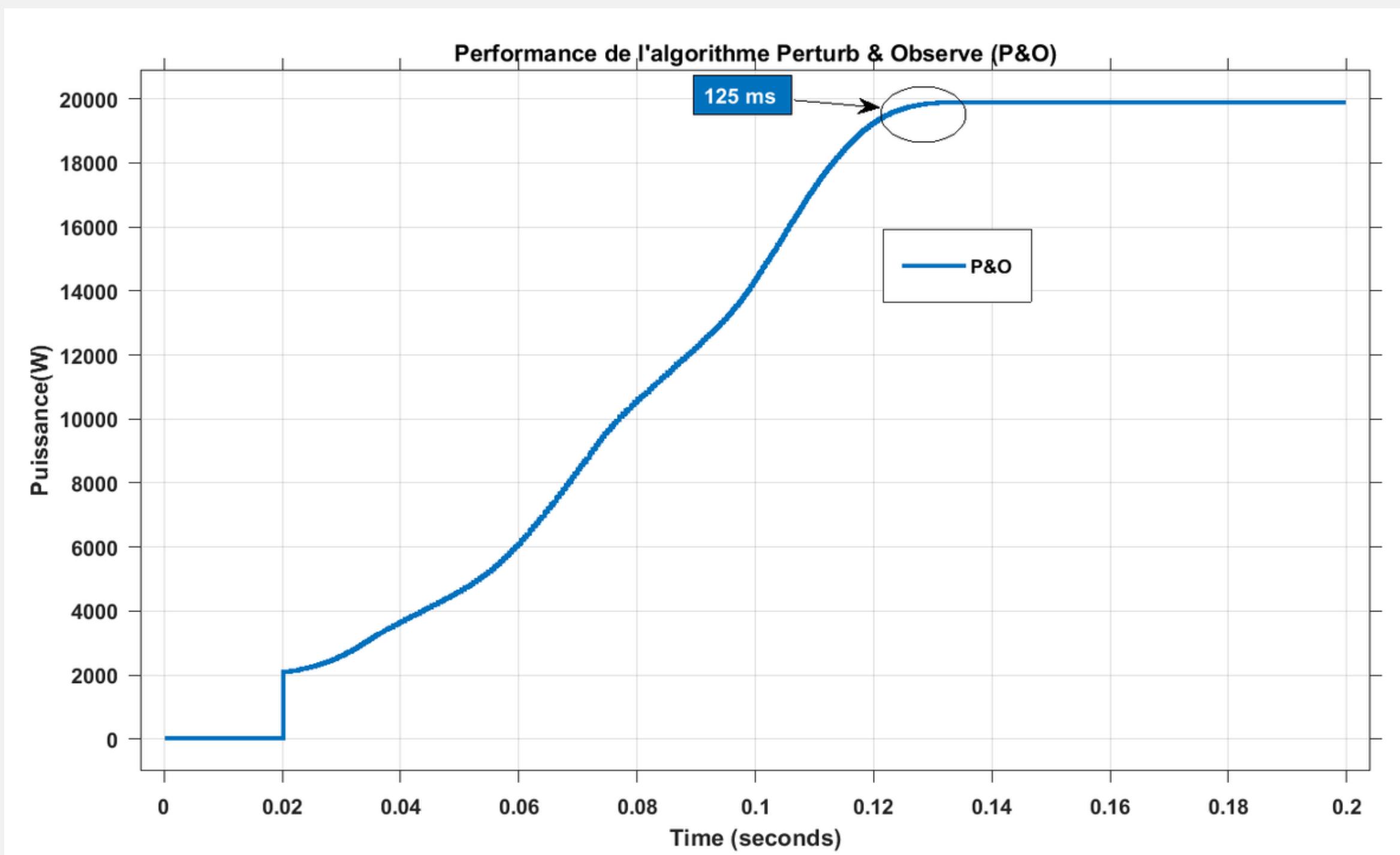


Figure 3 : Évolution de la puissance en fonction du temps (Algorithme P&O)



4.1 : Commandes Intelligentes : RNA (Réseaux de Neurones)

a-Principe Théorique

Concept : Cette méthode repose sur l'apprentissage supervisé (Intelligence Artificielle). L'objectif est de remplacer le calcul itératif par une prédiction directe.

Dataset : Une base de données a été créée contenant 171 échantillons. Elle relie les entrées climatiques (EclairementE et Température T) à la sortie idéale (Rapport cyclique \alpha).



Apprentissage : Le réseau apprend ces relations pour pouvoir prédire instantanément la bonne commande pour n'importe quelle condition météo

4.1 : Commandes Intelligentes : RNA (Réseaux de Neurones)

b-Implémentation Simulink

Intégration : Le réseau de neurones entraîné est intégré dans le schéma global Simulink via le bloc spécifique Neural Network.

Fonctionnement : Ce bloc remplace l'algorithme P&O. Il reçoit en temps réel les mesures des capteurs (E et T) et génère immédiatement le rapport cyclique optimal pour piloter le convertisseur Boost.

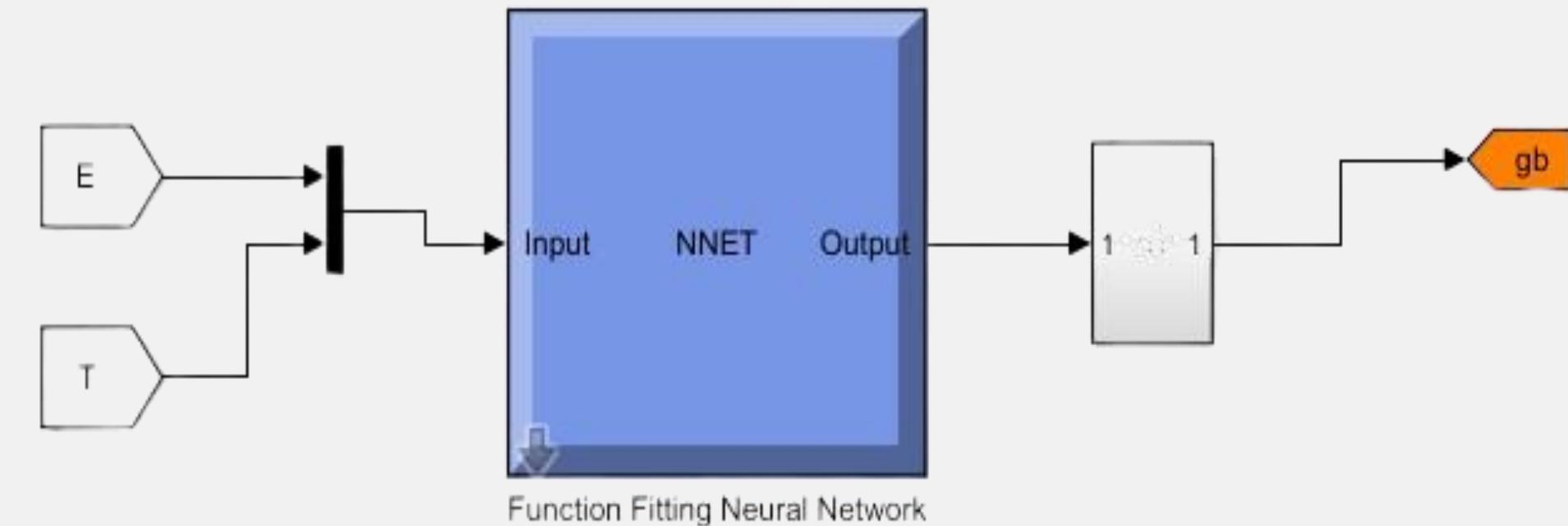


Figure 4 : Architecture du réseau de neurones artificiels (RNA) intégré dans le schéma global Simulink

4.1 : Commandes Intelligentes : RNA (Réseaux de Neurones)

c-Résultats et Interprétation

Observation : La courbe de puissance monte verticalement dès le démarrage pour atteindre la valeur maximale quasi instantanément.

Stabilité : Contrairement au P&O, le signal obtenu est parfaitement lisse et stable. Il n'y a aucune oscillation autour du point de puissance maximale (MPP).

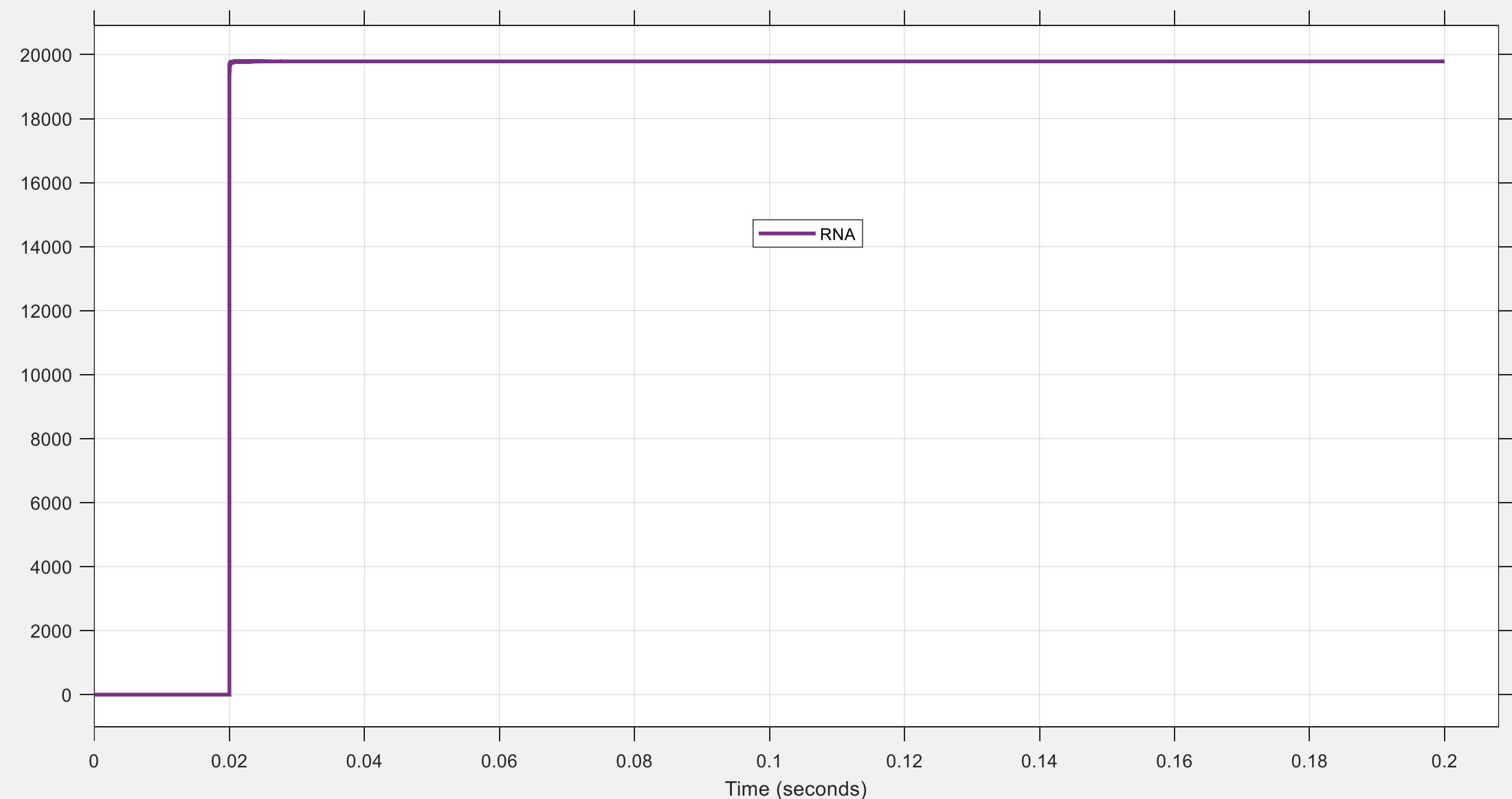
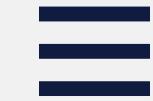


Figure 5 : Évolution de la puissance en fonction du temps (Algorithme RNA)



4.2 : Commandes Intelligentes : SVR (Support Vector Regression)

a-Principe Théorique

Définition : La technique SVR est une méthode de régression par apprentissage automatique (Machine Learning). Elle mappe les données d'entrée vers un espace de haute dimension pour prédire une valeur continue.

Tableau 1 : Comparaison des performances des modèles selon les fonctions de noyau et les méthodes d'optimisation des hyperparamètres.

Symbol	KERNEL FUNCTION	Optimizer	RMSE	R-squared	MSE	MAE	Training time(seconds)
LB	Linear	Bayesian optimization	0.035815	0.96	0.0012827	0.027407	55.013
LG	Linear	Grid search	0.036611	0.96	0.0013404	0.02821	567.76
LR	Linear	Random search	0.037031	0.96	0.0013713	0.025695	88.895
GB	Gaussian	Bayesian optimization	0.016062	0.99	0.00025799	0.010522	85.413
GG	Gaussian	Grid search	0.016719	0.99	0.00027951	0.010914	297.17
GR	Gaussian	Random search	0.018063	0.99	0.00032626	0.011877	60.555
QB	Quadratic	Bayesian optimization	0.020668	0.99	0.00042716	0.013926	64.306
QG	Quadratic	Grid search	0.020969	0.99	0.00043971	0.012601	469.86
QR	Quadratic	Random search	0.021995	0.98	0.00048377	0.012494	138.88
CB	Cubic	Bayesian optimization	0.021423	0.98	0.00045892	0.01459	128.76
CG	Cubic	Grid search	0.02399	0.98	0.00057553	0.019	1055.5
CR	Cubic	Random search	0.03135	0.97	0.00098282	0.026702	147.94

4.2 : Commandes Intelligentes : SVR (Support Vector Regression)

b-Implémentation Simulink

Intégration : L'algorithme est implémenté sous MATLAB/Simulink à l'aide du bloc RegressionSVM Predict.

Configuration : La base de données d'entraînement comprend 171 échantillons (variant E et T). Le bloc prédit le rapport cyclique en fonction des variations climatiques détectées.

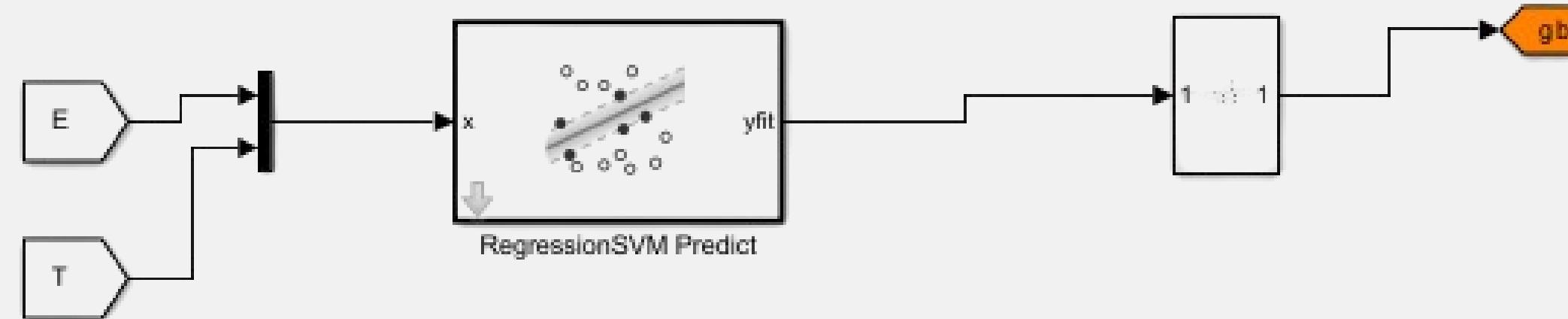


Figure 6 : Implémentation du bloc RegressionSVM Predict pour le contrôle MPPT.

4.2 : Commandes Intelligentes : SVR (Support Vector Regression)

c-Résultats et Interprétation

Temps de réponse : Le système est extrêmement rapide. Il atteint le point optimal en seulement **20 ms**, contre **125 ms** pour le P&O classique.

Stabilité : L'ondulation est nulle (**0 W**). Le système ne perd pas d'énergie à osciller autour du point optimal.

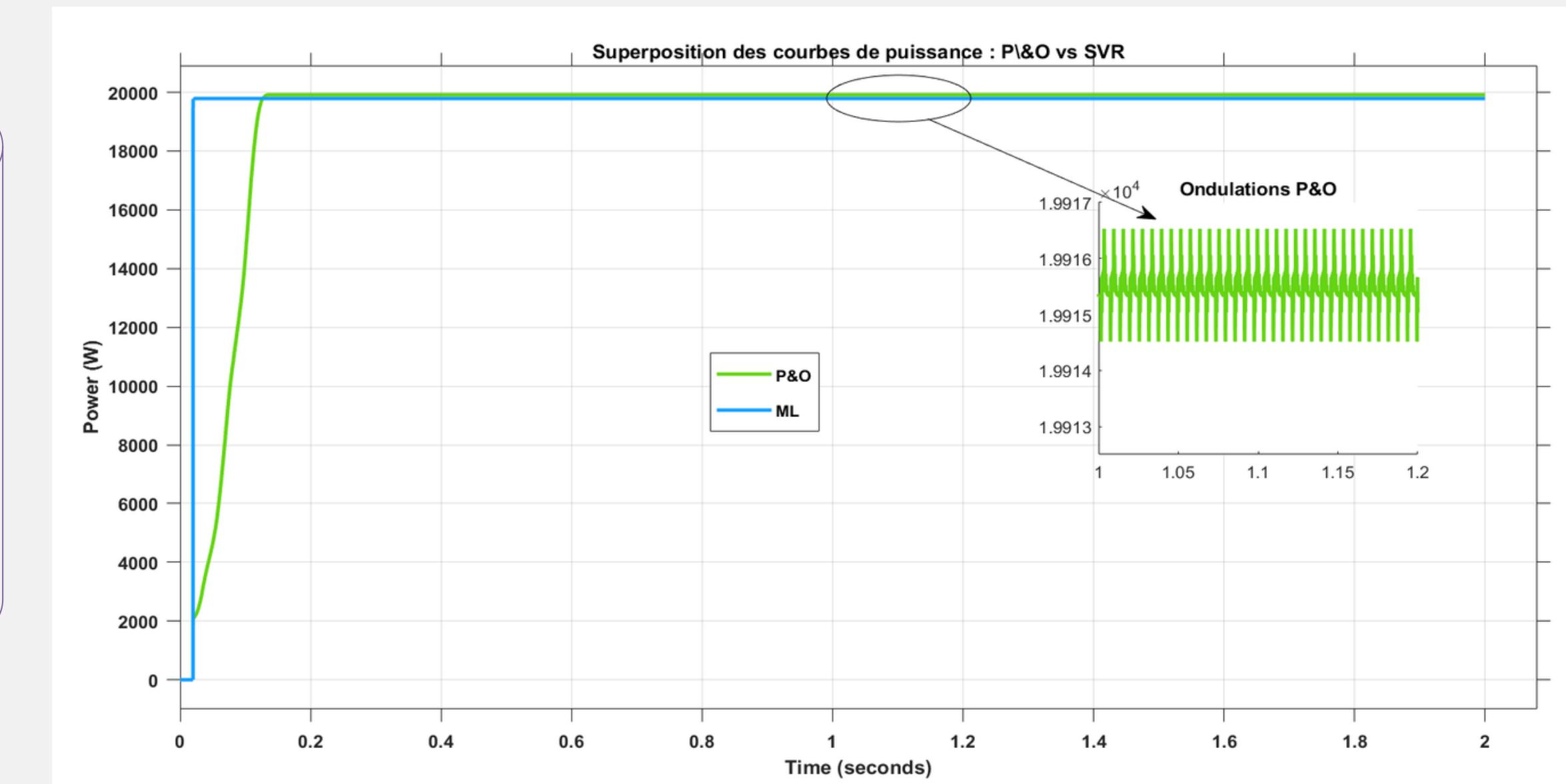


Figure 7 : Comparaison des performances MPPT : P&O vs SVR



4.2 : Commandes Intelligentes : SVR (Support Vector Regression)

Tableau 2 : Comparaison des indicateurs de performance entre **P&O** et **SVR**

Critère	P&O (Classique)	SVR (Proposé)
⌚ Temps de réponse	Lent (~125 ms)	Très Rapide (20 ms)
⚙️ Stabilité	Oscillations (~20 W)	Parfaite (0 W)
⚡ Puissance Moyenne	19 914.7 W	19 788.6 W
⚙️ Point Fort	Précision finale	Vitesse & Stabilité
⚙️ Point Faible	Lenteur au démarrage	Légère erreur statique

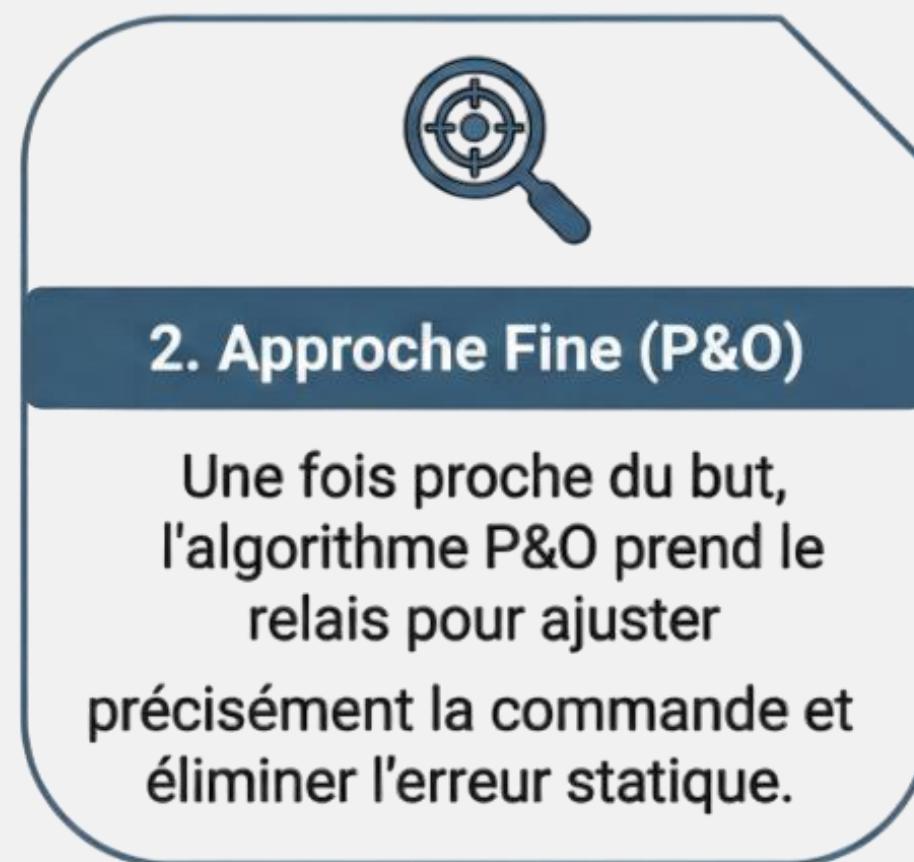
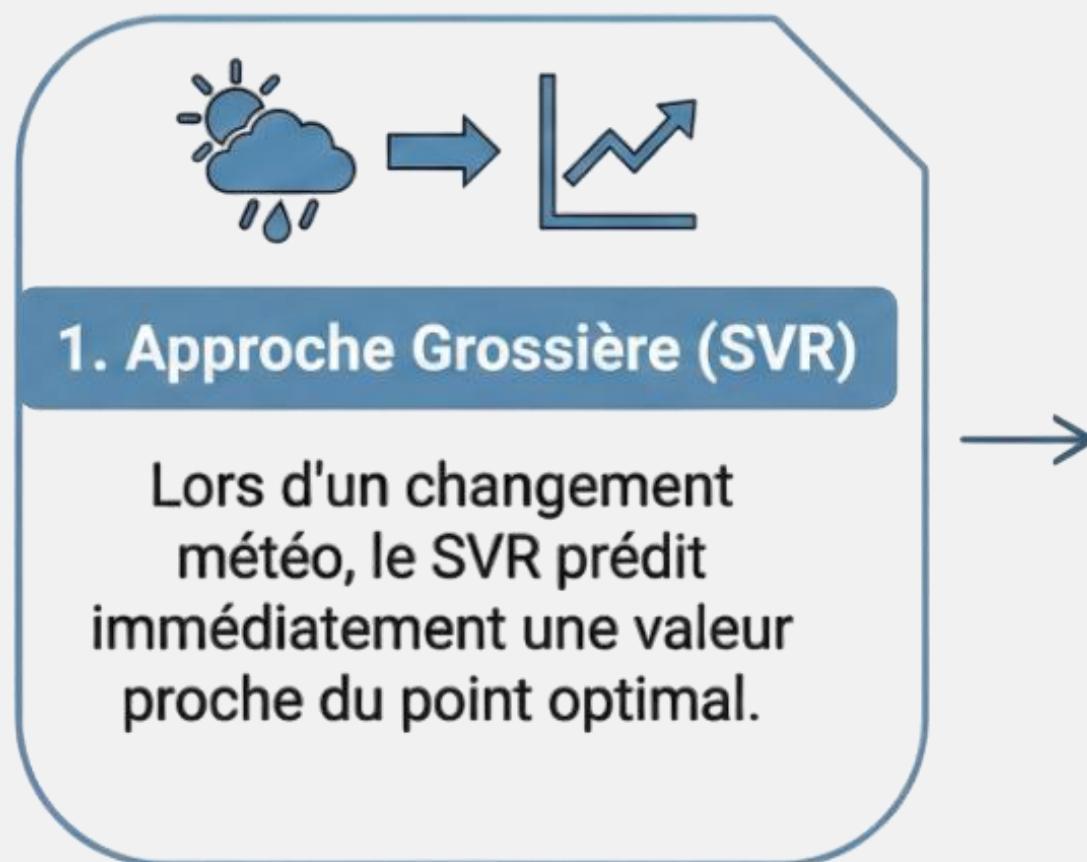


5 : Commande Hybride (SVR-P&O)

a-Principe

Concept théorique: Cette stratégie combine l'intelligence artificielle (SVR) et la méthode classique (P&O) pour obtenir le meilleur des deux mondes.

Fonctionnement en 2 étapes :



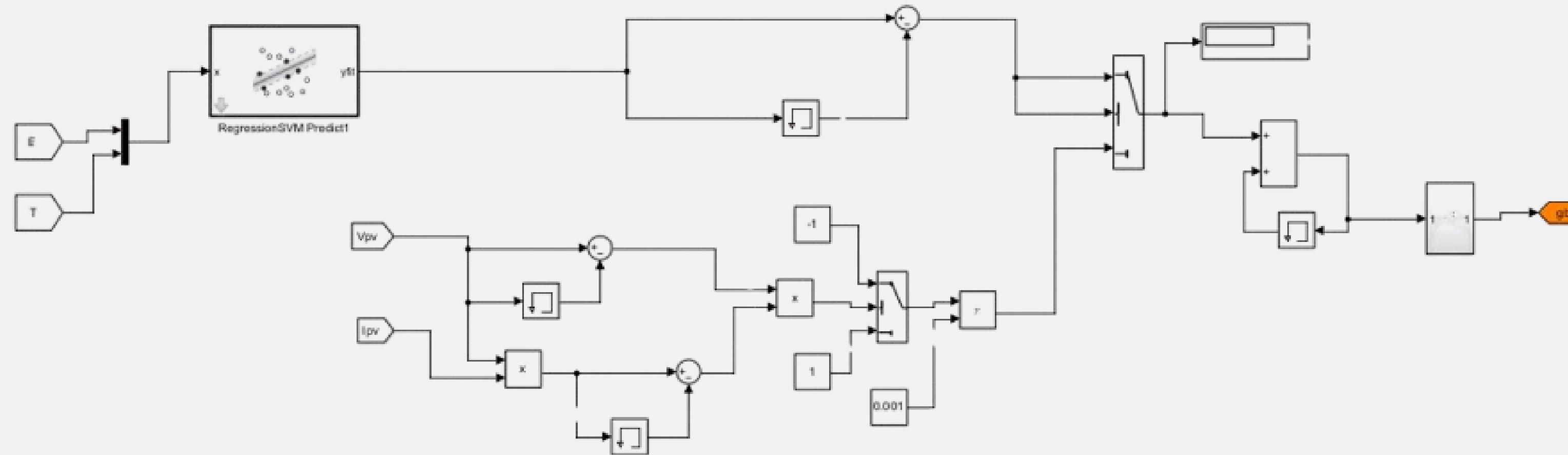
- **Logique de basculement:** Le système surveille les variations. Si les conditions changent brusquement, le SVR agit. Si les conditions sont stables, le P&O affine.

5 : Commande Hybride (SVR-P&O)

b-Implémentation Simulink

Modélisation : L'algorithme est implémenté avec une structure logique qui sélectionne le mode de fonctionnement (SVR ou P&O) en temps réel.

Schéma : Le modèle intègre le bloc de prédiction SVR en parallèle avec le bloc P&O. Une fonction de décision choisit quelle sortie envoyer au convertisseur.



5 : Commande Hybride (SVR-P&O)

C-Résultats et Interprétation

Rapidité (Temps de réponse) : Le système converge en seulement 20 ms. C'est aussi rapide que le SVR seul et bien plus performant que le P&O (**125 ms**).

Précision (Puissance) : La méthode atteint la puissance la plus élevée (**19 916.3 W**), corrigeant ainsi la légère erreur du SVR seul.

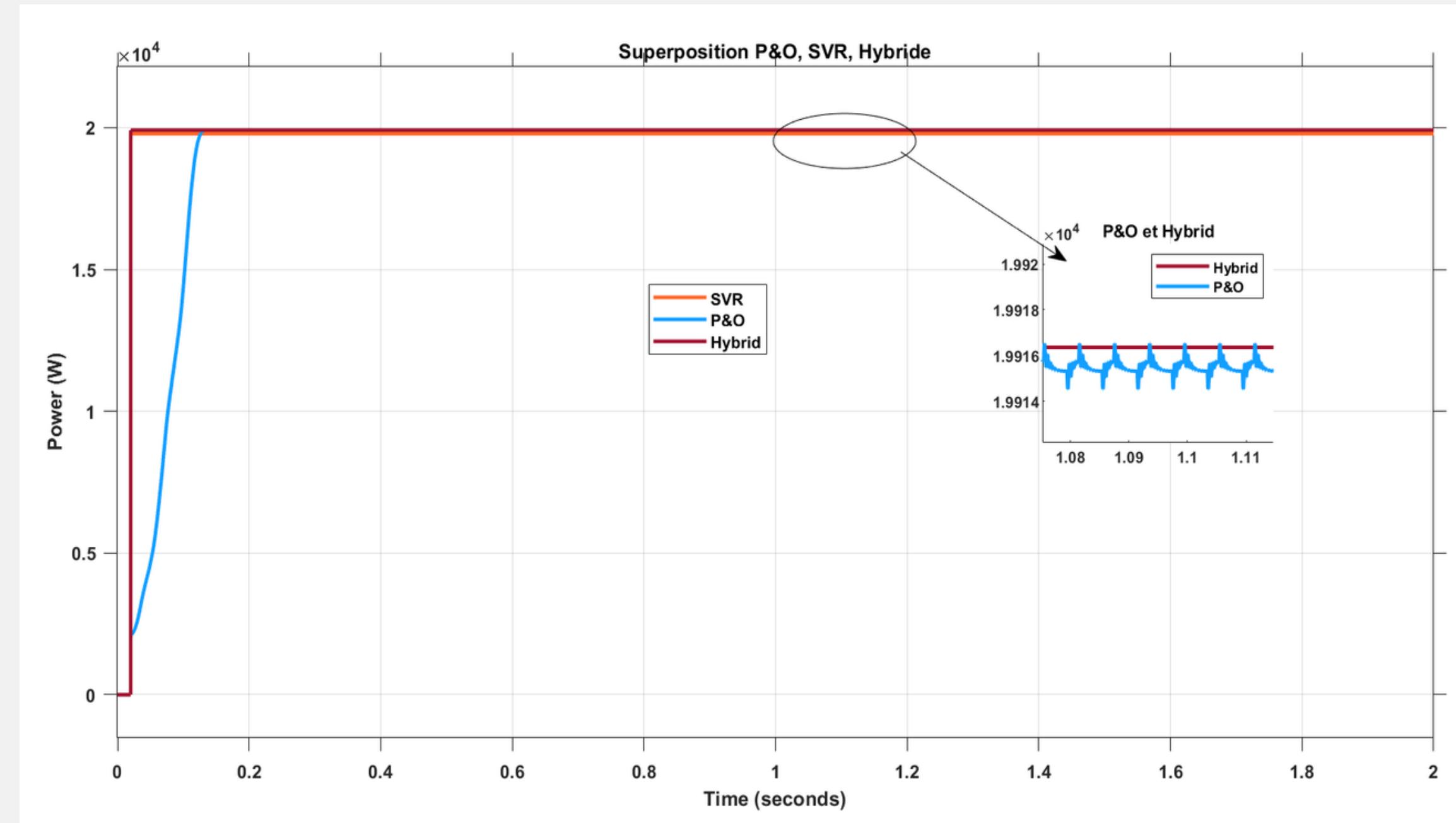
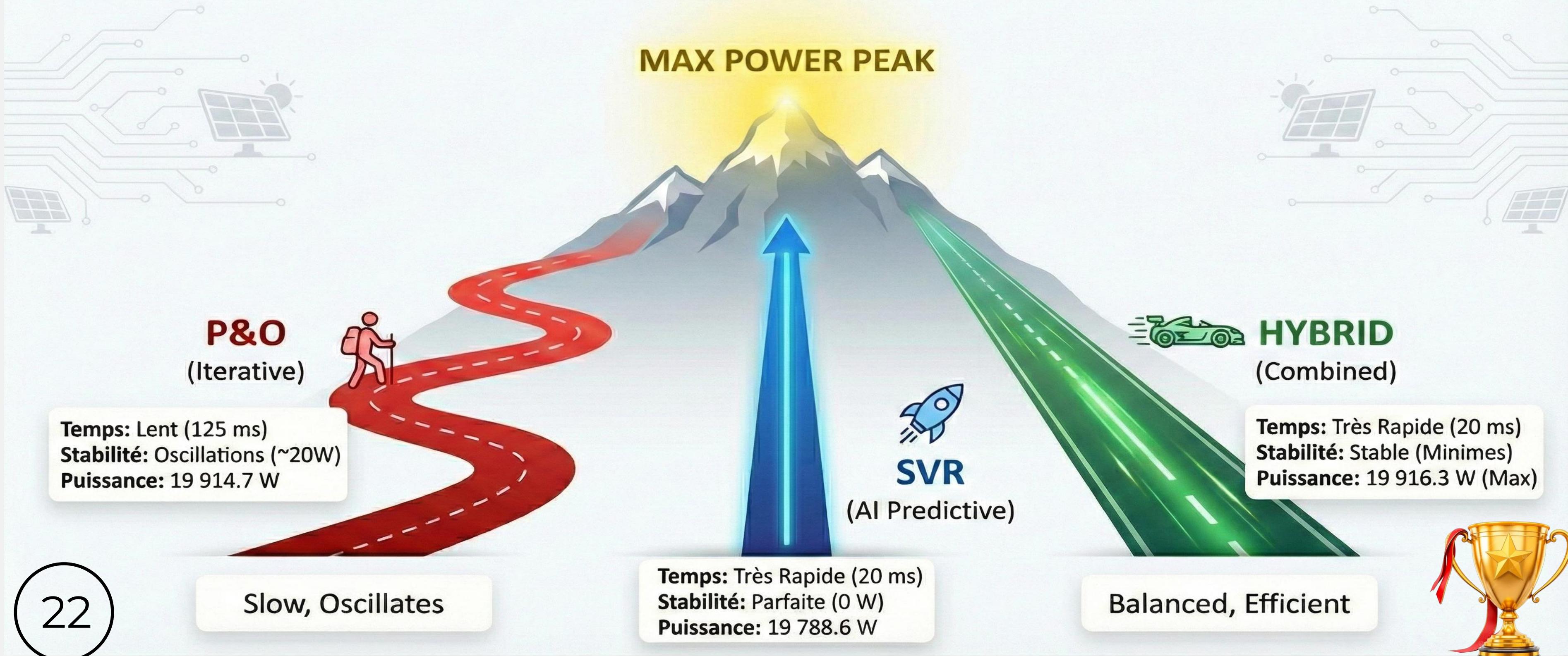
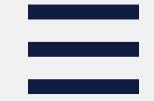


Figure 9 : Évaluation des performances de la commande hybride SVR-P&O face aux méthodes classiques)



Comparison of Control Strategies: P&O vs SVR vs Hybrid





6 : Conclusion et Perspectives

Bilan P&O : Méthode simple et peu coûteuse, mais limitée par sa lenteur (125 ms) et ses oscillations permanentes (perte de puissance).

Bilan SVR : Méthode très rapide (20 ms) et stable, mais dépendante de l'apprentissage et présentant parfois une petite erreur statique.

Perspectives :

- Implémentation de l'algorithme sur une cible matérielle réelle (carte DSP ou Arduino).
- Test de la robustesse face à des conditions d'ombrage partiel.

Conclusion Générale

La commande hybride SVR-P&O est le meilleur compromis. elle allie la vitesse de l'intelligence artificielle à la précision de l'algorithme classique pour maximiser le rendement global.

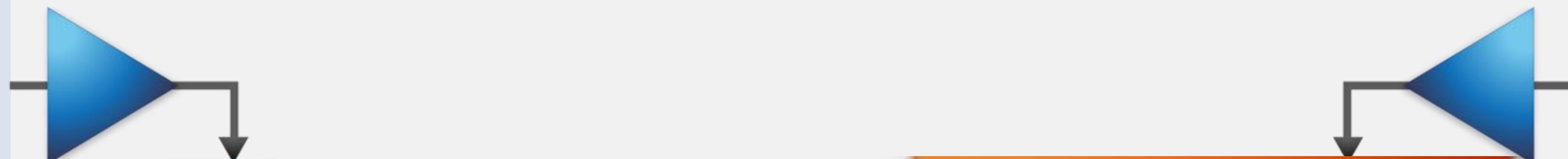
**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION**





Optimisation de l'extraction d'énergie photovoltaïque par commandes intelligentes et hybrides

Étude comparative et implémentation des algorithmes P&O, RNA, SVR et Hybride



Réalisé par : ABOURICH Ayoub

Encadré par : PR. AZZAM JAI Asmae

Filière : 5ème année Génie Électrique.
Option : Automatique, Robotique et Informatique
Industrielle.

Année Universitaire : 2025 - 2026.