



# Contribution à la modélisation et au contrôle de trajectoire de Trackers photovoltaïques à haute concentration (HCPV)

Mohamed Aymen Sahnoun

## ► To cite this version:

Mohamed Aymen Sahnoun. Contribution à la modélisation et au contrôle de trajectoire de Trackers photovoltaïques à haute concentration (HCPV). Automatique / Robotique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015. Français. <NNT : 2015ENAM0043>. <tel-01269847>

**HAL Id: tel-01269847**

**<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01269847>**

Submitted on 5 Feb 2016

**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.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

**Doctorat ParisTech**

**T H È S E**

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité " Automatique "**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Mohamed Aymen SAHNOUN**

le 18 décembre 2015

**Contribution à la modélisation et au contrôle de trajectoire de Trackers photovoltaïques à haute concentration (HCPV)**

Directeur de thèse : **Jean-Claude CARMONA**  
Co-encadrement de la thèse : **Julien GOMAND**

**Jury**

**M. Kouider Nacer M'SIRDI**, Professeur des universités, Université Aix-Marseille  
**M. Abdelaziz HAMZAoui**, Professeurs des universités, IUT Troyes  
**M. Frédéric GIRAUD**, Maître de conférences HDR, Université Lille1  
**M. Jean-Claude CARMONA**, Professeur des universités émérite, Arts et Métiers Paris Tech  
**M. Julien GOMAND**, Maître de conférences, Arts et Métiers Paris Tech  
**M. Yacin DE WELLE**, PDG, Optimum Tracker

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Invité

**T  
H  
È  
S  
E**



---

# *Résumé / Abstract*

---

## **CONTRIBUTION A LA MODELISATION ET AU CONTROLE DE TRAJECTOIRE DE TRACKER PHOTOVOLTAIQUES A HAUTE CONCENTRATION (HCPV)**

**RESUME :** Dans l'optique de maximisation de la production d'une part, et de réduction des coûts d'installation d'autre part, facilitant la maintenance et l'entretien des trackers solaires, équipés de modules photovoltaïques à haute concentration (HCPV), ces travaux de thèse se focalisent sur l'amélioration de la précision et la réduction du coût de la stratégie de génération de la trajectoire du tracker. Un simulateur de tracker HCPV est tout d'abord développé permettant une étude de l'influence de la performance du suivi du soleil sur la production des modules HCPV, ainsi que l'analyse et la comparaison des stratégies de génération de trajectoires. Ce simulateur est basé sur un modèle comportemental de module HCPV monté sur tracker permettant la prédiction de la puissance maximale du module HCPV en fonction de l'erreur de position du tracker face au soleil, de l'ensoleillement direct et de la température. Une première stratégie de commande dite de référence a été implémentée sur ce simulateur. C'est une commande hybride qui repose sur un viseur solaire pour corriger l'erreur de poursuite par un calcul astronomique. Ensuite, afin d'améliorer les performances et de réduire les coûts de mise en œuvre, une nouvelle approche sans capteur est développée s'appuyant sur une méthode d'optimisation du gradient de puissance pour la génération de la trajectoire du tracker. Dans la même optique, une étude est menée sur des algorithmes de recherche de la puissance maximale (MPPT) pouvant offrir des temps de réponse suffisamment rapides pour ne pas affecter la qualité de l'évaluation du gradient de puissance. Dans ce contexte, une commande MPPT P&O améliorée par un réseau de neurones à complexité réduite, est proposée, assurant un compromis entre précision, simplicité et rapidité.

**Mots clés :** Modules HCPV, Tracker HCPV à deux axes, Simulateur de tracker, Commande hybride, méthode du gradient, algorithme MPPT, réseau de neurones artificiels

## **CONTRIBUTION TO THE MODELING AND CONTROL OF HIGH CONCENTRATED PHOTOVOLTAIC TRACKER (HCPV)**

**ABSTRACT:** This work focuses on improving the accuracy and on reducing the cost of the tracker generating trajectory strategy, in order to maximize the production and to reduce the installation and the maintenance cost of a solar tracker orienting high concentrated photovoltaic modules (HCPV). Firstly, we propose a behavioral modeling of the HCPV module mounted on a dual axis tracker in order to study the influence of the tracking performance on the module power production. Then, this simulator is used to test different control strategies and to compare their performances. A classical control strategy is initially implemented in the simulator. It is based on a hybrid control operating an astronomical calculation to follow the sun path, and a sun sensor to correct the tracking error. Further, a sensorless strategy is proposed in order to reduce the cost of the HCPV tracker control. This strategy is based on a gradient optimization algorithm to generate the tracker trajectory and to catch the sun path. Tested on the simulator, this strategy presents the same accuracy as the classical strategy while being less costly. The last study proposed in this thesis work concerns maximum power point tracking (MPPT) algorithms, in order to answer to a given problem relating to the practical implementation of gradient algorithm. In this context, we propose an original optimization of the P&O MPPT control with a neural network algorithm leading to a significant reduction of the computational cost required to train it. This approach, ensuring a good compromise between accuracy and complexity is sufficiently fast not to affect the quality of the evaluation of the gradient.

**Keywords :** Dual axis tracker, HCPV module, HCPV tracker control, Hybrid control, Gradient optimization algorithm, Tracker simulator, MPPT algorithm, neural network

---

# *Remerciements*

---

Mes premiers remerciements vont d'abord à mes rapporteurs M. Abdelaziz Hamzaoui et M. Frédéric Giraud d'avoir accepté d'évaluer mes travaux, pour le temps qu'ils ont accordé à la lecture de cette thèse et à l'élaboration de leur rapport.

C'est également avec plaisir que je remercie M. Nacer M'sirdi d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Je mesure à sa juste valeur le temps qu'il m'a accordé.

Mes remerciements vont aussi à mon directeur de thèse Jean-Claude Carmona pour le temps qu'il m'a consacré et son engagement, pour les précieux conseils et la liberté qu'il m'a accordée au cours de ces années.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à mon Co-encadrant Julien Gomand pour son aide constant et minutieux tout au long du développement et de la rédaction de mon mémoire de thèse. Je le remercie aussi pour ses précieux conseils ainsi que sa patience lors des explications tout le long de la thèse.

Un immense merci à Yacin De Welle ainsi que toute l'équipe Optimum Tracker pour m'avoir bien accueilli et pour m'avoir permis de donner ces aspects industriel et pratique indispensables pour cette thèse CIFRE.

Je souhaite remercier les membres de l'équipe INSM et de l'ENSAM avec qui j'ai partagé d'agréables moments au cours de ces dernières années, avec une pensée toute particulière pour tous mes collègues doctorants.

Mes remerciements vont aussi à tous mes amis, qu'ils soient en France, en Tunisie ou ailleurs, et je sais qu'ils sont nombreux. Je souhaite remercier particulièrement mes amis à Aix qui ont

supporté mes humeurs, qui m'ont accompagné dans mes loisirs et qui m'ont soutenu tout le long de ma thèse.

J'exprime la plus profonde reconnaissance à mes parents *Kamel* et *Rim*, pour m'avoir donné leur confiance au moment de mon départ à l'étranger et pour m'avoir soutenu au cours de ces années. Je souhaite aussi remercier tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu tout au long de ces années de thèse, et plus particulièrement mon frère *Mourad* et ma sœur *Imen*.

Je remercie enfin une personne de très grande importance dans ma vie, qui m'accompagne et qui me soutient tout le temps par la force et l'énergie qui lui sont disponibles. Il s'agit de ma femme et de l'amour de ma vie *Nouha*. Je te remercie d'exister.

---

# Sommaire

---

Résumé / Abstract .....	i
Remerciements .....	iii
Sommaire .....	v
Liste des Figures .....	ix
Liste des Tableaux .....	xvii
Abréviations et Notations .....	xix
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Contexte et problématiques.....	5
I.1. Contexte énergétique.....	5
I.2. Problématique industrielle .....	10
I.3. Etat de l'art des modèles de module HCPV .....	11
I.3.1. Modèles empiriques à paramètres réduits .....	12
I.3.2. Modèles physiques comportementaux .....	13
I.3.3. Etude comparative des modèles de modules HCPV .....	15
I.4. Etat de l'art des stratégies de commande d'un tracker.....	17
I.4.1. Commande en boucle ouverte .....	18
I.4.2. Commande en boucle fermée.....	19
I.4.3. Commande hybride .....	19
I.4.4. Commande tenant compte de la consommation.....	21
I.5. Etat de l'art de la modélisation des trackers HCPV et PV .....	22
I.6. Problématique scientifique.....	26
I.7. Objectifs et contributions de la thèse .....	27
Chapitre II: Simulateur de comportement d'un tracker HCPV .....	29
II.1. Modèle du soleil .....	31
II.2. Modèle électromécanique asservi du tracker HCPV .....	31
II.2.1. Modèle dynamique de la machine asynchrone .....	32



---

II.2.2. Modèle mécanique du tracker.....	34
II.2.3. Tests de démarrage et d'asservissement de position de la machine asynchrone sur le simulateur.....	38
II.3. Modèle comportemental d'un module HCPV.....	39
II.3.1. Proposition de modèles comportementaux d'un module HCPV.....	40
II.3.2. Identification des paramètres des modèles comportementaux.....	42
II.3.3. Moyens expérimentaux et plans d'expériences.....	47
II.4. Conclusion.....	56
Chapitre III: Commande et stratégie de génération de trajectoire d'un tracker HCPV.....	59
III.1. Stratégie de commande de référence du tracker HCPV.....	60
III.2. Génération de trajectoire par un algorithme du gradient.....	63
III.2.1. Algorithme d'optimisation du « Gradient à pas optimal ».....	64
III.2.2. Application de la méthode du gradient pour une maximisation en temps réel.....	64
III.2.3. Simulation de l'algorithme de génération de trajectoire proposé.....	66
III.3. Conclusion : Intérêt et limitation de la stratégie de commande.....	78
Chapitre IV: Etude des algorithmes de recherche du point de puissance maximale d'un module PV.....	81
IV.1. Introduction.....	81
IV.2. Modélisation d'un module PV.....	82
IV.2.1. Etat de l'art des modèles de panneaux PV.....	82
IV.2.2. Modélisation et simulation d'un module PV.....	84
IV.2.3. Validation expérimentale du modèle.....	85
IV.3. Commandes MPPT.....	87
IV.3.1. Etat de l'art des commandes MPPT.....	88
IV.3.2. Proposition de commandes MPPT P&O améliorées.....	92
IV.3.3. Etude comparative de 4 commandes MPPT.....	95
IV.4. Conclusion.....	98
Conclusions Générales et Perspectives.....	101
V.1. Synthèse des travaux réalisés.....	101
V.1. Perspectives.....	104
Références Bibliographiques.....	107
Annexe 1- Démonstrateur Tracker HCPV de référence.....	113
Annexe 2- Détails du calcul astronomique.....	115
Annexe 3- Validation du calcul astronomique.....	119

---

Annexe 4- Description du simulateur de tracker HCPV .....	121
Annexe 5- Implémentation de la stratégie basée sur un algorithme du gradient sur le simulateur .....	125
Annexe 6- Résultats de simulation des modèles comportementaux du module HCPV.....	133
Annexe 7- Architecture et caractéristiques de la carte dSpace 1104.....	139
Annexe 8- Simulation du module PV .....	141
Annexe 9- Validation expérimentale du modèle de panneau photovoltaïque .....	143



---

# Liste des Figures

---

Figure 1- Système photovoltaïque à base de lentilles de Fresnel (Energy, 2013).....	6
Figure 2- Système photovoltaïque à base de miroir parabolique (Energy, 2013) .....	6
Figure 3- Trajectoire du soleil (Enertech) .....	6
Figure 4- Tracker solaire double axes (IEC62817, 2014) .....	6
Figure 5- Carte mondiale de l'insolation directe (SolarGIS, 2013).....	7
Figure 6- Les grandes centrales CPV dans le monde .....	8
Figure 7- Les Mégawatts de CPV installés dans différents pays (S.P Philipps, 2015) .....	8
Figure 8- Evolution du prix du baril de pétrole (Prix-du-baril, 2015).....	9
Figure 9- Evolution du rendement des cellules, des modules et des systèmes CPV (S.P Philipps, 2015) .....	9
Figure 10- Evolution du LCOE des centrales PV, CSP et CPV pour une irradiation solaire élevée de 2000 kWh / (m <sup>2</sup> ) - 2500 kWh / (m <sup>2</sup> ) (S.P Philipps, 2015).....	9
Figure 11- Schéma d'un système PV à concentration à optique de Fresnel avec point de focalisation (IEC62108, 2007).....	11
Figure 12- Schéma d'un récepteur solaire HCPV intégré au point focalisé de la lentille de Fresnel. (P.Rodrigo, 2013).....	11
Figure 13- Erreur de suivi du soleil.....	12
Figure 14- Illustration d'un modèle de prédiction d'un module HCPV par approche par réseau de neurones (d'après (Rivera AJ, 2013)) .....	13
Figure 15- Schéma du modèle de module HCPV (d'après (Steiner M, 2012)).....	14
Figure 16- Schéma détaillé du modèle de module HCPV proposé par (Steiner M, 2012).....	15
Figure 17- Schéma synoptique de commande d'un tracker HCPV .....	18
Figure 18- Commande en boucle ouverte d'un tracker PV .....	18
Figure 19- Commande en boucle fermée d'un tracker .....	19
Figure 20- Commande hybride d'un tracker doubles axes (F.R.Rubio, 2007).....	20
Figure 21- Analyse de la constitution de la partie viseur et référence de la commande hybride .....	20

Figure 22- Génération de trajectoire discontinue (F.R.Rubio, 2007).....	21
Figure 23- Génération de trajectoire discontinue basée sur l'optimisation de l'intervalle accessible d'angle d'élévation et du pas de discrétisation (S.SEME, 2011) .....	22
Figure 24- Etude comparative de l'énergie produite et consommée par le tracker pour chaque valeur d'intervalle d'angle d'élévation (C.Alexandru, 2009).....	22
Figure 25- Modélisation d'un tracker PV et de sa commande (d'après (N.Tatu, 2012)) .....	23
Figure 26- Modèle d'une centrale PV fixe, sur tracker 1 ou 2 axes (d'après (T.Maatallah, 2011)).....	24
Figure 27- Modèle d'un tracker PV sous Simulink (d'après (C.S.Chin, 2011)) .....	25
Figure 28- Esquisse d'un modèle de tracker HCPV .....	26
Figure 29- Objectifs de la thèse.....	28
Figure 30- Schéma synoptique du modèle de tracker HCPV proposé .....	30
Figure 31- Modèle du soleil .....	31
Figure 32- Démonstrateur « Tracker HCPV » .....	32
Figure 33- Modèle électromécanique asservi du tracker HCPV .....	33
Figure 34- Rampe d'accélération et de décélération du variateur de vitesse (DIGIDRIVE-SK, 2008) 34	
Figure 35- Illustration de la conception mécanique du tracker (Axe d'élévation) .....	35
Figure 36- Forme simplifiée (parallépipède rectangle) pour l'estimation des inerties.....	37
Figure 37- Axe d'azimut du tracker .....	37
Figure 38 - Simulation du démarrage d'une machine asynchrone triphasée soumise à une rampe de fréquence de 0 à 50Hz en 1s.....	39
Figure 39 - Réponses indicelle d'un axe du tracker asservi en position .....	40
Figure 40- Schéma synoptique du modèle comportementale d'un module HCPV .....	41
Figure 41- Illustration de l'erreur de position en azimut et en élévation du tracker par rapport au soleil .....	41
Figure 42- Modèle comportemental basé sur une fonction gaussienne d'un module HCPV : a) Puissance en fonction de l'erreur de suivi b) Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation .....	43
Figure 43- Modèle comportemental basé sur une fonction cosinus d'un module HCPV: a) Puissance en fonction de l'erreur de suivi b) Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation .....	43
Figure 44- Modèle comportemental basé sur une fonction polynomiale d'un module HCPV: a) Puissance en fonction de l'erreur de suivi b) Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation .....	44

---

Figure 45- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles gaussien , cosinus et polynomial comparées avec les points expérimentaux .....	45
Figure 46- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles combinés cosinus-polynomial et polynomial-polynomial comparées avec les points expérimentaux .	45
Figure 47- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné polynomial-polynomial comparées avec les points expérimentaux .....	46
Figure 48- Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation : Modèle combiné polynomial-polynomial.....	47
Figure 49- Architecture de la plateforme d'expérimentation .....	48
Figure 50- Evolution de l'ensoleillement global, de la position du tracker et de la position du soleil sur une journée .....	49
Figure 51- Trajectoire 1 du soleil et du tracker : (a) Azimut (b) Elévation.....	50
Figure 52- Nuage de point du plan d'expérience 1 dans le plan des erreurs de position .....	51
Figure 53- Caractéristique de puissance (%) du module HCPV reconstruite avec le modèle polynomial pour le plan d'expérience 1 .....	51
Figure 54- Trajectoire 2 du soleil et du tracker : (a) Azimut (b) Elévation.....	51
Figure 55- Nuage de point du plan d'expérience 2 dans le plan des erreurs de position .....	52
Figure 56- Caractéristique de puissance (%) du module HCPV reconstruite avec le modèle polynomial pour le plan d'expérience 2 .....	52
Figure 57- Trajectoire 3 du soleil et du tracker : (a) Azimut (b) Elévation.....	52
Figure 58- Nuage de point du plan d'expérience 3 dans le plan des erreurs de position .....	52
Figure 59- Caractéristique de puissance (%) du module HCPV reconstruite avec le modèle polynomial pour le plan d'expérience 3 .....	52
Figure 60- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi en azimut pour le modèle combiné polynomial-polynomial comparées avec les mesures expérimentales prise sur le prototype tracker HCPV à deux axes.....	55
Figure 61- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi en élévation pour le modèle combiné polynomial-polynomial comparées avec les mesures expérimentales prise sur le prototype tracker HCPV à deux axes .....	55
Figure 62- Puissance (%) en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation : Modèle combiné polynomial-polynomial .....	56
Figure 63- Caractéristique de la puissance (%) en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation, construite à partir des points expérimentaux .....	56
Figure 64- Stratégie de commande de référence du tracker CPV .....	60
Figure 65- Trajectoire du tracker CPV générée par la stratégie de commande de référence .....	60

Figure 66- Algorithme de la commande hybride de référence du tracker CPV .....	61
Figure 67- Résultats de simulation de la stratégie de commande de référence : Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance perdue par le module HCPV (d).....	62
Figure 68- Caractéristique de la puissance du module en fonction de l'erreur de position pour un ensoleillement et une température fixes .....	63
Figure 69- Algorithme de la commande de basée sur la méthode d'optimisation du gradient .....	65
Figure 70- Recherche de la puissance maximale du module HCVP par la méthode du gradient .....	66
Figure 71- Schéma du simulateur du tracker HCPV avec une stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient.....	67
Figure 72- Première version de l'algorithme de la stratégie de commande basée sur un algorithme de gradient.....	68
Figure 73- Résultats de simulation de la stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient: Trajectoire du tracker en azimut(a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d) .....	68
Figure 74- Détail de la Figure 73 .....	69
Figure 75- Résultats de simulation de la stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient avec une variation de l'ensoleillement direct: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV et ensoleillement direct (DNI) (d).....	70
Figure 76- Principe de l'évaluation du gradient : Cas idéal (a) Cas réel (b) .....	71
Figure 77- Résultats du diagnostic de l'évaluation du gradient .....	71
Figure 78- Deuxième version de l'algorithme de la stratégie basée sur la méthode du gradient .....	72
Figure 79- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient: Trajectoire du tracker en azimut(a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d).....	73
Figure 80- Résultats du diagnostic de la deuxième version de l'évaluation du gradient.....	74
Figure 81- Représentation plus réaliste du comportement du tracker durant l'évaluation du gradient de puissance .....	74
Figure 82- Diagnostic de l'évaluation du gradient pour 4 points de départ différents .....	75
Figure 83- Choix des 4 points de départ en fonction de la puissance de départ qui en résulte .....	76
Figure 84- Diagnostic de l'évaluation du gradient pour 4 points de départ différents : Du plus proche au plus loin de la position initiale du soleil .....	77
Figure 85- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ $(A0, h0) = (-5, 22.5)$ donnant une puissance $(P2)$ proche du maximum: Trajectoire du tracker en azimut(a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d).....	78

Figure 86- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ $(A_0, h_0) = (-4, 21.5)$ donnant une puissance nulle ( $P_4$ ) : Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d).....	79
Figure 87- Trackers à petites dimensions proposés par (J.Foresi, 2015).....	79
Figure 88- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode .....	82
Figure 89- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode .....	83
Figure 90- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à double-diode.....	83
Figure 91- Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ simulées SF125x125-72-M(L) avec un ensoleillement de $1000\text{W/m}^2$ et une température de $25^\circ\text{C}$ pour un panneau.....	85
Figure 92- Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ simulées avec un ensoleillement de $301\text{W/m}^2$ et une température de $21.5^\circ\text{C}$ .....	86
Figure 93- Relevé des caractéristiques expérimentales $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ du panneau (Labview) ( $301\text{W/m}^2$ , $21.5^\circ\text{C}$ ) .....	86
Figure 94- Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ expérimentales et simulées ( $301\text{W/m}^2$ , $21.5^\circ\text{C}$ ) .	87
Figure 95- Variation du point de puissance maximale en fonction de l'ensoleillement (a) et de la charge (b) (M.F.Yaden, 2007).....	88
Figure 96- Principe de la commande MPPT .....	88
Figure 97- Algorithme de la commande P&O (C.Cabal, 2008).....	89
Figure 98- Caractéristique de puissance d'un panneau photovoltaïque (C.Cabal, 2008).....	89
Figure 99- Asservissement de tension.....	90
Figure 100- Asservissement de courant .....	90
Figure 101- Exemple de commande MPPT floue .....	91
Figure 102- Convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT neuronale .....	92
Figure 103- Principe de la commande P&O optimisée avec un réseau de neurones .....	94
Figure 104- Architecture à complexité réduite du réseau de neurones .....	94
Figure 105- Evolution de la puissance $P_{pv}$ des 4 algorithmes P&O étudiés .....	96
Figure 106- Evolution de la variable de perturbation de la tension $\Delta V$ des 4 algorithmes P&O traitées dans cette étude .....	96
Figure 107- Evolution de l'ensoleillement global et de la puissance $P_{pv}$ pour la commande P&O classique et la commande P&O améliorée avec un algorithme de réseau de neurones.....	97



Figure 108- Tracker HCPV à deux axes : Démonstrateur de référence .....	113
Figure 109- Simulateur de Tracker HCPV : Stratégie de commande de référence .....	121
Figure 110- Bloc du modèle électromécanique asservi : Axe d'élévation .....	122
Figure 111- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle du variateur de vitesse et des transformations biphasées .....	122
Figure 112- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle dynamique de la machine asynchrone et transformation de Park .....	122
Figure 113- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle dynamique de la machine asynchrone (Calcul du couple électromécanique) .....	123
Figure 114- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle rigide de la structure mécanique du tracker .....	123
Figure 115- Bloc du modèle comportemental du module HCPV : Prédiction de la puissance maximale du module à partir de l'erreur de position, de l'ensoleillement et de la température .....	123
Figure 116- Bloc du modèle du soleil : Génération de la position théorique du soleil et des paramètres atmosphériques (Ensoleillement et température) .....	124
Figure 117- Bloc de stratégie de commande du tracker : Algorithme de la stratégie de commande de référence .....	124
Figure 118- Simulateur de Tracker HCPV : Stratégie de commande basée sur la méthode d'optimisation du gradient .....	125
Figure 119- Machine d'état du développement de la première version de la stratégie de commande basée sur la méthode d'optimisation du gradient sous Simulink .....	126
Figure 120- Machine d'état du développement de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur la méthode d'optimisation du gradient sous Simulink .....	126
Figure 121- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ $(A_0, h_0) = (-4.681, 22.1)$ en avance en azimut et en retard en élévation par rapport à la position initiale du soleil: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d) .....	127
Figure 122- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ $(A_0, h_0) = (-5.879, 23.38)$ en retard en azimut et en avance en élévation par rapport à la position initiale du soleil: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d) .....	128
Figure 123- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ $(A_0, h_0) = (-4.681, 23.38)$ en avance en azimut et en avance en élévation par rapport à la position initiale du soleil: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d) .....	129
Figure 124- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ $(A_0, h_0) = (-5.879, 22.1)$ en retard en azimut et en retard en	

élévation par rapport à la position initiale du soleil:Trajectoire du tracker en azimut(a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d).....	130
Figure 125- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ $(A_0, h_0) = (-5, 22.5)$ donnant une puissance $(P_3)$ proche de 0: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d) .....	131
Figure 126- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle Cosinus comparées avec les points expérimentaux.....	133
Figure 127- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle Gaussien comparée avec les points expérimentaux.....	134
Figure 128- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle polynomial comparée avec les points expérimentaux .....	134
Figure 129- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné cosinus-cosinus comparée avec les points expérimentaux .....	134
Figure 130- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné Gaussien-Gaussien comparée avec les points expérimentaux.....	135
Figure 131- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné Cosinus-Gaussien comparée avec les points expérimentaux .....	135
Figure 132- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné Gaussien-Cosinus comparée avec les points expérimentaux .....	135
Figure 133- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Cosinus.....	136
Figure 134- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Gaussien .....	136
Figure 135- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Cosinus-Gaussien .....	136
Figure 136- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Gaussien-Cosinus .....	137
Figure 137- Caractéristique Puissance en fonction de l'erreur de suivi azimut et élévation : Mesures expérimentales.....	137
Figure 138- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles cosinus, gaussien et le modèle combiné cosinus gaussien comparées avec les points expérimentaux	137
Figure 139- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles combinés cosinus-cosinus, gaussien gaussien et cosinus-gaussien comparées avec les points expérimentaux .....	138
Figure 140- Modèle de simulation du panneau photovoltaïque .....	141
Figure 141- Plateforme de simulation de la commande P&O améliorée par un réseau de neurones..	141

Figure 142- Dispositif expérimental de la validation du modèle de panneau photovoltaïque .....	143
Figure 143- Pyranomètre CMP 11 de chez Kipp & Zonen .....	143
Figure 144- Capteur de température pt100.....	143

---

# Liste des Tableaux

---

Tableau 1- Comparaison des caractéristiques des modèles de modules HCPV : Grandeurs d'entrée (d'après (P.Rodrigo, 2013)).....	16
Tableau 2- Comparaison des caractéristiques des modèles de modules HCPV : Les principaux avantages .....	17
Tableau 3- Erreurs entre les mesures expérimentales et les valeurs simulées de Pmax d'un module HCPV données par les différents auteurs (d'après (P.Rodrigo, 2013)).....	17
Tableau 4 MSE, RMSE et erreur MAX des modèles simulés.....	46
Tableau 5 Comparatif des deux plans d'expériences .....	53
Tableau 6 Caractéristique du module Sharp série NU48 sous les conditions standards (1000W/m2 et 25°C) .....	84
Tableau 7 Estimation du temps de réponse des 4 algorithmes MPPT proposés dans cette étude .....	98



---

# Abréviations et Notations

---

## Abréviations

AM	Masse d'air
AOD	Epaisseur optique de l'aérosol
APE	Energie photonique moyenne
CPV	Photovoltaïque à concentration
CR	Taux de concentration du module CPV
DNI	Direct normal Irradiance : Ensoleillement direct
HCPV	Photovoltaïque à haute concentration
LCPV	Photovoltaïque à basse concentration
MPPT	Maximum power point tracking : recherche du maximum de puissance
MSE	Mean square error : Erreur quadratique moyenne
P&O	Perturb and observe : Commande de Perturbation et Observation
PPM	Point de puissance maximale
PW	Précipitations
RMSE	Racine carré de l'erreur quadratique moyenne
RDN	Réseau de neurones
SPH	Photo-courant de la sous cellule
Tair	Température ambiante
WS	Wind speed : vitesse du vent

## Notations chapitre 1

$\varepsilon_T$	Erreur de tracking [°]
$\sigma_p$	Coefficient de température de la puissance maximale d'un module HCPV [W/K]
$DNI^*$	Ensoleillement direct dans les conditions standards [W/m <sup>2</sup> ]
$E_c$	Energie consommée par un tracker [kWh]
$E_{pv}$	Energie produite par un module PV monté sur tracker [kWh]
$E_{PVideal}$	Energie idéale produite par un module PV monté sur tracker dans le cas d'un suivi continu [kWh]
$G$	L'ensoleillement par unité de surface [W/m <sup>2</sup> ]
$I_s$	Spectre incident
$q$	Critère d'optimisation utilisé pour la stratégie de commande du tracker ayant un objectif de maximisation de l'ensoleillement et minimisation de la consommation
$T_c$	Température d'une cellule photovoltaïque [K]

## Notations chapitre 2

$\sigma$	Coefficient de dispersion (Modèle de la machine asynchrone)
$\tau_{mec}$	Constante de temps mécanique [s]
$\phi_{rd}$	Flux rotorique dans le repère d'axe d-q : axe d (Modèle de la machine asynchrone) [wb]
$\phi_{rq}$	Flux rotorique dans le repère d'axe d-q : axe q (Modèle de la machine asynchrone) [wb]
$\Omega_m$	Vitesse de rotation du moteur [rad/s]
$\Omega_1$	Vitesse de rotation après le 1 <sup>er</sup> étage de réduction [rad/s]
$\Omega_2$	Vitesse de rotation après le 2 <sup>ème</sup> étage de réduction [rad/s]
$\Omega_3$	Vitesse de rotation après le 3 <sup>ème</sup> étage de réduction [rad/s]
$A$	Position en azimut du tracker [°]
$A_s$	Position du soleil en azimut (calcul astronomique) [°]
$C_r$	Couple résistant [Nm]
$Cr_{Azimut}$	Couple résistant pour le mouvement en azimut [Nm]
$Cr_{élévation}$	Couple résistant pour le mouvement en élévation [Nm]
$d$	distance entre le centre de gravité et le centre de la rotation du tracker
$f_{eq}$	Coefficient de frottement équivalent du système mécanique [Nm/rad/s]
$f_0$	Coefficient de frottement en sortie du moteur [Nm/rad/s]
$f_1$	Coefficient de frottement en sortie du motoréducteur [Nm/rad/s]
$f_2$	Coefficient de frottement en sortie de la roue et vis sans fin [Nm/rad/s]
$f_3$	Coefficient de frottement en sortie du pignon [Nm/rad/s]
$g$	Intensité de la pesanteur (9,81 N/ kg)
$h$	Position en élévation du tracker [°]
$h_s$	Position du soleil en élévation (calcul astronomique) [°]
$I_{rd}$	Courant rotorique dans le repère d'axe d-q : axe d (Modèle de la machine asynchrone) [A]
$I_{rq}$	Courant rotorique dans le repère d'axe d-q : axe q (Modèle de la machine asynchrone) [A]
$I_{sd}$	Courant statorique dans le repère d'axe d-q : axe d (Modèle de la machine asynchrone) [A]
$I_{sq}$	Courant statorique dans le repère d'axe d-q : axe q (Modèle de la machine asynchrone) [A]
$J_{eq}$	Inertie équivalente ramenée à l'arbre du moteur [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_0$	Inertie en sortie du moteur [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_1$	Inertie en sortie du motoréducteur [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_2$	Inertie en sortie de la roue et visse sans fin [Kg.m <sup>2</sup> ]
$J_3$	Inertie en sortie du pignon [Kg.m <sup>2</sup> ]
$K_p$	Coefficient proportionnel d'un régulateur PID
$K_{r1}$	Rapport de réduction du motoréducteur
$K_{r2}$	Rapport de réduction de la roue et vis sans fin
$K_{r3}$	Rapport de réduction du pignon

---

$L_r$	Inductance cyclique rotorique (Modèle de la machine asynchrone) [H]
$L_s$	Inductance cyclique statorique (Modèle de la machine asynchrone) [H]
$M$	Inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (Modèle de la machine asynchrone) [H]
$m_{plateau+modules}$	Masse du plateau et des modules du tracker HCPV [Kg]
$m_{tourelle}$	Masse de la tourelle du tracker HCPV [Kg]
$p$	Nombre de paires de pôles (Modèle de la machine asynchrone)
$P^*$	Puissance maximale du module HCPV dans les conditions standards (Caractéristique technique) [W]
$P_{HCPV}$	Puissance produite par le module HCPV en fonction de l'ensoleillement, la température et l'erreur de position [W]
$P_{HCPV\_max}$	Puissance maximale du module HCPV en fonction de l'ensoleillement et la température [W]
$P_{max}$	Puissance calculée par l'algorithme MPPT de l'onduleur [W]
$R_s$	Résistance propre d'une phase statorique (Modèle de la machine asynchrone) [ $\Omega$ ]
$T_{air}^*$	Température de l'air dans les conditions standards (Caractéristique technique) [K]
$T_i$	Coefficient intégral d'un régulateur PID
$T_r$	Constante de temps rotorique (Modèle de la machine asynchrone)
$T_s$	Coefficient dérivé d'un régulateur PID
$V_{sd}$	Tension statorique dans le repère d'axe d-q : axe d (Modèle de la machine asynchrone) [V]
$V_{sq}$	Tension statorique dans le repère d'axe d-q : axe q (Modèle de la machine asynchrone) [V]
$W_{Jeq}$	Energie cinétique [J]
$W_r$	Pulsation électrique rotorique (Modèle de la machine asynchrone) [rad/s]
$W_s$	Pulsation électrique statorique (Modèle de la machine asynchrone) [rad/s]



### Notations chapitre 3

$\alpha$	Le pas optimal de déplacement dans la direction du gradient évalué
$\beta_A$	Déplacement sur l'axe d'azimut pour évaluer le gradient de puissance [°]
$\beta_h$	Déplacement sur l'axe d'élévation pour évaluer le gradient de puissance [°]
$\Delta A$	Valeur d'anticipation du mouvement du tracker (stratégie de référence pour la génération de la trajectoire du tracker) [°]
$\varepsilon_A$	Erreur de position d'azimut (entre la position théorique donnée par le calcul astronomique et la position réelle du tracker corrigée par un viseur solaire) [°]
$\varepsilon_h$	Erreur de position d'élévation (entre la position théorique donnée par le calcul astronomique et la position réelle du tracker corrigée par un viseur solaire) [°]
$dP(A^k)$	Gradient de puissance évalué en azimut [W/°]
$dP(h^k)$	Gradient de puissance évalué en élévation [W/°]
$A$	Position en azimut du tracker [°]
$A_r$	Position réelle du tracker en azimut [°]
$A_s$	Position du soleil en azimut (calcul astronomique) [°]
$A_{td}$	Position du soleil au début de l'évaluation du gradient (Azimut) [°]
$A_{tf}$	Position du soleil à la fin de l'évaluation du gradient (Azimut) [°]
$DNI^*$	Ensoleillement direct dans les conditions standards [W/m <sup>2</sup> ]
$EA_{vraie}$	Erreur de position (azimut) du tracker est corrigée par le retour du viseur solaire [°]
$Eh_{vraie}$	Erreur de position (élévation) du tracker est corrigée par le retour du viseur solaire [°]
$h$	Position en élévation du tracker [°]
$h_r$	Position réelle du tracker en élévation [°]
$h_s$	Position du soleil en élévation (calcul astronomique) [°]
$h_{td}$	Position du soleil au début de l'évaluation du gradient (Elévation) [°]
$h_{tf}$	Position du soleil à la fin de l'évaluation du gradient (Elévation) [°]
$N$	Nombre de points de mesure de la puissance d'un module HCPV
$P_{\Delta A}$	Puissance du module HCPV mesurée après un déplacement en azimut [W]
$P_{\Delta AR}$	Puissance du module HCPV mesurée, à une position réelle, après un déplacement en azimut [W]
$P_{\Delta h}$	Puissance du module HCPV mesurée après un déplacement en élévation [W]
$P_{\Delta hR}$	Puissance du module HCPV mesurée, à une position réelle, après un déplacement en élévation [W]
$P_{HCPV}$	Puissance produite par le module HCPV [W]
$P_{max}$	Puissance calculée par l'algorithme de recherche de la puissance maximale (implémenté dans l'onduleur) (W)
$Se$	Seuil de l'erreur déclenchant le mouvement du tracker (stratégie de référence pour la génération de la trajectoire du tracker) [°]

## Notations chapitre 4

$a$	Le facteur d'idéalité de la diode ( $1 < a < 1.5$ )
$\Delta V$	Valeur de perturbation de la tension (commande MPPT P&O) [V]
$G$	Ensoleillement par unité de surface [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$G_n$	Puissance de l'éclairement nominal [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$I_0$	Courant de saturation inverse de la diode [A]
$I_{cc}$	Courant de court-circuit du panneau photovoltaïque [A]
$I_d$	Courant de la diode introduit par l'équation de Shockley [A]
$I_{mpp}$	Courant au point de puissance maximale du panneau photovoltaïque [A]
$I_{pv}$	Courant généré par le panneau photovoltaïque [A]
$I_{pv0}$	Photo-courant créé par le rayonnement solaire [A]
$I_{pvn}$	Le photo-courant nominal [A]
$I_{scn}$	Le courant nominal de court-circuit [A]
$K$	La constante de Boltzmann ( $1.3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K)
$K_i$	Coefficient de température de $I_{sc}$ [A/K]
$K_v$	Coefficient de température de $V_{oc}$ [V/K]
$N_s$	Nombre de cellules en série du module PV
$P_{pv}$	Puissance fournie par le panneau photovoltaïque [W]
$q$	La charge de l'électron ( $1.60217646 \cdot 10^{-19}$ C)
$R_p$	Résistance parallèle du module photovoltaïque : fuite des courants de la jonction P-N [ $\Omega$ ]
$R_s$	Résistance en série du module photovoltaïque : ensemble des contacts ohmiques [ $\Omega$ ]
$T$	la température ambiante en Kelvin [K]
$T_n$	Température nominale [K]
$V_{mpp}$	Tension au point de puissance maximale du panneau photovoltaïque [V]
$V_{oc}$	Tension à vide du panneau photovoltaïque [V]
$V_{scn}$	La tension à vide nominale [V]
$V_{pv}$	Tension générée par le panneau photovoltaïque [V]
$V_t$	Le potentiel thermique [V]



---

# Introduction générale

---

Dans un contexte énergétique et économique difficile, les attentes en termes d'énergies renouvelables en général et d'énergie solaire en particulier, sont de plus en plus importantes. Les enjeux majeurs des chercheurs et des industriels dans ce domaine sont d'augmenter le rendement et de diminuer les coûts des cellules, des modules et des systèmes photovoltaïques afin de les rendre les plus compétitifs possible. Dans ces travaux de thèse nous nous intéressons à une technologie particulière des systèmes photovoltaïques appelée photovoltaïque à concentration (CPV) ou photovoltaïque à haute concentration (HCPV). Ces systèmes HCPV nécessitent l'utilisation de suiveurs solaires appelés aussi « trackers » qui permettent d'orienter les modules HCPV tout au long de la journée afin de maximiser l'ensoleillement et d'augmenter la productivité. Dans cette optique de maximisation de la production et de réduction des coûts d'installation, de maintenance et d'entretien des trackers HCPV, nos travaux de recherche sont focalisés sur l'amélioration de la précision et la réduction du coût de la commande de suivi de la course du soleil. Ces problématiques de commande nous mènent aussi à des problématiques de modélisation et de développement d'un simulateur de l'ensemble formé par un tracker et ses modules HCPV dans un objectif de simulation, de validation et de comparaison des différentes stratégies de commandes proposées.

Ces travaux de thèse ont été effectués dans le cadre d'une collaboration entre la société Optimum Tracker et l'équipe Ingénierie Numérique des Systèmes Mécaniques (INSM) du Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS). L'objectif principal de ces travaux de recherche est de travailler sur la modélisation d'une source photovoltaïque à haute concentration (HCPV) ainsi que la modélisation et la commande d'un système dynamique et multi-physique tel que le tracker HCPV.

Le contexte général suivi des problématiques industrielles et scientifiques de ces travaux sont l'objet du premier chapitre. Ce chapitre explique le contexte économique et énergétique autour de ces travaux ainsi que la motivation de cette étude en dégageant les problématiques industrielles liées aux travaux de l'entreprise. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à une synthèse bibliographique des sujets liés aux principaux objectifs des travaux de thèse, à savoir la modélisation et la commande des trackers HCPV. Un premier état de l'art est dédié à la modélisation d'un module HCPV principalement dans le but de pouvoir prédire la puissance d'un module en fonction des paramètres atmosphériques et surtout en fonction de l'erreur de suivi de la trajectoire du soleil (ou encore l'erreur entre la position théorique du tracker fournie par un calcul astronomique et la position réelle du tracker). Une deuxième partie est consacrée à l'étude des différentes stratégies de commande

des trackers HCPV. Le troisième volet de cette synthèse bibliographique est dédié à la modélisation des trackers solaires (PV et HCPV) afin de développer un simulateur de tracker HCPV capable de tester et de comparer les différentes stratégies de commande proposées dans ce mémoire. La synthèse bibliographique proposée met en évidence les problématiques scientifiques de recherche liées à ces travaux de thèse.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation d'un tracker HCPV et de son environnement afin de proposer un simulateur de l'ensemble. Le cahier des charges du simulateur est tout d'abord défini, afin de permettre d'étudier l'évolution de la puissance produite par le module HCPV, pour une période et une zone géographique de fonctionnement donnée, en fonction des paramètres atmosphériques et de la performance de suivi qui résulte de la stratégie de commande adoptée. Cette définition est suivie de la modélisation de chacun des systèmes composant ce simulateur. En effet, le premier élément du simulateur est un modèle de génération des données atmosphériques et des données théoriques de la position du tracker correspondant à la trajectoire du soleil. Le deuxième élément est un modèle électromécanique du tracker asservi permettant de calculer la position réelle du tracker en tenant compte du comportement dynamique électrique de l'actionneur et du comportement dynamique mécanique du tracker. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la modélisation « comportementale » du module HCPV. L'objectif de cette modélisation est en effet de caractériser la puissance maximale produite par le module en fonction des données atmosphériques et des performances de suivi souhaitées, ce qui permettra par la suite de tester les performances des différentes stratégies de commande. Dans ce sens, plusieurs modèles comportementaux sont présentés et comparés par rapport à des relevés expérimentaux. Les paramètres de chacun de ces modèles ont été identifiés en exploitant ces relevés expérimentaux. Ceux-ci ont été obtenus sur un dispositif expérimental et à partir de scénarios de test présentés dans la dernière partie de ce chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des stratégies de commande du tracker HCPV. Dans un premier temps une stratégie de commande dite de référence est présentée et ses performances sont évaluées sur le simulateur de tracker développé dans le chapitre précédent. Cette stratégie de référence, qui est la plus couramment employée en industrie, est une commande hybride basée sur l'utilisation d'un viseur solaire et l'exploitation d'un calcul astronomique pour générer la trajectoire du tracker. Cette stratégie est performante du point de vue précision demandée par les modules HCPV employés dans ce travail, néanmoins elle est coûteuse du fait de l'utilisation d'un capteur supplémentaire (viseur solaire). Pour tenter de répondre à ces problématiques d'amélioration de précision et de réduction des coûts de la commande, une stratégie de génération de la trajectoire basée sur une méthode du gradient est proposée. Son principe et la structure de son algorithme sont donnés, suivi de la simulation des performances de deux versions de cet algorithme. Une étude de la méthode employée pour l'évaluation du gradient de puissance est proposée afin d'évaluer la précision de l'algorithme proposé en première approche et de dégager les éventuelles pistes d'amélioration. La dernière partie sera consacrée à la discussion des intérêts et des limites de cette stratégie de commande.

Dans l'objectif d'apporter une solution à une des problématiques d'implémentation pratique de la stratégie de génération de la trajectoire proposée sur la base de la méthode du gradient, nous exposons dans le quatrième chapitre une étude sur les algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) par l'onduleur. La première partie de ce chapitre est consacrée au développement d'un modèle de simulation d'un panneau photovoltaïque et à sa validation expérimentale. Le deuxième volet de ce chapitre est dédié à un état de l'art sur les différents algorithmes MPPT, suivi d'une proposition de nouvelle approche basées sur une amélioration d'une commande classique par un réseau de neurones artificiel. Les performances de l'algorithme MPPT proposé sont évaluées et comparées à celles de trois autres algorithmes, sur le modèle de simulation développé.

Enfin, le dernier chapitre présente les principales conclusions sur ces travaux de modélisation et de commande d'un tracker HCPV, ainsi que les perspectives de développements futurs qui se dégagent de cette étude.



---

# Chapitre I

## Contexte et problématiques

---

### I.1. Contexte énergétique

Dans un contexte énergétique difficile, marqué par l'épuisement prévisible des énergies fossiles et leurs impacts sur l'environnement, les attentes en termes d'énergies renouvelables en général et d'énergie solaire en particulier, sont de plus en plus importantes. Ces énergies et plus particulièrement l'énergie solaire sont considérées comme la solution énergétique d'avenir. En effet le solaire est l'une des énergies "gratuites", capables de réduire la pollution en garantissant un rendement acceptable. L'enjeu majeur des chercheurs et des industriels dans ce domaine est donc d'améliorer davantage le rendement des systèmes photovoltaïques afin d'augmenter au maximum la production des installations et des centrales solaires. Un autre enjeu de taille pour la recherche actuelle dans le domaine du photovoltaïque est la baisse des coûts des installations et des centrales à travers la réduction des coûts des systèmes et des équipements photovoltaïques tels que les cellules photovoltaïques, les modules ou panneaux photovoltaïques ainsi que la structure mécanique permettant de les soutenir et de les positionner. Le coût des cellules photovoltaïques, qui est l'élément le plus important d'un système photovoltaïque en tant qu'élément de conversion de l'énergie, reste assez cher et c'est l'un des inconvénients majeur de cette énergie.

Il y a plusieurs approches pour atteindre cet objectif d'amélioration du rendement des systèmes photovoltaïques. L'une d'elles consiste à augmenter le rendement des cellules photovoltaïques en utilisant des dispositifs de concentration de la lumière. Cette technologie est appelée *photovoltaïque à concentration* (CPV). En effet un module CPV permet de capturer le rayonnement solaire grâce à un dispositif optique de concentration tel que les lentilles de Fresnel (Figure 1) ou les miroirs paraboliques (Figure 2) sur une cellule photovoltaïque de taille beaucoup plus faible que les cellules des panneaux classiques (Energy, 2013). Ces modules CPV, composés de cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs III-V, ont un rendement supérieur presque le double à des cellules de modules photovoltaïques classiques à cellules en silicium. Selon le rapport de concentration qui s'exprime en une unité dite « soleil » (Sun), on distingue les modules à basse concentration dites "LCPV" (concentration entre 2 et 10 suns), les modules à moyenne concentration (concentration entre 10 et 100 suns) et les modules à haute concentration dites "HCPV" (au



de la de 100 suns ) (Energy, 2013). Le rapport de concentration des modules HCPV peut même atteindre ou dépasser les 1000 suns (Philipps.S.P, 2015).

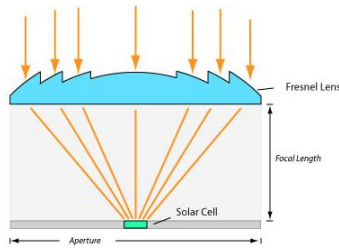


Figure 1- Système photovoltaïque à base de lentilles de Fresnel (Energy, 2013)

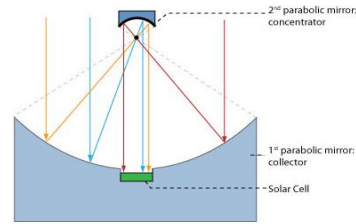


Figure 2- Système photovoltaïque à base de miroir parabolique (Energy, 2013)

Cette technologie CPV implique nécessairement l'utilisation de suiveurs solaires précis, ci-après dénommés "trackers", pour que les cellules soient parfaitement orientées face au soleil. Le tracker solaire est une structure portante qui permet d'orienter toute la journée les panneaux PV ou CPV afin d'en augmenter la productivité. En effet, c'est la poursuite du soleil qui permet de maximiser l'ensoleillement des cellules et des modules photovoltaïques et ainsi la production. Le graphe de la course du soleil (Figure 3) représente la position du soleil dans le ciel à toute heure de la journée pour différente date de l'année. Cette position du soleil est entièrement déterminée par deux composantes : l'azimut et la hauteur du soleil. Le suivi du soleil, ou poursuite, peut donc se faire sur un ou deux axes. Dans le cas d'une poursuite monoaxe, 1-axe horizontal ou 1-axe vertical, de l'est vers l'ouest, l'angle d'inclinaison doit être optimal sur l'année et nécessite parfois un réglage par saison (Alexandru.C, 2009). Dans le cas de tracker à deux axes, deux mouvements de rotation d'azimut et d'élévation sont combinés (Figure 4) de sorte qu'il puisse suivre très précisément la trajectoire du soleil tout au long de l'année (Seme.S, 2011).

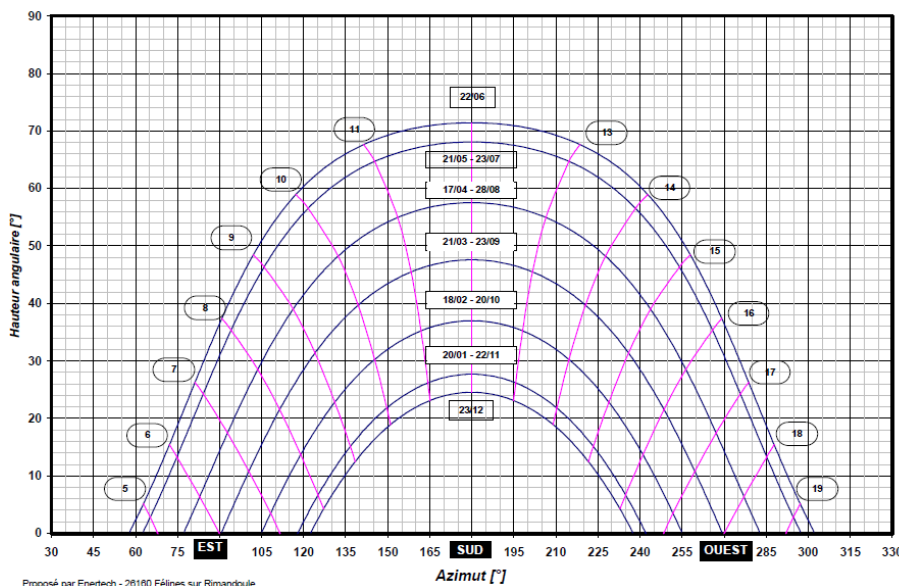


Figure 3- Trajectoire du soleil (Enertech)

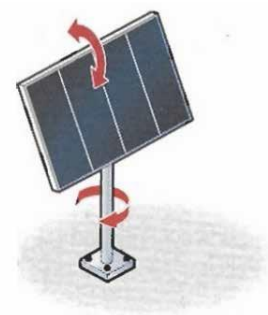


Figure 4- Tracker solaire double axes (IEC62817, 2014)

Les trackers pour les panneaux PV classiques peuvent être, au choix, sur un ou deux axes, par contre les trackers pour les modules HCPV nécessitent obligatoirement un suivi sur deux axes. Le suivi des trackers HCPV doit être très précis, de l'ordre de  $0.1^\circ$  pour le démonstrateur de tracker HCPV pris comme référence dans cette étude. Cette précision de positionnement dépend de l'angle d'acceptance des modules CPV considérés et est supérieure à celle des trackers PV. L'angle d'acceptance d'un module CPV est la valeur d'erreur de suivi du soleil au-delà de laquelle la puissance est inférieure à 90% de la puissance maximale du module.

Le suivi sur deux axes avec une grande précision nécessite des installations très coûteuses, ce qui représente l'une des faiblesses de la technologie CPV. En effet le coût de la mise en place et de la maintenance du tracker présentent une influence considérable sur le coût global du système CPV. La technologie présente d'autres faiblesses telles que la nécessité d'un nettoyage fréquent qui augmente les coûts d'entretien mais qui est indispensable pour conserver le meilleur rendement possible. Au niveau industriel, le marché est encore limité car cette technologie n'est intéressante que dans les régions à ensoleillement direct supérieur à  $2000 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  (Dollet.A, 2011) (Figure 5).

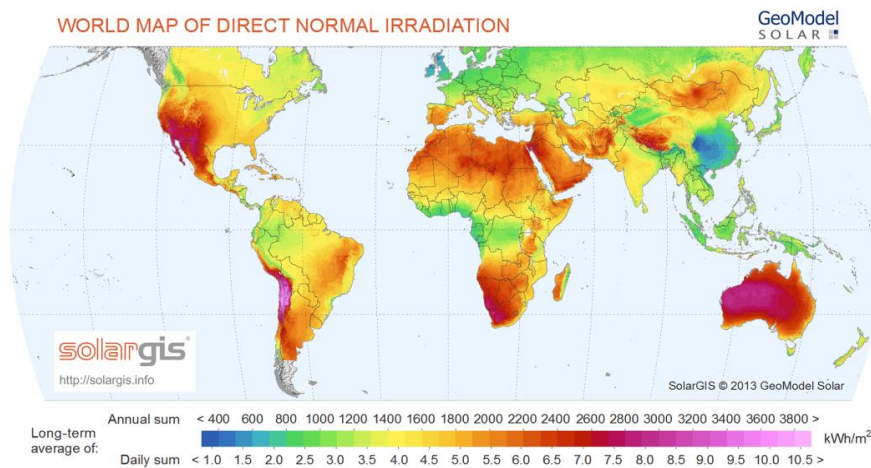


Figure 5- Carte mondiale de l'ensoleillement direct (SolarGIS, 2013)

En revanche les forces de cette technologie sont le rendement élevé avec l'ensoleillement direct et la faible sensibilité à la haute température. Cette technologie offre aussi un très faible temps d'amortissement de l'énergie (Philipps.S.P, 2015). Dans ce même rapport sur la situation de la technologie CPV dans le monde, le fort potentiel de réduction des coûts de cette technologie est également mis en avant. Cette technologie reste donc bien adaptée aux grandes centrales dans les zones à fort DNI, un segment de marché en plein essor.

En effet grâce à tous ces points de forces, la technologie CPV est en plein essor depuis 2010 et cela a été concrétisé, sur le marché, par l'apparition de plusieurs intervenants tels que les fabricants de trackers CPV, les fabricants de modules CPV et les développeurs de centrales CPV sur tracker. Cet essor a mené aussi à l'installation de grandes centrales CPV d'une dizaine de Mégawatt, comme le montre les Figure 6 et Figure 7.

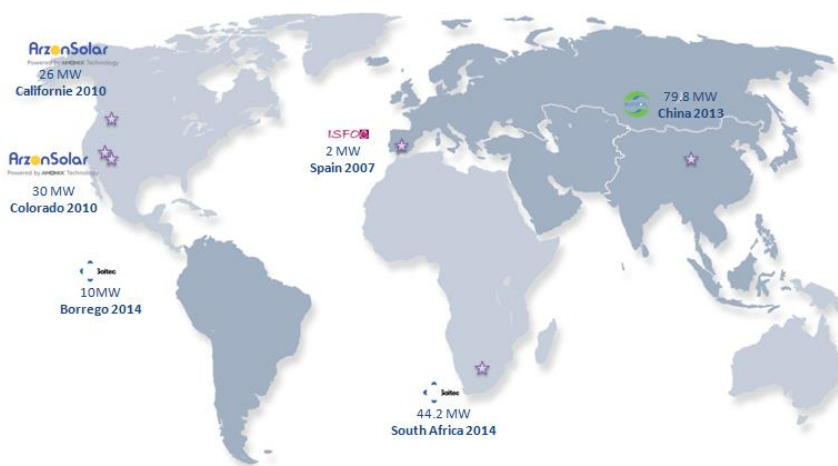


Figure 6- Les grandes centrales CPV dans le monde

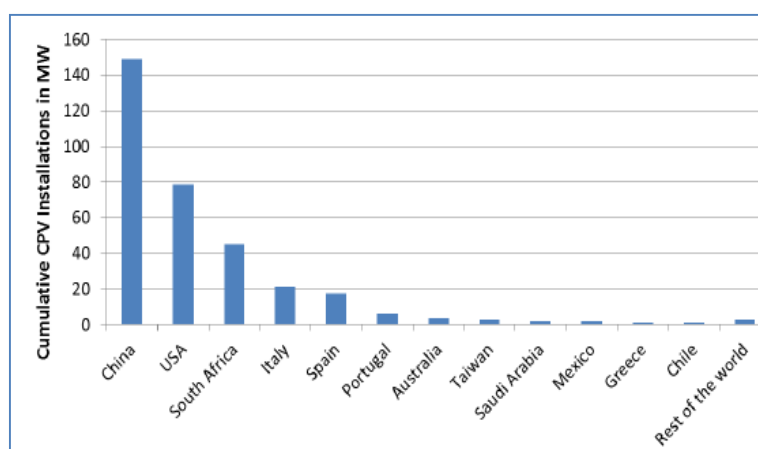


Figure 7- Les Mégawatts de CPV installés dans différents pays (Philipps.S.P, 2015)

La technologie CPV est soumise, comme toutes les technologies dont le développement intéresse le développement économique, aux aléas et autres vicissitudes qui affectent le marché mondial de l'énergie. Son développement a été ralenti et le secteur a été gravement touché entre 2014 et 2015 par deux événements importants. D'abord, la technologie a été victime de la chute remarquable du prix du baril de pétrole (Figure 8). Ce dernier a perdu à peu près 50% de sa valeur (Capomaccio, 2015) ce qui a rendu les énergies renouvelables de façon générale, et particulièrement la technologie CPV, moins compétitives. Cette même période a connu aussi une baisse du prix du silicium à cause d'une augmentation remarquable de la production en Chine. Cette baisse a avantageé la production des panneaux PV classiques (à silicium multicristallin et monocristallin) et l'installation de centrales PV sur structure fixe ou sur tracker 1-axe horizontal aux dépens de la technologie et des centrales CPV sur tracker 2 axes.

Malgré le contexte économique et énergétique difficile, la recherche ne cesse d'avancer dans le domaine du CPV afin de remédier aux limites et aux faiblesses de la technologie. Les enjeux majeurs de la recherche sont d'augmenter le rendement et de diminuer les coûts des systèmes photovoltaïques afin de les rendre les plus compétitifs possible. En effet le rendement des cellules, des modules et des systèmes photovoltaïques ne cesse d'augmenter.

Comme le montre la Figure 9, le rendement d'un module CPV est passé de 25% en 2012 à 36% en 2015, alors que le record d'une cellule CPV est de 46 % (Philipps.S.P, 2015). Ce rendement atteint est largement supérieur aux rendements qu'une cellule photovoltaïque classique peut atteindre. Le coût des systèmes et des centrales CPV ne cesse de baisser aussi. La Figure 10 présente le potentiel de la technologie CPV à réduire le coût complet de production de l'électricité (LCEO : Levelized Cost of Energy). Les coûts "LCOE", pour un ensoleillement entre 2000 et 2500 kWh/m<sup>2</sup>, sont passés de 0.12 €/kWh en 2013 à moins de 0.10 €/kWh en 2015 et peuvent descendre jusqu'à 0.05 €/kWh en 2030.



Figure 8- Evolution du prix du baril de pétrole (Prix-du-baril, 2015)

Cette possibilité d'augmentation du rendement et cette marge de réduction des coûts donne une lueur d'espoir pour les chercheurs et les industriels sur la progression et la compétitivité de cette technologie dans ce contexte très difficile. Ces courbes indiquent que la tendance reste largement au bénéfice de cette technologie et que la tendance actuelle devrait s'inverser rapidement.

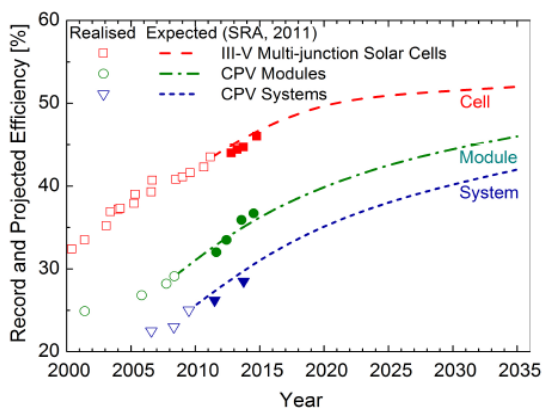


Figure 9- Evolution du rendement des cellules, des modules et des systèmes CPV (Philipps.S.P, 2015)

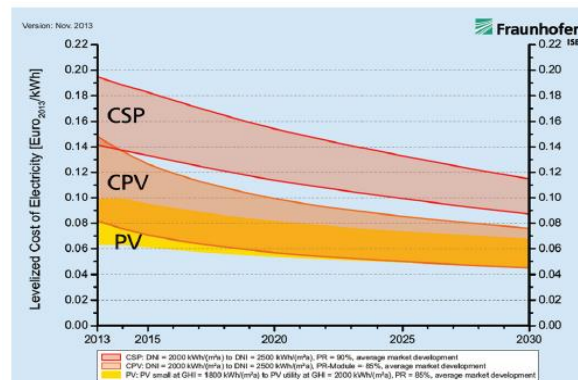


Figure 10- Evolution du LCOE des centrales PV, CSP et CPV pour une irradiation solaire élevée de 2000 kWh / (m<sup>2</sup>) - 2500 kWh / (m<sup>2</sup>) (Philipps.S.P, 2015)

## **I.2. Problématique industrielle**

Les travaux de thèse ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration entre la société Optimum Tracker et l'équipe INSM du Laboratoire LSIS.

La Société Optimum Tracker est une société qui conçoit, développe et commercialise des trackers solaires permettant de rendre les centrales photovoltaïques toujours plus performantes (OptimumTracker, 2012). Les deux principaux produits de l'entreprise sont le tracker deux axes (azimut et élévation) de grande précision pour la technologie CPV et les trackers un axe horizontal et tilt pour les modules PV classiques. Dans une optique de maximisation de la production et de réduction des coûts d'installation, de maintenance et d'entretien de son tracker CPV, la société focalise ses recherches sur l'optimisation de la commande de suivi de la course du soleil. En effet, elle cherche à augmenter la précision du tout en réduisant le coût de cette commande.

Par ailleurs, l'équipe INSM du Laboratoire LSIS développe, au centre d'Aix-en-Provence d'Arts et Métiers ParisTech, des compétences dans les domaines de la conception, la modélisation et la commande des systèmes dynamiques et complexes dont une application est centrée sur la mise en œuvre, la modélisation et la gestion d'un réseau multi-sources d'énergies renouvelables (Système photovoltaïque, éolienne et pile à hydrogène).

Pour atteindre les objectifs d'optimisation et de réduction des coûts de ce système tracker HCPV et dans le cadre de cette thèse de doctorat, la société « Optimum Tracker » et le Laboratoire LSIS proposent d'étendre leurs travaux respectifs sur les deux grands axes suivants :

- La stratégie de commande du tracker CPV nécessitant une très grande précision de poursuite du soleil. L'enjeu est de développer une commande plus performante que la commande actuelle, appelée ci-après stratégie de commande de référence et qui sera décrite dans les chapitres suivants. Cet objectif nécessite forcément de comparer la ou les nouvelles stratégies proposées à la commande de référence en termes de production, de consommation des actionneurs et des coûts de développement et de maintenance.
- Le deuxième axe qui intéresse l'entreprise est la modélisation d'un système dynamique tel que le tracker HCPV, à travers une modélisation de chacun de ses composants. Cette modélisation mènera par la suite au développement d'un simulateur de tracker HCPV. L'objectif étant de développer un simulateur capable de valider ces stratégies de commande et de génération des trajectoires, la modélisation recherchée est donc celle qui permet de calculer la position du tracker et d'estimer l'erreur de suivi (par rapport à une position théorique calculée à l'aide d'un calcul astronomique) et de prédire une puissance produite par le module HCPV en fonction de l'erreur de tracking. Ce dernier point, très intéressant, permet d'étudier l'influence de la performance du suivi sur la puissance produite.

Une étude bibliographique paraît donc nécessaire afin de positionner nos travaux par rapport à ceux existants dans la littérature. Cette synthèse bibliographique traite des principaux objectifs des travaux de thèse, à savoir la modélisation et la commande des trackers HCPV. Une première partie sera consacrée à la modélisation de l'un des principaux éléments d'un tracker HCPV : le module HCPV. Dans la deuxième partie, une étude des différentes stratégies de commande des trackers PV et HCPV sera présentée. La dernière partie sera consacrée à la modélisation d'un ensemble tracker HCPV permettant de développer le simulateur.

### I.3. Etat de l'art des modèles de module HCPV

Un module HCPV est un ensemble de un ou deux éléments optiques de concentration et de récepteurs ou cellules photovoltaïques capables de convertir l'ensoleillement direct reçu (Rodrigo.P, 2013). La Figure 11 présente un exemple de module HCPV. Nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse aux modules HCPV basés sur les lentilles de Fresnel comme dispositif de concentration comme le montre la Figure 12. Cette technologie, qui présente généralement un rapport de concentration élevé (autour de 500 suns), implique une nécessité d'alignement précis des modules avec le soleil. La précision demandée varie en fonction de la technologie mais reste proche de  $0.1^\circ$  (Exosun, 2007).

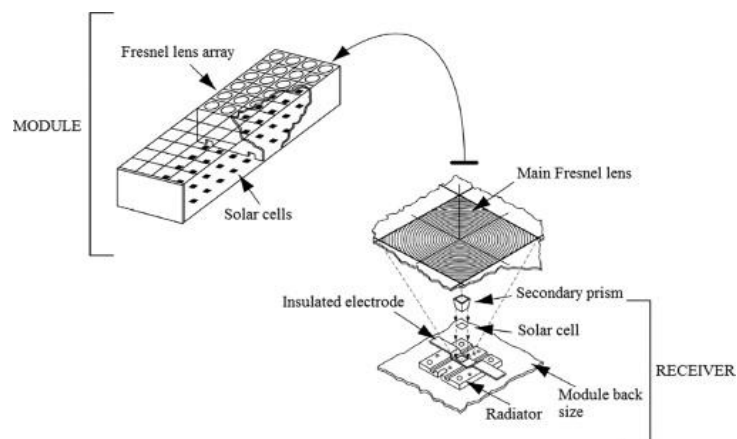


Figure 11- Schéma d'un système PV à concentration à optique de Fresnel avec point de focalisation (IEC62108, 2007)

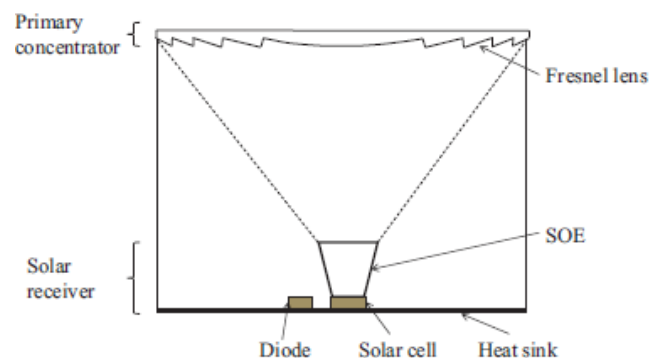


Figure 12- Schéma d'un récepteur solaire HCPV intégré au point focalisé de la lentille de Fresnel. (Rodrigo.P, 2013)

Le module HCPV est le composant principal d'une installation photovoltaïque et sa modélisation s'avère importante pour le développement d'un simulateur de tracker et pour l'évaluation des différentes stratégies de commande. Donc l'objectif de la modélisation est de prédire la puissance maximale produite par le module HCPV en fonction des conditions météorologiques et en fonction de l'erreur de suivi, entre la position théorique du soleil et la position du tracker (Figure 13).

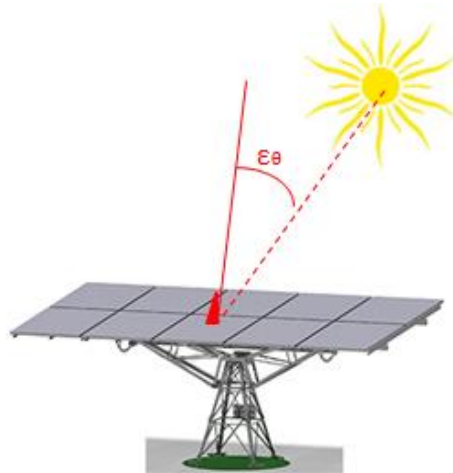


Figure 13- Erreur de suivi du soleil

Un état de l'art sur la modélisation des modules HCPV est présenté en deux parties dans le paragraphe suivant, selon la méthode suivante :

- Les modèles empiriques à paramètres réduits.
- Les modèles physiques comportementaux.

### **I.3.1. Modèles empiriques à paramètres réduits**

La complexité des systèmes HCPV et les différents facteurs et conditions de la modélisation ont conduit à l'utilisation de modélisations empiriques à paramètres réduits telle que la modélisation basée sur les réseaux de neurones artificiels (Rivera.A.J, 2013), (Almonacid.F, 2013). Dans cette approche, l'auteur propose un modèle neuronal de prédiction de la puissance maximale d'un module HCPV basé sur un algorithme de rétro-propagation de type Levenberg-Marquardt pour l'apprentissage. Ce modèle tient compte de l'ensoleillement direct (Direct normal Irradiance :  $DNI$ ), de la masse de l'air ( $AM$ ), des précipitations ( $P_w$ ), de la température ambiante ( $T_{air}$ ) ainsi que de la vitesse du vent  $WS$ . Il peut donc, assurer une bonne prédiction de la puissance maximale (environ 3.29%) pour une irradiance directe supérieure à  $400W/m^2$  et une vitesse du vent inférieure à 3 m/s. Mais en dehors de cette zone de validité, l'erreur devient trop importante et donc peu acceptable.

Le modèle neuronal proposé par (Rivera.A.J, 2013) tient compte de l'ensoleillement direct ( $DNI$ ), de la température de l'air, de la vitesse du vent et de l'énergie photonique ( $APE$ ) et permet d'étudier et de caractériser l'influence spectrale sur le comportement du

module HCPV. Il est basé sur un nouvel algorithme neuronal appelé « hybride coopérative-compétitive ».

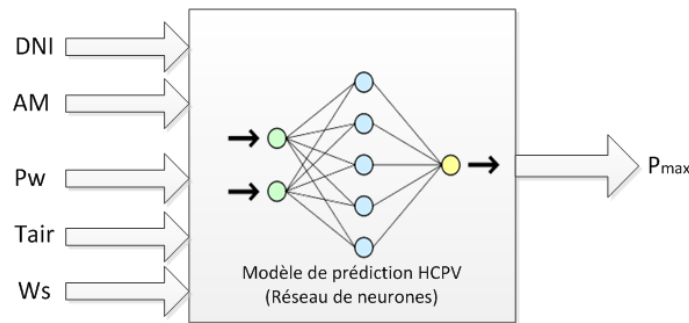


Figure 14- Illustration d'un modèle de prédiction d'un module HCPV par approche par réseau de neurones (d'après (Rivera.A.J, 2013))

La modélisation à paramètres réduits basée sur les réseaux de neurones artificiels permet une prédiction de la production d'un HCPV et une étude du comportement du module suite à la variation des paramètres atmosphériques. Cette modélisation peut présenter un grand intérêt si nous envisageons une commande neuronale du tracker HCPV. En revanche, ces deux modèles de prédiction nécessitent forcément un nombre important de données expérimentales pour la phase d'apprentissage, de test et de validation, ce qui pour nous peut présenter un inconvénient réel pour une application pratique.

### I.3.2. Modèles physiques comportementaux

Plusieurs travaux ont été réalisés sur la modélisation des modules HCPV en se basant sur des schémas équivalents électriques et des équations mathématiques empiriques et semi-empiriques. Ces modèles proviennent, dans la plupart des cas, des modèles des panneaux photovoltaïques classiques (les modèles de cellules PV à une seule diode, les modèles à double diodes ou plus, voir Chapitre IV) ou encore des modèles de modules LCPV (Segev.G, 2012), (Yadav.P, 2013) : quelques modifications sont apportées à ces modèles afin de prendre en compte des facteurs tels que la concentration et les facteurs météorologiques (ensoleillement direct, vitesse du vent, ...) qui peuvent influencer le comportement du module HCPV et sa production.

Un état de l'art a été présenté par (Rodrigo.P, 2013) et propose une comparaison des différents modèles de comportement de cellules HCPV multi-jonctions ainsi qu'une comparaison des différents modèles de modules HCPV. Chacun des modèles paramétriques semi-empiriques respectivement proposés dans (Fromer.N, 2009), (Peharz.G, 2011), (Fernández.E.F, 2012), (Fernandez E F, 2013), (ASTME, 2009), et dans (Sandia, 1997) propose une prédiction de la puissance maximale d'un module HCPV en fonction des facteurs atmosphériques. Celle-ci est basée sur des coefficients empiriques. Le modèle proposé par (ASTME, 2009) prend en compte l'ensoleillement direct  $DNI$ , la température ambiante  $T_{air}$  et la vitesse du vent  $W_s$  pour calculer la puissance maximale du module HCPV:

$$P_{\max} = DNI(c_1 + c_2 DNI + c_3 T_{air} + c_4 WS) \quad (1)$$



Les paramètres du modèle,  $c_1, c_2, c_3$  etc $_4$ , sont déterminés expérimentalement par une approche statistique du type analyse par régression. Un autre modèle présentant moins de paramètres empiriques est basé sur la connaissance des caractéristiques du module HCPV (Fernandez E F, 2013) :

$$P_{\max} = f(DNI, T_{air}) \quad (2)$$

$$P_{\max} = \frac{P^*}{DNI^*} DNI (1 - \sigma_p (T_{air} - T_{air}^*)) \quad (3)$$

$P^*$ ,  $DNI^*$  et  $T_{air}^*$  sont respectivement la puissance maximale, l'ensoleillement direct et la température dans les conditions de référence.  $\sigma_p$  est le coefficient de température de la puissance maximale. (Steiner.M, 2012) propose lui une modélisation différente des modèles précédents. C'est en fait une combinaison de trois modèles telle que décrite par la Figure 15.

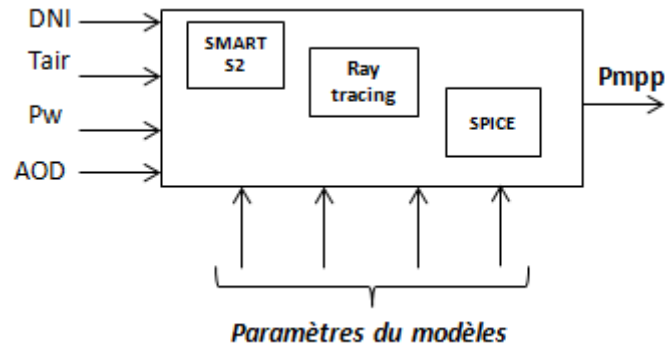


Figure 15- Schéma du modèle de module HCPV (d'après (Steiner.M, 2012))

- Le premier sous-modèle décrit le spectre du rayonnement solaire par un algorithme SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) (Gueymard.C, 2009). Ce modèle permet de calculer l'irradiance spectrale en fonction de l'épaisseur optique des aérosols ( $AOD$ ) et des précipitations  $P_w$ .
- Le deuxième sous-modèle est un module optique établi par une technique de calcul d'optique par ordinateur appelée « lancer de rayon » (Hornung.T, 2010). Cette technique permet de caractériser le comportement optique de la lentille de Fresnel.
- Le troisième sous-modèle est du type SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Il est capable d'estimer la caractéristique électrique I-V de la cellule et permet ainsi de calculer la puissance du module (Steiner.M, 2012).

Ce modèle tient compte de plusieurs facteurs atmosphériques à savoir  $DNI$ ,  $WS$ ,  $T_{air}$  et d'autres facteurs ( $P_w$ ,  $Sph$ , ...) comme les autres modèles proposés précédemment. Néanmoins, il est le seul modèle qui tienne compte de l'erreur de tracking dans la prédiction de la puissance maximale d'un module HCPV. Plus précisément, ce modèle tient compte de l'alignement du tracker par rapport au soleil (en élévation et azimut) pour déterminer un ratio

de densité de courant par rapport à la densité de courant maximale (en cas d'erreur de tracking nulle). Cette densité de courant servira par la suite à déterminer la puissance maximale produite par le module.

Ce modèle a donc la particularité de traiter l'influence de l'erreur d'alignement des tracker sur la puissance produite par le module HCPV. Néanmoins, il est assez complexe du fait qu'il combine plusieurs types de modélisation et qu'il nécessite beaucoup de données expérimentales, en plus de l'emploi d'algorithmes d'identification paramétriques. Ce modèle manque de précision sur la manière avec laquelle certains sous-modèles sont développés (en rouge sur la Figure 16).

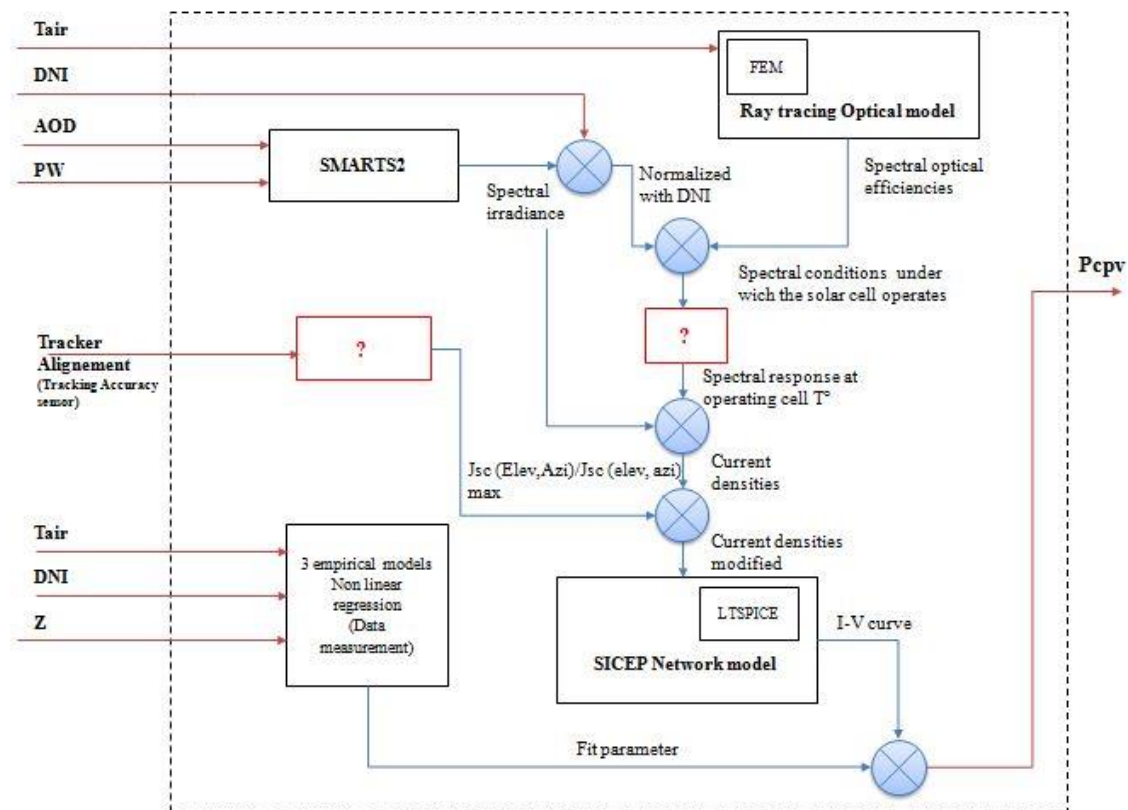


Figure 16- Schéma détaillé du modèle de module HCPV proposé par (Steiner.M, 2012)

### I.3.3. Etude comparative des modèles de modules HCPV

Le Tableau 1 présente une synthèse des grandeurs physiques d'entrée prises en considération par les différents modèles présentés précédemment. Ce tableau montre qu'à part l'ensoleillement direct et la température ambiante de l'air, chaque modèle met l'accent sur l'influence d'un ou plusieurs facteurs (irradiance spectrale, température de la cellule, ...) sur le comportement électrique du module HCPV.

Le modèle proposé par (Steiner.M, 2012) est celui qui prend en considération le plus de paramètres et qui a la particularité de prendre en compte l'erreur de suivi qui, jusqu'à présent, n'apparaît dans aucun autre travail de modélisation ou de caractérisation de modules HCPV.

Tableau 1- Comparaison des caractéristiques des modèles de modules HCPV : Grandeurs d'entrée (d'après (Rodrigo.P, 2013))

	Fromer	Almonacid	ASTME	Steiner	Peharz	Rivera	Fernandez	Sandia
<i>DNI</i>	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>G</i>								
<i>T<sub>air</sub></i>	X	X	X	X		X	X	
<i>WS</i>	X	X	X	X		X		
<i>P<sub>w</sub></i>		X		X				
<i>T<sub>c</sub></i>					X			X
<i>AM</i>	X	X					X	X
<i>ε<sub>T</sub></i>				X				
<i>I<sub>s</sub></i>				X				
<i>S<sub>ph</sub></i>				X	X			
<i>APE</i>						X		
<i>AOD</i>				X				
<i>CR</i>							X	X

Le Tableau 2 liste les avantages de chaque modèle proposé. Sur la base de la synthèse bibliographique proposée par (Rodrigo.P, 2013) et du tableau 2, nous proposons les conclusions suivantes :

- La plupart des modèles nécessitent des mesures expérimentales afin d'obtenir les coefficients empiriques à l'aide d'une analyse de régression.
- Certains modèles sont faciles à implémenter et nécessite peu d'instruments pour la mise en application. Ces modèles, à savoir le modèle développé par (Sandia, 1997), (ASTME, 2009) ou encore (Fernández.E.F, 2012), sont probablement les plus utilisés dans l'industrie surtout dans un objectif de prédiction de la puissance maximale.

Le Tableau 3 présente une comparaison des modèles du point de vue erreur de modélisation (la différence entre les valeurs de simulation et les mesures expérimentales). La comparaison n'est donc réellement possible que dans le cas où les auteurs ont adopté la même méthode de calcul et d'évaluation de l'erreur de modélisation. Dans ce sens, le modèle neuronal proposé par (Almonacid.F, 2013) présente la plus faible RMSE (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne).

Ce dernier tableau n'est pas donc pas très représentatif. Cependant, il sert à donner un ordre de grandeur de cette erreur, comme l'indique (Rodrigo.P, 2013).

Tableau 2- Comparaison des caractéristiques des modèles de modules HCPV : Les principaux avantages

	Fromer	Almonacid	ASTME	Steiner	Peharz	Rivera	Fernandez	Sandia
Facile à implémenter	X		X		X		X	X
Faible puissance de calcul	X	X	X		X	X	X	X
Ne nécessite pas de connaissance en RDN	X		X	X	X		X	X
Nécessite peu de données exp.	X		X		X		X	X
Utilise peu de coefficients théoriques		X				X		
Donne des paramètres électriques autres que Pmax				X				X
Ne tient pas compte de Tc		X	X	X		X	X	
Quantifie les effets spectraux		X		X	X	X	X	X
Quantifie les effets spectraux avec haute précision				X	X	X		

Tableau 3- Erreurs entre les mesures expérimentales et les valeurs simulées de Pmax d'un module HCPV données par les différents auteurs (d'après (Rodrigo.P, 2013))

	Fromer	Almonacid	ASTM E	Steiner	Peharz	Rivera	Fernandez	Sandia
Paramètres	Erreur	RMSE	RMSE	NRMSE	RMSE Absolue	MSE	RMSE	RMSE
Valeurs	3%	2.1%	4.6%	<3.2%	1.6 W	15.5%	3.2%	3.4%

#### I.4. Etat de l'art des stratégies de commande d'un tracker

La stratégie de commande d'un tracker consiste essentiellement à générer la trajectoire du tracker afin de poursuivre parfaitement le soleil dans le but de maximiser la production. En effet, l'asservissement des actionneurs des trackers est généralement considéré comme maîtrisé et n'est par conséquent pas abordé.

Cette stratégie de commande peut avoir d'autres objectifs et d'autres contraintes comme la minimisation de l'énergie consommée, l'adaptation aux variations des conditions météorologiques.

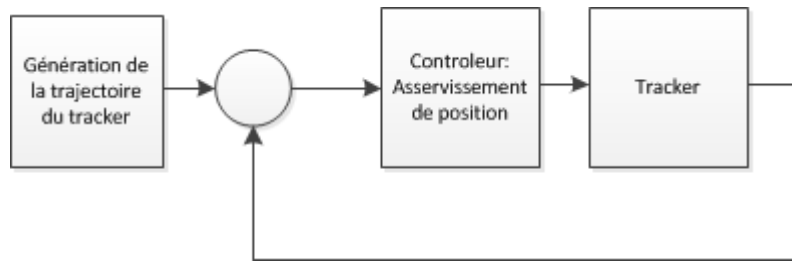


Figure 17- Schéma synoptique de commande d'un tracker HCPV

Beaucoup de travaux ont été menés sur les stratégies de commande des trackers solaires dans le cas des modules PV ou CPV. Trois grandes catégories de stratégies se dégagent, le troisième, hybride, étant une combinaison des deux premières, dites stratégie en boucle ouverte et en boucle fermée.

#### I.4.1. Commande en boucle ouverte

La commande dite en boucle ouverte (Figure 18) est une commande active de poursuite basée uniquement sur des calculs astronomiques de la position du soleil (calcul d'éphémérides), sans mesure de la position du soleil. En fait, il permet de générer les consignes de la trajectoire de poursuite du tracker (dans notre cas l'angle d'azimut et angle d'inclinaison) à partir de l'heure et des coordonnées GPS d'une centrale (Figure 18). Comme toute commande en boucle ouverte, elle est très sensible aux perturbations (absence de feedback) et aux erreurs de modélisation (IEC62817, 2014).

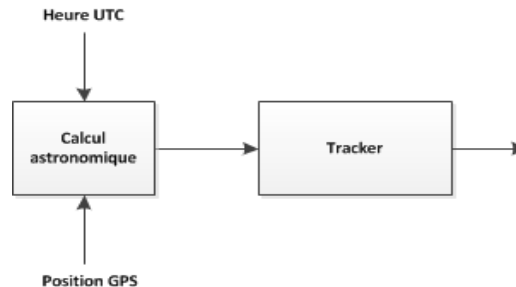


Figure 18- Commande en boucle ouverte d'un tracker PV

Cette commande est très utilisée dans le cas des trackers PV conventionnels (Meeus.J, 1998), (Reda.I, 2008) et (Abdallah.S, 2004) qui ne nécessitent pas une grande précision de suivi. En effet, une erreur du calcul de la position théorique du tracker peut provoquer une perte en précision du suivi et l'erreur peut augmenter au cours du temps car il n'y a pas de retour ni de correction. Ces erreurs peuvent provenir des variations ou d'une erreur d'indication de l'heure fournie par l'horloge par rapport à l'heure solaire réelle ou encore d'un manque de précision des coordonnées géographiques du tracker. Par exemple, un désalignement du tracker provoqué par le vent peut aussi provoquer des erreurs de calcul et dégrader sensiblement la précision de tracking.

### I.4.2. Commande en boucle fermée

La commande dite en boucle fermée est une commande active qui se base sur une mesure de l'erreur de poursuite réelle pour contrôler les actionneurs du tracker (IEC62817, 2014). Cette mesure de l'erreur (Figure 19) est fournie généralement par un capteur solaire, aussi appelé viseur solaire. Dans certains cas, le retour n'est pas une erreur de poursuite mais une puissance produite par le module.

Dans ce sens, (Cittolin.G, 2011) propose une commande en boucle fermée basée sur un retour de la puissance instantanée produite par chaque module. L'approche proposée entre dans une optique de réduction du coût de la commande et du système HCPV, compatible avec les objectifs de ces travaux, en éliminant l'utilisation du capteur solaire. Néanmoins, cette stratégie s'avère plus intéressante sur une configuration d'installation comportant un ensemble de trackers PV classiques contrôlés par une seule commande. En effet, la stratégie proposée consiste à orienter les trackers suivant la position du tracker le mieux orienté, en partant de n'importe quelle position (position aléatoire). Elle est donc moins efficace dans le cas des modules HCPV qui nécessitent une grande précision de suivi du soleil.

Comme pour (Cittolin.G, 2011) cette approche est utilisée généralement pour commander les trackers PV classiques à un seul ou à deux axes (Bendib.T, 2008) et (Xinhong.Z, 2007).

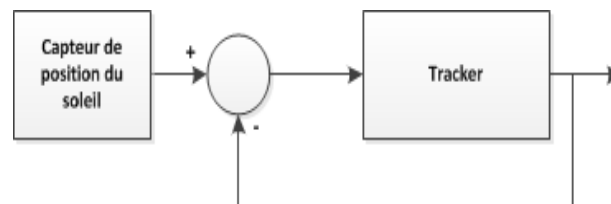


Figure 19- Commande en boucle fermée d'un tracker

Malgré les avantages apportés par cette commande, l'utilisation du capteur solaire est contraignante car une panne du capteur (fiabilité du feedback) ou un passage de nuages (erreur de modélisation majeure) peut provoquer l'arrêt du suivi et, une fois le soleil sorti du champ de vision du capteur, l'arrêt de production.

### I.4.3. Commande hybride

La commande hybride est une commande de poursuite qui combine le calcul de la position de référence proposée par la « boucle ouverte », et la donnée de retour proposée par la commande à boucle fermée. Cette commande peut être appliquée de manières différentes. Nous retrouvons la structure classique en Automatique d'un contrôle avec boucle de régulation associée à un modèle de suivi de trajectoire, générateur des consignes de poursuite.

Une première approche de commande hybride proposée par (Belkasmi.M, 2015), est basée sur un simple Switch entre la commande en boucle ouverte (calcul astronomique) et la commande en boucle fermée (capteur solaire). Le basculement d'une commande à l'autre est

déclenché à partir d'un certain seuil d'erreur de position défini selon la technologie du module HCPV.

La commande hybride proposée par (Rubio.F.R, 2007) combine une boucle ouverte basée sur un calcul mathématique de la position du soleil et une boucle fermée basée, dans ce cas, sur l'information de puissance du module PV (Figure 20). Cette boucle fermée intervient pour corriger la référence de position théorique (position théorique calculée du soleil) et proposer une meilleure estimation de la position réelle du tracker par rapport au soleil. Le viseur solaire, qui intervient dans cette boucle fermée, est réellement constitué d'un composant de mesure de la position du tracker et un composant de mesure de la position du soleil afin de fournir une mesure de l'erreur (Figure 21). Sur la Figure 21, la référence de la boucle fermée correspond à l'erreur d'alignement avec le soleil et est, dans ce cas, nulle.

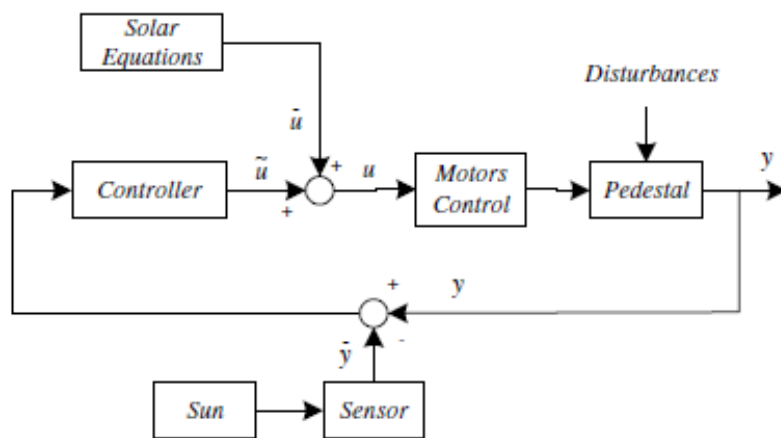


Figure 20- Commande hybride d'un tracker doubles axes (Rubio.F.R, 2007)

Cette stratégie de commande est très recommandée dans le cas des trackers CPV et plus particulièrement HCPV, car ils nécessitent un positionnement plus précis que les trackers PV. Elle permet d'améliorer la précision en corrigeant les erreurs du calcul astronomique. Elle a l'avantage aussi de permettre un fonctionnement en mode dégradé à l'aide de sa boucle ouverte, en cas de panne du capteur solaire ou lorsque celui-ci ne délivre plus d'information en raison d'une couverture nuageuse trop importante.

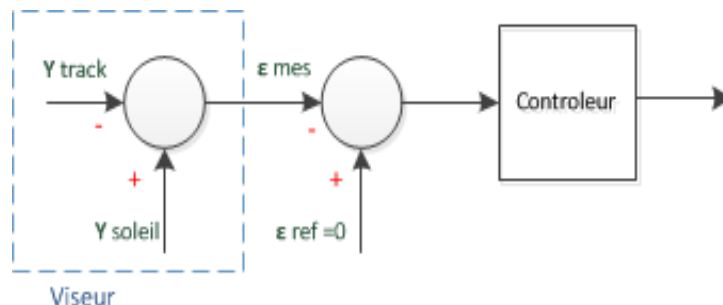


Figure 21- Analyse de la constitution de la partie viseur et référence de la commande hybride

#### I.4.4. Commande tenant compte de la consommation

Les stratégies de commandes présentées précédemment ont un seul objectif qui est la maximisation de l'ensoleillement, et donc de la production, sans tenir compte de l'état de fonctionnement des actionneurs ni de leur consommation d'énergie.

(Rubio.F.R, 2007) propose une commande qui ne suit pas la trajectoire du soleil en continu afin de limiter l'usure des moteurs. Si cet objectif concerne surtout le cas d'un actionnement à base de moteurs à courant continu, ce suivi discontinu permet également de se rapprocher d'un objectif de minimisation de la consommation d'énergie. Le principe de la commande, comme illustré par la Figure 22, est le suivant : le tracker reste en arrêt jusqu'à ce que l'écart entre la position (théorique) du soleil et la position du tracker atteigne un certain seuil de tolérance ("Initial tolerance"). A ce moment, le tracker rattrape la position du soleil et prend de l'avance ("Final tolerance"). La valeur du seuil de tolérance et celle de d'avance prise sont définies selon la technologie de module HCPV utilisé. En effet, chaque module HCPV est caractérisé par un intervalle d'angle d'acceptance en dehors duquel la puissance produite descend au-dessous de 90%.

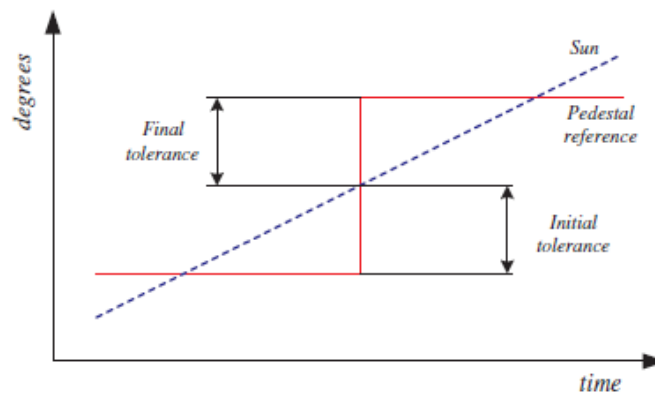


Figure 22- Génération de trajectoire discontinue (Rubio.F.R, 2007)

D'autres stratégies de commande ayant un objectif de maximisation de l'ensoleillement et de minimisation de la consommation sont considérées dans la littérature comme des méthodes d'optimisation. Dans cette optique, (Alexandru.C, 2009) et (Alexandru, 2013) proposent une optimisation empirique de l'intervalle d'angle accessible (intervalle entre l'angle limite minimum et maximum défini par le constructeur du tracker et dépendant de sa mécanique : un exemple est présenté dans l'annexe 1 concernant le tracker pris pour référence pour cette étude) sur l'axe d'élévation du tracker ainsi que du pas de discrétisation proposé (Figure 23). En effet, la trajectoire optimale, composée du pas de discrétisation optimal et de l'intervalle d'angle accessible optimal, est définie grâce à une étude comparative de l'énergie produite et consommée par un tracker en fonction de l'intervalle d'angle d'élévation accessible (Figure 24).

(Seme.S, 2011) propose une stratégie de génération hors ligne de la trajectoire du tracker en se basant sur un algorithme d'optimisation du pas de discrétisation, appelé « algorithme à évolution différentielle ». Le critère d'optimisation ( $q$ ) utilisé pour cette



stratégie est défini selon l'objectif de la commande qui est la maximisation de l'énergie produite ( $E_{pv}$ ) et la minimisation de l'énergie consommée ( $E_c$ ):

$$q = \frac{E_{pvideal}}{E_{pv} - E_c} \quad (4)$$

$E_{pvideal}$  est l'énergie produite pour un suivi en continu qui ne prend pas en considération l'énergie consommée par les actionneurs.

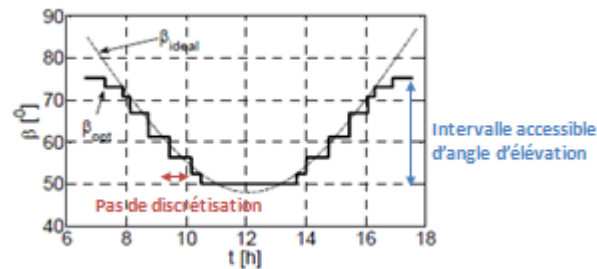


Figure 23- Génération de trajectoire discontinue basée sur l'optimisation de l'intervalle accessible d'angle d'élévation et du pas de discrétisation (Seme.S, 2011)

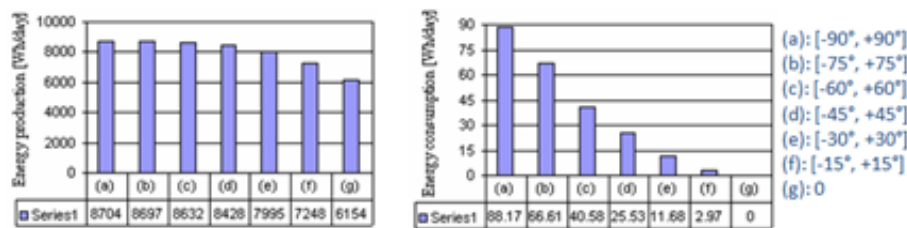


Figure 24- Etude comparative de l'énergie produite et consommée par le tracker pour chaque valeur d'intervalle d'angle d'élévation (Alexandru.C, 2009)

Bien que ces deux approches d'optimisation permettent de minimiser la consommation d'énergie électrique des actionneurs, elles restent inenvisageables pour un tracker HCPV qui nécessite une commande de très haute précision. La spécificité du tracker HCPV exige plutôt une génération de trajectoire en temps réel pour la poursuite du soleil. De plus l'optimisation de l'intervalle d'angle accessible n'est pas permise dans le cas d'un tracker HCPV, car toute réduction de l'intervalle de positions accessibles par le tracker impliquerait une diminution inacceptable de la production. Une telle optimisation lors de la conception d'un tracker HCPV n'aurait par conséquent pas de sens car elle conduirait à la nécessité d'accéder à la position du soleil sans limitation.

### I.5. Etat de l'art de la modélisation des trackers HCPV et PV

La modélisation d'un tracker PV ou HCPV diffère selon l'objectif d'utilisation. Peu de travaux existent dans la littérature concernant la modélisation des trackers CPV. Il existe seulement des modèles de prédiction de la production d'un tracker et d'une centrale HCPV sur trackers tels que présentés dans (Gerstmaier.T, 2015), (Gómez-Gil.F.J, 2012),

(Kinsey.G.S, 2010) et (Nishikawa.W, 2008). Ces modèles utilisent une régression linéaire et une estimation de l'ensoleillement ainsi que l'historique des données météorologiques (ensoleillement direct, ensoleillement global, ...). Pour (Nishikawa.W, 2008), le modèle est aussi basé sur la réponse spectrale de la cellule multi-jonctions III-V. Ces modèles, destinés plutôt à des centrales CPV, permettent de prédire la production sur un mois ou sur une année en fonction des modules utilisés et du lieu de la centrale. Par contre ces modèles ne sont pas dédiés à tester, ni à simuler et valider les commandes ou les stratégies de commande des trackers, car ils se basent sur un suivi parfait du soleil. Ce manque de travaux concernant la modélisation physique comportementale des trackers CPV a redirigé nos recherches vers des modèles de trackers PV classiques. Malgré les différences de comportement et de caractéristiques, ces modèles de trackers PV peuvent présenter une base pour le développement d'un modèle de tracker HCPV.

Dans cette optique de caractérisation du comportement dynamique des trackers et de prédiction de la puissance maximale en prenant en considération la performance du suivi (de la commande), des modèles tels que (Tatu.N, 2012), (Maatallah.T, 2011) et (China.C.S, 2011) apparaissent dans la littérature. Dans ces travaux, une approche, basée sur des modèles de comportement de chacun des composants du tracker PV, est proposée.

En effet, (Tatu.N, 2012) propose un modèle géométrique et dynamique 3D de la structure mécanique et la motorisation d'un tracker PV en tenant compte de sa commande de trajectoire. Le modèle de conception du tracker contenant la structure mécanique rigide et l'actionneur (moteur) a été simulé sur le logiciel « SolidWorks » et l'animation 3D a été faite sur le logiciel « Adams/View » (Figure 25). Le modèle dynamique du tracker est couplé avec une simulation de la commande du tracker développée sous Matlab/Simulink®. La commande adoptée dans ce travail est une commande que l'on peut qualifier de commande en boucle ouverte, basée uniquement sur un calcul astronomique pour déterminer la position de référence pour l'asservissement de position du moteur. De manière classique, la commande du moteur présente deux boucles permettant d'asservir successivement la vitesse et la position.

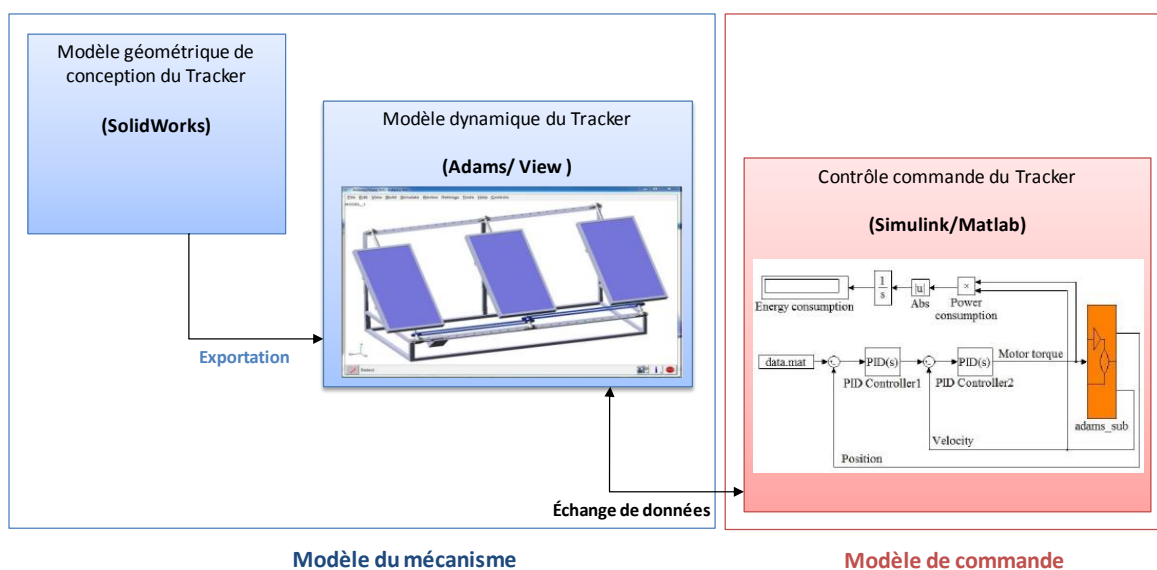


Figure 25- Modélisation d'un tracker PV et de sa commande (d'après (Tatu.N, 2012))

Bien qu'il permette d'étudier la consommation d'énergie d'un tracker PV et de comparer différentes trajectoires, ce modèle ne permet pas de mettre en évidence la performance du suivi pour l'estimation de puissance du module PV et du tracker. En outre, une telle modélisation complète d'un tracker, mettant en œuvre le modèle mécanique, le modèle de l'actionneur ainsi que la commande, sera plus facile à manipuler si elle est réalisée sur un seul environnement de simulation. Le choix d'environnement par les auteurs semble uniquement justifié par l'économie de la mise en équation de la géométrie du système mécanique et n'est pas mis à profit pour prendre en compte les éventuelles déformations sous l'effet de la gravité ou de perturbations extérieures.

Le modèle proposé par (Maatallah.T, 2011) permet de prédire et de comparer la puissance produite par un module PV dans trois situations différentes : Module posé sur une structure fixe, sur un tracker 1-axe et sur un tracker 2-axes. Ce modèle combine un sous-modèle de module PV et un sous-modèle mathématique d'estimation de l'ensoleillement global (basée sur un calcul astronomique). Ce modèle d'estimation de l'ensoleillement prend en considération la date et l'heure, les coordonnées GPS de la centrale (longitude et latitude) ainsi que la position du module par rapport au soleil (azimut et élévation). Le sous-modèle du PV tient compte de l'ensoleillement estimé et de la température de la cellule photovoltaïque calculée  $T_c$  pour prédire la puissance maximale du module (Figure 26). La position du module PV, utilisée comme entrée de ce modèle et permettant de prédire l'ensoleillement puis la puissance maximale, est définie selon le cas d'étude (structure fixe, tracker mono-axe et tracker double axes). Pour le cas d'une structure fixe la position définie en azimut et en élévation est la valeur optimale sur une année. Pour le tracker un axe, le déplacement en élévation est simulé par un changement de position tous les mois. Donc la position en azimut est la valeur optimale sur une année et la position en élévation est la valeur optimale pour chaque mois. Finalement, pour le cas d'un tracker deux axes les positions en azimut et en élévation changent, en prenant la valeur optimale, tous les mois.

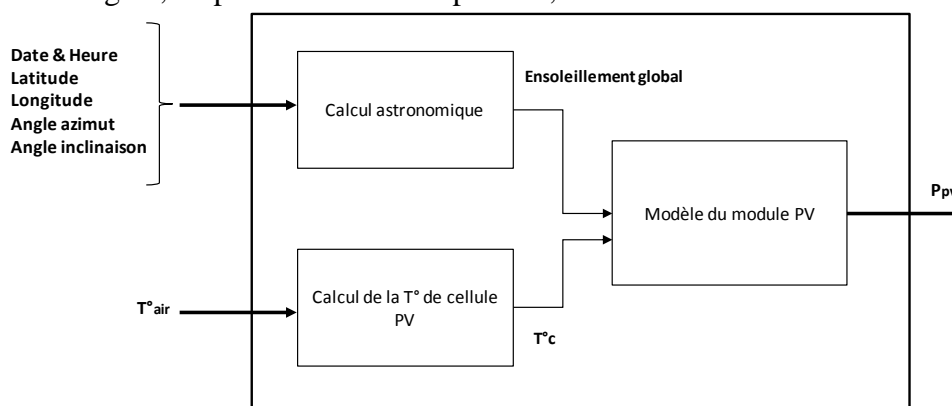


Figure 26- Modèle d'une centrale PV fixe, sur tracker 1 ou 2 axes (d'après (Maatallah.T, 2011))

Certes, ce modèle permet d'avoir une idée sur l'intérêt de l'utilisation d'un tracker mono-axe ou à deux axes grâce à une comparaison de la puissance produite, mais il est loin de simuler le comportement du tracker et d'estimer les gains potentiels d'un suivi du soleil. En effet, ce modèle ne met pas en œuvre la commande du tracker et les performances du suivi (tracking) sont supposées parfaites. Ceci ne permet donc pas de comparer les différents types

de poursuite du soleil, ni de montrer l'influence des performances du suivi sur la production. En outre, le modèle ne traite pas la partie mécanique du tracker et son impact sur son rendement et, par conséquent, sur la production du module PV.

L'étude proposée dans (China.C.S, 2011) évoque la modélisation d'un tracker PV, comme représentée sur la Figure 27. Ce modèle comporte les sous modèles suivants :

- Un modèle de prédiction de la puissance du module PV en fonction de l'ensoleillement global et de la température.
- Un modèle de l'actionneur du tracker (un moteur électrique à courant continu) permettant de calculer la position du tracker.
- un modèle du capteur solaire utilisé dans le cas d'une commande en boucle fermée du tracker. Il permet de calculer les tensions de sorties du capteur indiquant la direction du soleil en fonction la position théorique du soleil, de la position du tracker et de l'ensoleillement.
- Un bloc contenant la loi de commande du tracker (c'est l'équivalent d'un modèle du microcontrôleur qui est le siège de la commande).

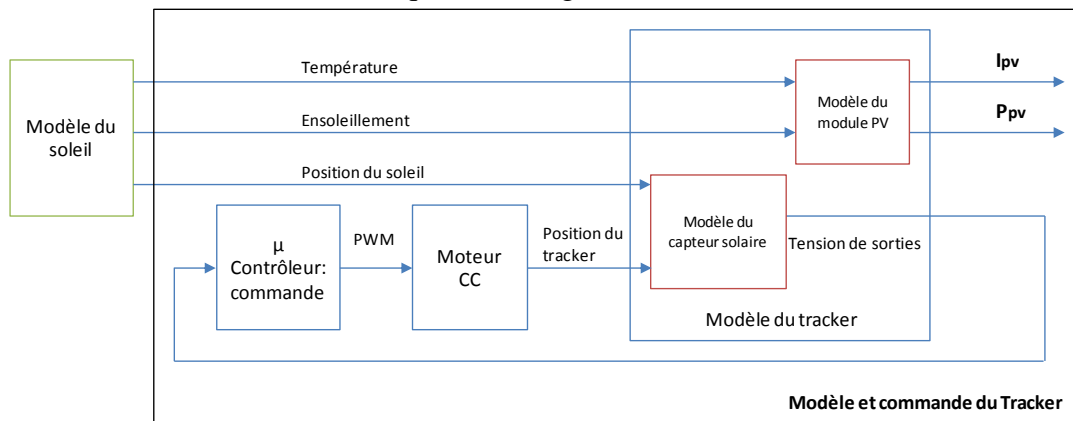


Figure 27- Modèle d'un tracker PV sous Simulink (d'après (China.C.S, 2011))

Ce type de modélisation permet d'atteindre plusieurs objectifs : la conception et le dimensionnement d'un tracker PV, la prédiction de la production mais aussi la validation et la comparaison des différentes stratégies de commande des trackers PV. Il permet ainsi de caractériser le comportement électrique des modules PV en fonction des performances du suivi. Cette étude est par conséquent très intéressante car elle vise, dans le cas d'un tracker PV, les objectifs que nous nous sommes fixés pour les trackers HCPV.

Par conséquent, les travaux de modélisation présentés dans (Maatallah.T, 2011) et surtout dans (China.C.S, 2011) pourront servir de base au développement d'un modèle de tracker HCPV qui satisfasse les objectifs définis précédemment. Il sera alors nécessaire de remplacer le modèle de module PV par un modèle de module HCPV, comme présenté dans la Figure 28, et d'ajouter les entrées qui influent sur la puissance produite. Le modèle de motorisation sera modifié selon la nature et les caractéristiques des actionneurs du tracker HCPV pris comme référence dans le présent travail de thèse. La structure mécanique sera, pour cette première étude, considérée comme rigide.

Ainsi, l'objectif est de réaliser un simulateur de tracker HCPV le plus générique possible afin de pouvoir tester différentes stratégies de commande, ce qui permettra la mise en évidence de l'influence de la performance du suivi (performance de la commande adoptée) sur la production.

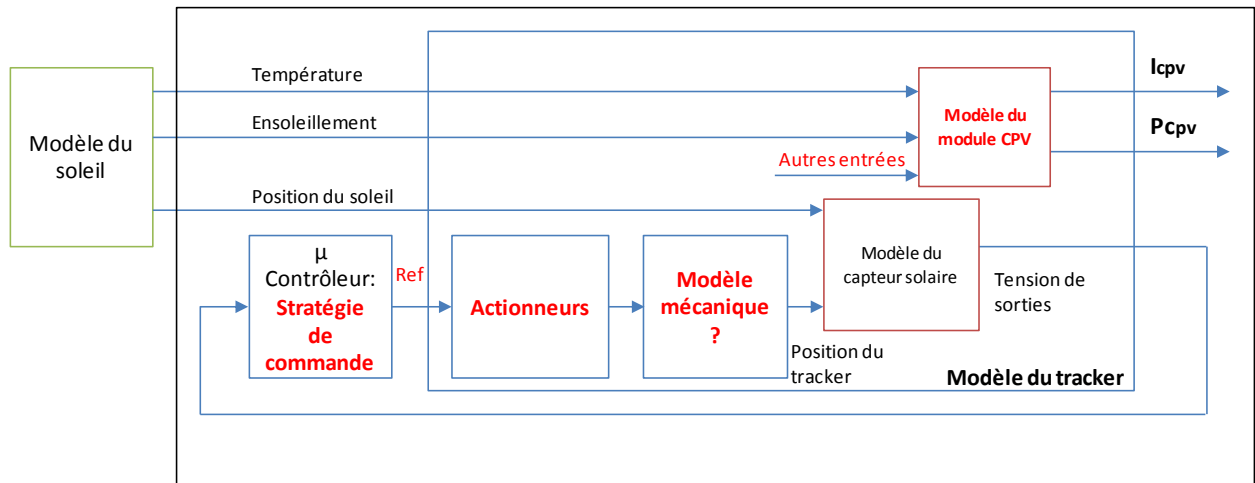


Figure 28- Esquisse d'un modèle de tracker HCPV

## I.6. Problématique scientifique

Dans cette synthèse bibliographique, plusieurs problématiques scientifiques apparaissent et justifient notamment ces travaux de thèse. En effet, la modélisation complète d'un système dynamique et multi-physique tel que le tracker HCPV pour un objectif de commande est l'un des questionnements scientifiques importants et encore d'actualité.

En effet, bien qu'il existe des modèles de module HCPV, des modèles de moteurs électriques et bien qu'une première version de la structure mécanique du tracker soit assez facilement modélisable, le manque d'un modèle complet de tracker HCPV, destiné à la fois à l'étude du comportement mécanique et électrique du tracker, à l'estimation de la production du module HCPV et au test/validation des nouvelles stratégies de commande, est avéré dans la littérature spécialisée. Cette constatation est confirmée par la synthèse bibliographique qui a abouti essentiellement à des modèles détaillés de trackers développés pour la technologie classique de panneaux photovoltaïques (PV). En revanche, l'architecture de ces modèles constituera une source d'inspiration pour le développement d'un simulateur de tracker HCPV.

Concernant la stratégie de commande du tracker HCPV, des propositions se détachent de la synthèse bibliographique. La première conclusion est que la commande hybride, utilisant un viseur solaire, est la solution la plus adaptée à cette technologie HCPV étant donné les caractéristiques et les exigences en termes de précision de ce type de tracker. L'une des problématiques scientifiques de la nouvelle stratégie de commande proposée sera donc de trouver une solution pour éviter l'utilisation de ce capteur solaire et de réduire ainsi le coût de la commande et, a fortiori, les coûts d'installation, de réglage et d'entretien d'un tracker CPV. L'enjeu est donc de trouver un compromis entre précision (par conséquent maximisation de la production) et coût du système de suivi.

La deuxième conclusion tirée est que la stratégie de commande en boucle ouverte basée sur une méthode d'optimisation hors ligne du pas de discrétisation semble être intéressante. Cette approche peut constituer une source d'inspiration pour une optimisation, mais cette fois-ci en ligne, pour la génération en temps réel de la trajectoire du tracker.

D'autre part, concernant la modélisation d'un module HCPV, un nombre important de travaux apparaissent dans la littérature. En effet, la modélisation et donc la prédiction de la production maximale d'un CPV et plus particulièrement, d'un HCPV demeure d'une grande complexité. Cette difficulté provient de la présence de plusieurs facteurs et conditions influentes sur la caractérisation d'un module CPV et sur la puissance produite, tels que l'ensoleillement global, l'ensoleillement direct, la température, la vitesse et la direction du vent, le taux de concentration, ainsi que les matériaux et la forme de la cellule photovoltaïque. Dans ce sens, la synthèse bibliographique a montré que les modèles à paramètres réduits basés sur les réseaux de neurones paraissent intéressants dans le cas d'une commande neuronale du tracker ou dans le cas de la prédiction de la production. Cependant, l'utilisation de ces modèles s'avère difficile étant donné l'absence de données expérimentales en nombre suffisant, indispensables pour l'apprentissage d'un réseau de neurones. Par contre, les modèles semi-empiriques proposés dans (Fromer.N, 2009), (Sandia, 1997), (ASTME, 2009) ou encore (Fernández.E.F, 2012) pourront servir de base pour un objectif de modélisation du comportement électrique dynamique du module HCPV et la prédiction de sa puissance maximale en fonction des facteurs atmosphériques.

La modélisation d'un module HCPV présente aussi certaines difficultés, notamment concernant l'influence de la qualité du suivi du soleil sur les performances des systèmes HCPV. Une modélisation qui tiendrait compte de l'erreur de position du tracker serait la plus adaptée pour les objectifs, définis précédemment, de modélisation d'un tracker complet et d'étude de stratégies de commande associées. La caractérisation de cette influence de la précision du suivi sur la puissance produite par le module constitue donc une problématique scientifique très intéressante à traiter. En effet, l'état de l'art a montré que seul le modèle proposé par (Steiner.M, 2012) propose une approche assurant l'analyse et la prise en compte de l'influence des performances de suivi sur la production du module. Néanmoins, il reste difficile à manipuler et assez complexe pour des objectifs tels que les nôtres.

## **I.7. Objectifs et contributions de la thèse**

Pour résumer, les objectifs de ce travail de thèse sont définis comme suit et illustrés par la Figure 29 :

- La modélisation d'un module HCPV monté sur tracker en tenant compte de la performance de suivi du tracker et des conditions atmosphériques. L'idée est que ce modèle doit permettre de prédire la puissance maximale du module HCPV en fonction de l'erreur de position du tracker face au soleil, de l'ensoleillement direct et de la température.
- Le développement d'un simulateur de tracker HCPV permettant d'étudier l'influence de la performance de suivi sur le comportement et la production d'énergie d'un

module HCPV. Il doit permettre aussi d'évaluer les performances des stratégies de commandes proposées par la suite. Le simulateur doit donc comporter un modèle électromécanique du tracker permettant de calculer la position du tracker ainsi qu'un modèle de calcul de la position théorique du soleil en fonction de l'heure, de la date et des coordonnées géographiques de l'installation. A partir de ces deux modèles, il sera alors possible d'estimer l'erreur de position du tracker (performance de suivi) qui permettra d'estimer la puissance du module HCPV.

- Le développement d'une stratégie de commande visant à améliorer la stratégie de commande actuelle, dite de référence, en termes de maximisation de la production et de réduction des coûts de développement, de fonctionnement et de maintenance. Une première idée consiste en une stratégie de commande sans capteur solaire supplémentaire au module HCPV lui-même. La stratégie proposée utilise une méthode d'optimisation du gradient appliquée en temps réel à la génération de trajectoire du tracker.
- L'étude des différentes commandes de recherche de maximum de puissance (MPPT) d'un module photovoltaïque et la proposition d'une nouvelle approche d'algorithme MPPT basée sur une amélioration d'une commande classique par un réseau de neurones artificiel. L'objectif de cette étude est d'apporter des éléments de solution à une des difficultés d'implémentation pratique de la stratégie, proposée au Chapitre III, pour la génération de la trajectoire du tracker et exploitant le module comme capteur solaire. Il s'agit de mettre en évidence le compromis entre rapidité, précision et simplicité assuré par l'algorithme MPPT proposé. L'état de l'art sur les différents algorithmes MPPT est présenté à part, dans le dernier chapitre.

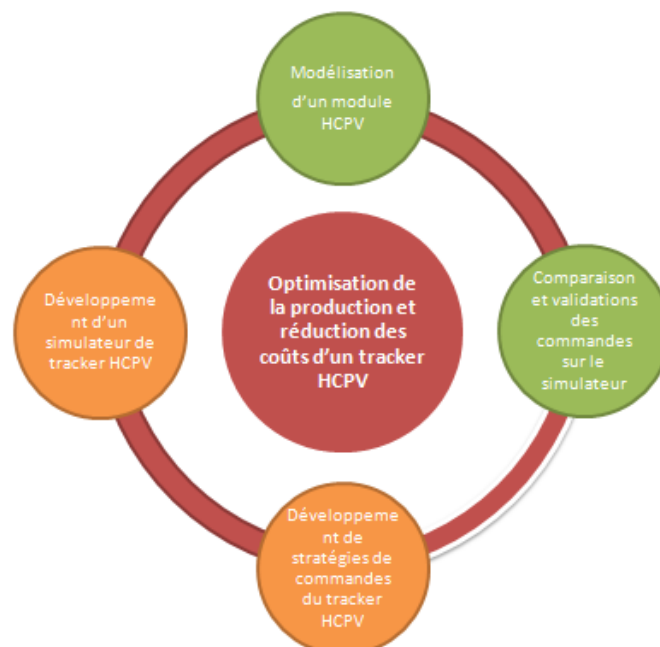


Figure 29- Objectifs de la thèse

---

## Chapitre II

# Simulateur de comportement d'un tracker HCPV

---

Le simulateur présenté dans ce chapitre a pour objectifs de tester et de comparer différentes stratégies de commande d'un tracker HCPV, essentiellement en termes de puissance produite et de consommation des actionneurs. La simulation doit donc permettre d'étudier l'évolution de la puissance produite par le module HCPV pour une période et zone géographique de fonctionnement donnée (Heure et date de simulation et coordonnées GPS du tracker) ainsi qu'en fonction des variations des conditions atmosphériques (ensoleillement et température) et de la performance de suivi qui résulte de la stratégie de commande adoptée. Une étude de l'évolution de la puissance électrique consommée par les actionneurs du tracker doit être menée en parallèle.

La Figure 30 présente un schéma descriptif de l'objectif de simulateur. Il s'articule autour du modèle du tracker HCPV à deux axes (azimut et élévation) contenant les sous-modèles suivants :

- Un modèle du soleil, basé sur un calcul astronomique, capable de calculer les positions d'azimut et d'élévation (hauteur)  $(A, h)$  théoriques, que le tracker doit viser, en fonction de l'heure et de la date. Dans le contexte de cette étude, le résultat de ce calcul est également utilisé comme position réelle du soleil pour servir d'entrée au modèle des modules HCPV ( $(A, h)_{\text{soleil}} = (A, h)_{\text{théorique}}$ ). Le calcul astronomique utilisé pour la génération de trajectoire du tracker est donc supposé parfait. Ce sous-modèle permet également de générer des conditions atmosphériques en fonction de l'heure et de la date (ensoleillement et température).
- Un bloc de stratégie de commande du tracker HCPV qui sert à calculer la position de référence du tracker servant de consigne aux deux actionneurs. Dans un premier temps une stratégie de commande de référence sera implémentée puis d'autres commandes proposées dans ce travail seront testées et comparées.
- Un modèle dynamique de moto-variateur asservi en position pour les axes d'élévation et d'azimut.
- Un modèle mécanique du tracker est implémenté afin de calculer la position réelle du tracker HCPV en tenant compte des réducteurs de vitesses utilisés, des inerties du tracker et des frottements estimés.



- Un modèle de la prédiction de la puissance maximale d'un module HCPV monté sur tracker. Celui-ci tient compte de l'erreur de position du tracker (erreur entre la position visée par le tracker, issue du modèle électromécanique asservi, et la position théorique du soleil, calculée par les équations astronomiques fournies par le modèle du soleil) et des conditions atmosphériques fournies par le modèle du soleil. Ce sous-modèle des modules HCPV montés sur tracker incluent la fonction de recherche de maximum de puissance (MPPT) réalisée physiquement par l'onduleur, ce qui explique l'utilisation de la terminologie « modèle de prédiction de la puissance maximale ».

Grâce à ses différents sous-modèles, ce simulateur a la particularité, par rapport aux simulateurs et modèles apparus dans la synthèse bibliographique, de permettre l'étude de l'influence de la performance du suivi du soleil sur la production des modules HCPV, permettant ainsi une étude et une comparaison des stratégies.

Il est conçu et développé de manière générique, modulaire, afin de permettre de tester plusieurs types de tracker HCPV (autres types d'actionneurs, autres structures mécaniques, ...), plusieurs types de modules HCPV et surtout différentes stratégies de commande. Ce caractère modulaire rend les sous-modèles assez facile à manipuler et à modifier. Ces sous-modèles seront détaillés dans les parties suivantes.

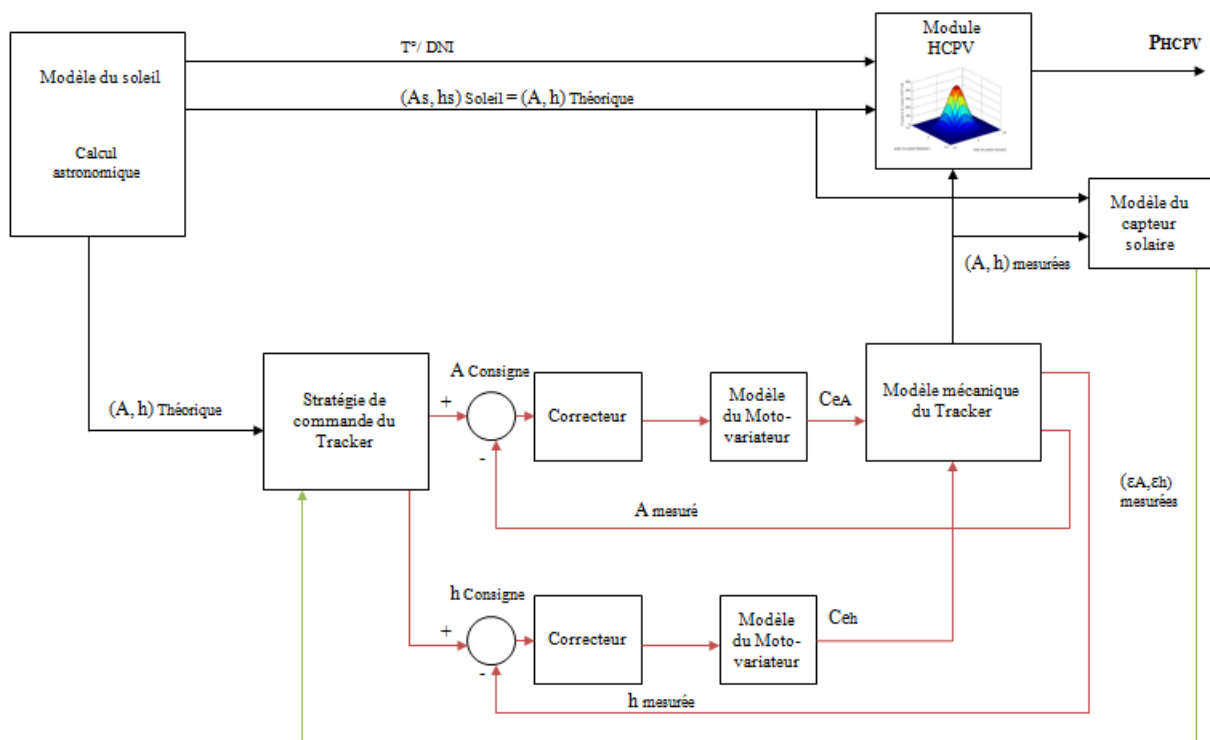


Figure 30- Schéma synoptique du modèle de tracker HCPV proposé

Le simulateur développé sous Matlab/Simulink® et ses différents blocs sont présentés en *annexe 4*.

## II.1. Modèle du soleil

Le modèle du soleil proposé est un modèle de génération de données. En effet, il est capable de générer les données atmosphériques nécessaires pour une estimation de la puissance du module HCPV telles que la température et l'ensoleillement global et direct. Il permet aussi de calculer les données de position théorique du soleil à viser par le tracker.

Les données d'ensoleillement direct et de température, sont générées par un fichier de points (Figure 31) contenant des données de conditions atmosphériques "générales" fournies par la base de données européenne de PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System).

Les positions théoriques en élévation et azimut ( $(A_s, h_s)$  théoriques), à viser par le tracker, sont générées à partir d'un calcul astronomique en fonction de l'heure, de la date et des coordonnées géographiques du tracker (coordonnées GPS : longitude et latitude). Les algorithmes de calcul astronomique sont issus de l'ouvrage « Astronomical Algorithms » (Meeus, 1991). Les étapes du calcul de la position du soleil de cet algorithme sont :

- Calcul du jour julien ;
- Calcul de la position apparente du soleil ;
- Calcul du temps sidéral ;
- Transformation des coordonnées dans le repère horizontal  $(A, h)$ .

L'annexe 2 présente les détails de ce calcul astronomique.

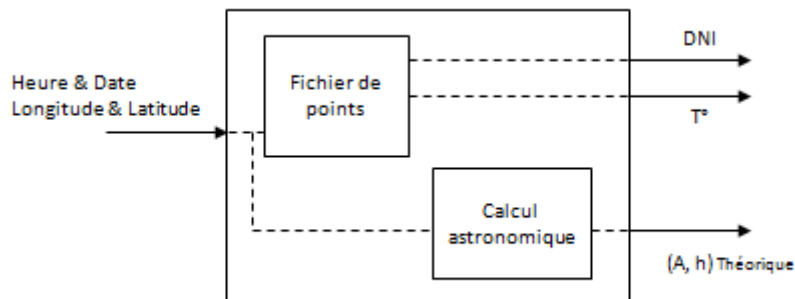


Figure 31- Modèle du soleil

L'algorithme de calcul de la position théorique du soleil a été validé par comparaison avec les tables d'éphéméride données par l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides, [www.imcce.fr](http://www.imcce.fr)). Les détails de la procédure de validation sont présentés en annexe 3.

## II.2. Modèle électromécanique asservi du tracker HCPV

Le simulateur du tracker doit tenir compte du comportement électrique des actionneurs et de la structure mécanique du démonstrateur "tracker HCPV" choisi comme tracker de

référence dans ces travaux de thèse. Les principales caractéristiques de ce démonstrateur tracker HCPV de référence sont présentées dans l'*annexe 1*. Ce tracker de référence comporte deux axes (Figure 32) qui possèdent chacun leur actionneur pour contrôler l'azimut et l'élévation. L'actionneur utilisé pour chacun des deux axes est un bloc « moto-variateur » composé d'une machine asynchrone triphasée commandée en boucle ouverte par un variateur de vitesse (contrôle scalaire). Un modèle dynamique du bloc moto-variateur asservi en position et un modèle de la partie mécanique du tracker sont présentés dans cette partie.

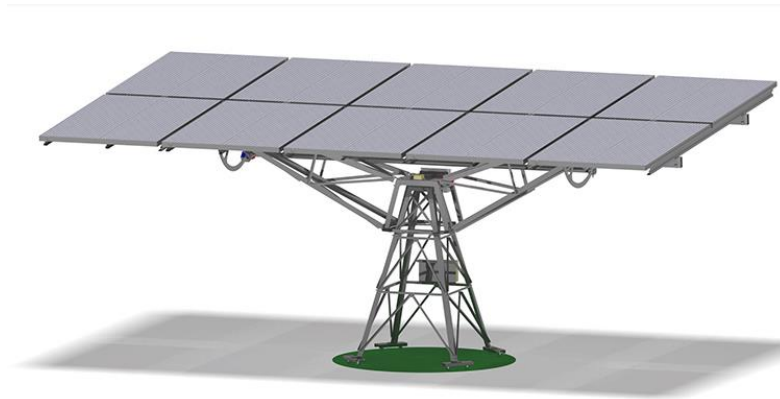


Figure 32- Démonstrateur « Tracker HCPV »

### II.2.1. Modèle dynamique de la machine asynchrone

Un modèle dynamique basé sur des hypothèses simplificatrices a été adopté, afin de modéliser la machine asynchrone contrôlée en boucle ouverte par un variateur de vitesse. Ce modèle prend en compte la conversion électromécanique et les pertes de la machine. Cette modélisation dynamique est adoptée afin de modéliser correctement les régimes transitoires du système, ce qui permet d'envisager une meilleure estimation de l'énergie consommée par les actionneurs. Concernant la commande, un contrôle scalaire est choisi pour se rapprocher au plus du système (tracker HCPV) pris en référence dans cette étude.

Il existe plusieurs modèles de la machine asynchrone triphasée dans la littérature. Ils sont basés sur les équations générales décrivant le fonctionnement de la machine, supposée en régime linéaire (machine non saturée), dans un référentiel de Park d-q (Caron.J-P, 1995) (Ansari.A, 2010).

Le modèle proposé dans (Caron.J-P, 1995) a été choisi pour le développement du simulateur car il est facile à manipuler et possède un nombre raisonnable de paramètres à identifier. En effet, ce modèle est caractérisé par 4 paramètres électriques : la constante de temps rotorique  $T_r$ , le coefficient de dispersion  $\sigma$ , la résistance propre d'une phase statorique  $R_s$  et l'inductance cyclique statorique  $L_s$ . Le modèle électrique de la machine est donné par l'équation (5) (Caron.J-P, 1995) :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & -L_s w_s & (1-\sigma)L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & -(1-\sigma)L_s w_s \\ L_s w_s & R_s + L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & (1-\sigma)L_s w_s & (1-\sigma)L_s \left(\frac{d}{dt}\right) \\ \left(\frac{d}{dt}\right) & -w_r & \left(\frac{1}{T_r}\right) + \left(\frac{d}{dt}\right) & -w_r \\ w_r & \left(\frac{d}{dt}\right) & w_r & \left(\frac{1}{T_r}\right) + \left(\frac{d}{dt}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Remarque : L'opérateur  $\left(\frac{d}{dt}\right)$  est employé comme notation de la dérivation appliquée aux courants statoriques et rotoriques. Cette notation est reprise de (Caron.J-P, 1995).

Diverses formes du calcul du couple électromagnétique sont proposées dans (Caron.J-P, 1995). L'expression du couple de ce modèle est représentée comme suit :

$$C_e = p \left(\frac{M}{L_r}\right) (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (6)$$

Les coefficients  $p$ ,  $L_r$ ,  $M$ ,  $i_{sq}$  et  $i_{sd}$  sont respectivement le nombre de paires de pôle, l'inductance cyclique rotorique, l'inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator et les courants statoriques dans le repère de Park. Les flux rotoriques dans le repère de Park  $\phi_{rd}$  et  $\phi_{rq}$  sont calculés à partir des équations (7) et (8) :

$$\phi_{rd} = \frac{1}{T_r s + 1} (M.i_{sd} + T_r w_r \phi_{rq}) \quad (7)$$

$$\phi_{rq} = \frac{1}{T_r s + 1} (M.i_{sq} - T_r w_r \phi_{rd}) \quad (8)$$

La Figure 33 montre les entrées et les sorties du modèle dynamique de la machine asynchrone triphasée. En effet, le modèle permet de calculer le couple électromagnétique en fonction des tensions statoriques dans le repère de Park,  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$ , et des pulsations statorique et rotorique  $w_s$  et  $w_r$ .

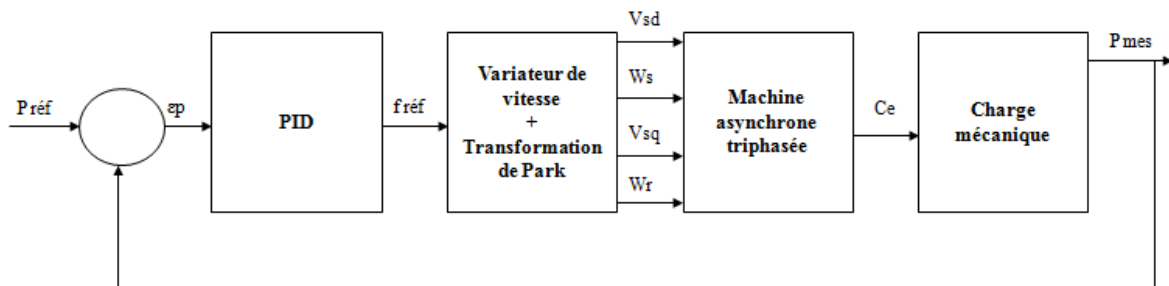


Figure 33- Modèle électromécanique asservi du tracker HCPV

La modélisation de la machine asynchrone triphasée présentée ci-dessus est précédée d'une modélisation du variateur de vitesse et des transformations du repère triphasé au repère diphasé puis au repère de Park. Ce modèle du variateur de vitesse assure une commande scalaire pour la machine asynchrone. Pour le système étudié (tracker de référence), la vitesse de la machine asynchrone n'est pas asservie, mais simplement contrôlée "en boucle ouverte" avec un paramétrage de rampes d'accélération donc de fréquence. Le modèle du variateur prend donc simplement en compte deux rampes d'accélération et de décélération, telles que décrites en Figure 34 (DIGIDRIVE-SK, 2008), pour générer un système triphasé de tensions d'alimentation à fréquence variable.



Figure 34- Rampe d'accélération et de décélération du variateur de vitesse (DIGIDRIVE-SK, 2008)

La fréquence de consigne en entrée du modèle provient d'un régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée (PID). Les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  ainsi que la pulsation statorique d'alimentation sont obtenues après application de la transformation de Park (Figure 33).

La fonction de transfert, dans le domaine de Laplace, du régulateur PID, assurant l'asservissement de position, est représentée par l'équation (9).

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_s \cdot s \right) \quad (9)$$

Le réglage de ces paramètres a été effectué par la méthode empirique de Ziegler et Nichols ne nécessitant pas une connaissance parfaite du modèle du procédé à commander. En effet, cette technique de réglage du régulateur a été retenue de manière à obtenir des performances équivalentes à celles du système pris pour référence.

## II.2.2. Modèle mécanique du tracker

L'objectif de la modélisation de la partie mécanique est de calculer les positions angulaires en azimut et en élévation ( $A, h$ ) du tracker en fonction du couple des moteurs, de des différents étages de réduction de vitesse ainsi que des inerties et des frottements du tracker. Pour cette première modélisation, nous considérons que l'ensemble de la chaîne de transformation de mouvement est indéformable.

Le tracker contient, pour chacun des axes de rotation (élévation et azimut), trois étages de réduction : celui du motoréducteur, une roue et vis sans fin et un pignon entraînant une

couronne dentée solidaire de l'ensemble à déplacer. La Figure 35 montre, la transmission mécanique en 3 étages de réduction pour l'axe d'élévation.



Figure 35- Illustration de la conception mécanique du tracker (Axe d'élévation)

Le principe fondamental de la dynamique donne :

$$C_e - C_r = f_{eq} \Omega_m + J_{eq} \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (10)$$

Les coefficients  $f_{eq}$ ,  $J_{eq}$  et  $C_r$  sont respectivement le coefficient de frottement équivalent du système mécanique, l'inertie équivalente de l'axe considéré ramenée à l'arbre du moteur et le couple résistant. L'expression de la vitesse mécanique du tracker est la solution de l'équation fondamentale de la dynamique (10) après passage au domaine de Laplace :

$$\Omega_m(s) = (C_e - C_r) \frac{1}{f_{eq} + J_{eq}s} = (C_e - C_r) \frac{1/f_{eq}}{1 + \tau_{mec}s} \quad (11)$$

Avec

$$\tau_{mec} = \frac{J_{eq}}{f_{eq}} \quad (12)$$

Le coefficient  $\tau_{mec}$  est la constante de temps mécanique.

La position est calculée en intégrant la vitesse mécanique calculée en (11) et en prenant en considération les 3 étages de réduction. Les relations cinématiques correspondant à chaque étage de réduction sont présentées ci-dessous :

Moto réducteur :

$$\Omega_1 = k_{r1}\Omega_m \quad (13)$$

Roue et vis sans fin :

$$\Omega_2 = k_{r2}\Omega_1 \quad (14)$$

Pignon-couronne dentée :

$$\Omega_3 = k_{r3}\Omega_2 \quad (15)$$

Le calcul de la vitesse mécanique du moteur basé sur l'équation (11) est précédé par une estimation de l'inertie équivalente ramenée au moteur, des coefficients de frottement et d'un calcul du couple résistant.

L'expression de l'inertie équivalente ramenée au moteur est déterminée à partir de l'expression de l'énergie cinétique :

$$W_{Jeq} = \frac{1}{2} J_{eq} \Omega_m^2 \quad (16)$$

$$W_{Jeq} = \frac{1}{2} (J_0 + J_1 k_{r1}^2 + J_1 k_{r1}^2 k_{r2}^2 + J_2 k_{r1}^2 k_{r2}^2 k_{r3}^2) \Omega_m^2 \quad (17)$$

$$J_{eq} = J_0 + J_1 k_{r1}^2 + J_1 k_{r1}^2 k_{r2}^2 + J_2 k_{r1}^2 k_{r2}^2 k_{r3}^2 \quad (18)$$

Le coefficient de frottement équivalent ramené au moteur est déterminé à partir de l'équation (19) :

$$P_{Jeq} = f_{eq} \Omega_m^2 \quad (19)$$

$$f_{eq} = f_0 + f_1 k_{r1}^2 + f_1 k_{r1}^2 k_{r2}^2 + f_2 k_{r1}^2 k_{r2}^2 k_{r3}^2 \quad (20)$$

$$P_{eq} = (f_0 + f_1 k_{r1}^2 + f_1 k_{r1}^2 k_{r2}^2 + f_2 k_{r1}^2 k_{r2}^2 k_{r3}^2) \Omega_m^2 \quad (21)$$

**Calcul de l'inertie du tracker azimut et élévation :**

Pour l'axe d'élévation, les parties concernées du tracker sont, comme le montre la Figure 35, le plateau et les modules. Afin de simplifier les calculs, la matrice des inerties a été établie sur la forme d'un parallélépipède rectangle de côté a, b et c.

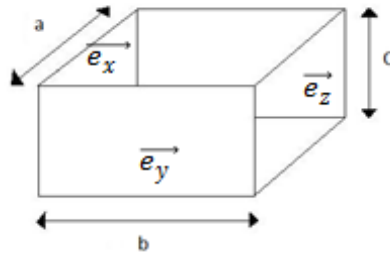


Figure 36- Forme simplifiée (parallélépipède rectangle) pour l'estimation des inerties

$$I(x, y, z) = \frac{m_{\text{plateau+modules}}}{12} \begin{bmatrix} c^2 + b^2 & 0 & 0 \\ 0 & c^2 + a^2 & 0 \\ 0 & 0 & a^2 + b^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$m_{\text{plateau+modules}}$  est la masse du plateau et des modules.

Pour l'axe d'azimut les parties concernées du tracker sont, comme le montre la Figure 37 ci-dessous, la tourelle, le plateau et les modules. L'inertie totale sera donc la somme de celles de deux sous-systèmes : le plateau et les modules d'une part, et la tourelle d'autre part.

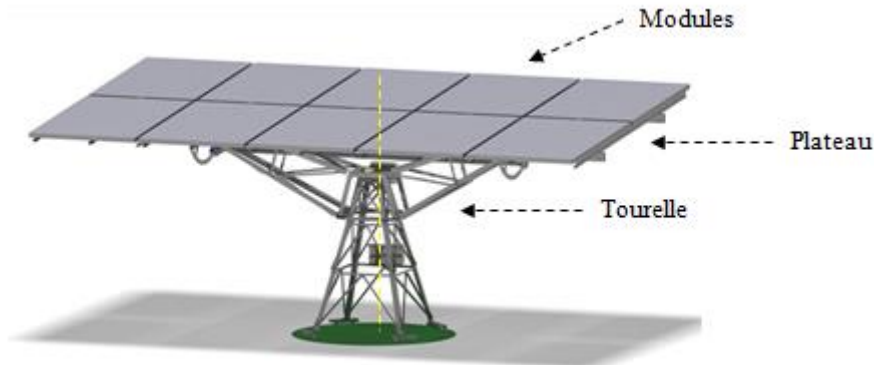


Figure 37- Axe d'azimut du tracker

$$I(x, y, z)_{\text{tourelle}} = \frac{m_{\text{tourelle}}}{12} \begin{bmatrix} c_2^2 + b_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & c_2^2 + a_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & a_2^2 + b_2^2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$I(x, y, z) = I(x, y, z)_{\text{tourelle}} + I(x, y, z)_{\text{plateau+modules}} \quad (24)$$

$m_{\text{plateau+modules}}$  et  $m_{\text{tourelle}}$  sont respectivement la masse du plateau et des modules et la masse de la tourelle.



### **Estimation du couple résistant :**

Le couple résistant est supposé nul pour le mouvement en azimut ( $Cr_{Azimut}=0$ ) car ce mouvement n'est pas influencé par la gravité et en adoptant l'hypothèse qu'il n'y a pas d'efforts externes (perturbation). Pour le mouvement en élévation, le couple résistant évolue avec l'angle d'élévation du tracker. L'expression du couple résistant est donc écrite sous la forme suivante :

$$Cr_{élévation} = m_{plateau+modules} \cdot g \cdot \cos(h) \cdot d \quad (25)$$

$m_{plateau+modules}$ ,  $g$  et  $d$  sont respectivement la masse du plateau et des modules, l'intensité de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>) et la distance entre le centre de gravité et le centre de la rotation. Le modèle mécanique du tracker développé sous Simulink est présenté dans l'*annexe 4*.

### **II.2.3. Tests de démarrage et d'asservissement de position de la machine asynchrone sur le simulateur**

Les performances du modèle électromécanique asservi du tracker sont évaluées par deux séries de simulations numériques. La première simulation vise à tester les performances dynamiques du modèle et sa mise en œuvre lors d'un démarrage sur un réseau triphasé équilibré de tension sinusoïdales à fréquence variable généré par le variateur. La machine asynchrone triphasée est soumise à une rampe de fréquence allant de 0 à 50Hz en 1s.

La phase de démarrage de la machine met en évidence, Figure 38, des courants statoriques importants. Ces courants peuvent causer le suréchauffement et la destruction du moteur en cas de répétitions trop fréquentes. Cette constatation est intéressante de point de vue stratégie de la génération de la trajectoire du tracker. En effet, un mode de fonctionnement en continu ou des mouvements discontinus du tracker n'ont pas le même effet sur le comportement thermique des deux moteurs asynchrones.

Les résultats obtenus montrent aussi un couple électromagnétique fortement oscillant en régime transitoire. Pour une commande scalaire à V/f constant, la vitesse du moteur croît avec la fréquence de référence imposée, jusqu'à sa valeur maximale, avec un comportement oscillant en rapport avec les oscillations observées sur le couple. La dynamique de la machine simulée est proche de celle de l'actionneur du tracker pris comme référence dans cette étude, tout comme le réglage des rampes de fréquence du variateur.

La deuxième simulation a pour objectif d'évaluer les performances de l'asservissement de position des axes du tracker. Elle consiste à fixer un échelon de position de 1 degré du tracker et à visualiser l'évolution de la position de sortie ainsi que le couple électromagnétique et la vitesse de la machine asynchrone. La réponse indicielle ainsi obtenue est donnée à la Figure 39 et montre que le tracker atteint sa position de référence (1°) et le temps de réponse est de moins de 6s avec une vitesse proche de la vitesse nominale. La

dynamique du tracker simulé est proche de celle du tracker pris comme référence dans cette étude.

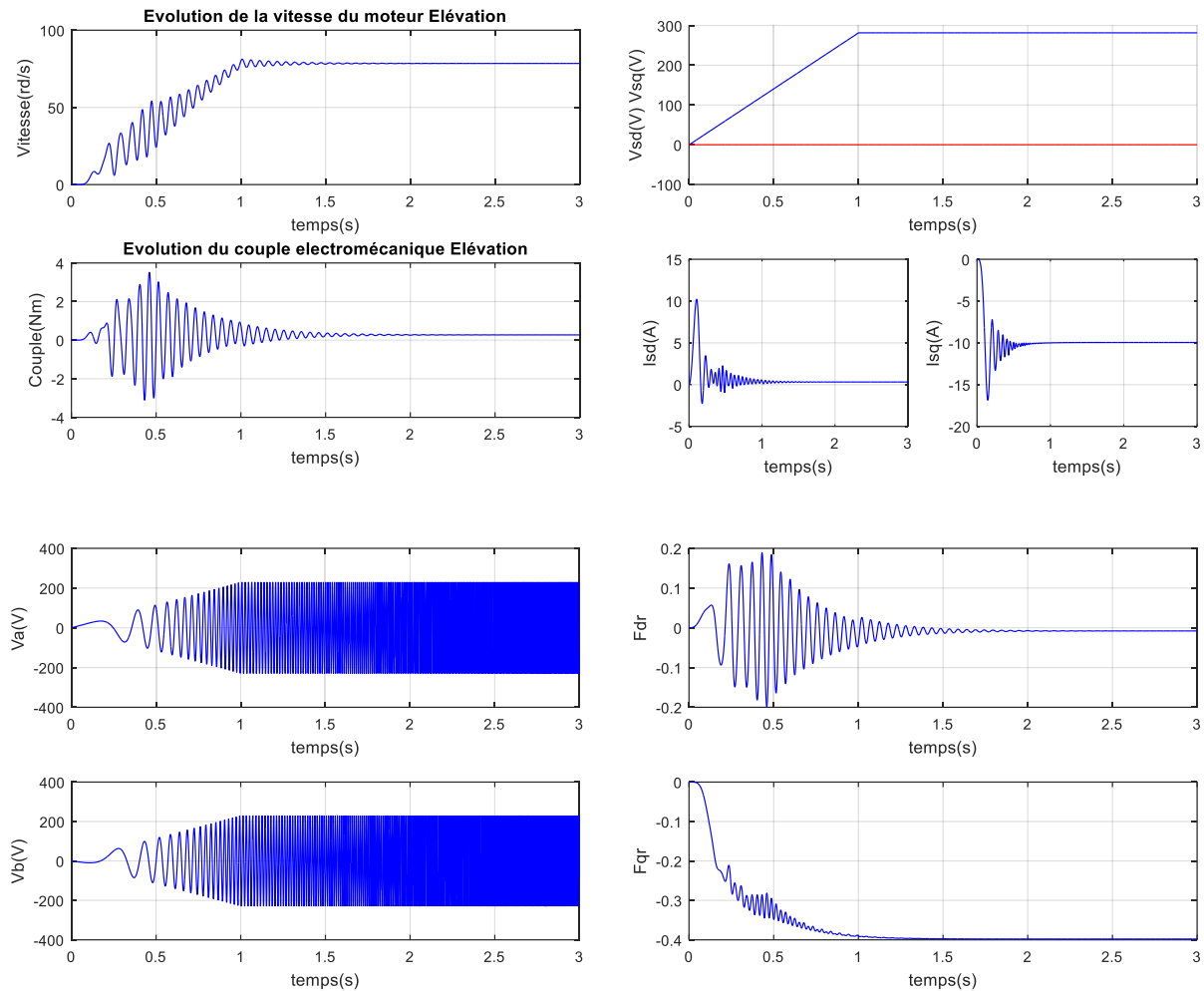


Figure 38 - Simulation du démarrage d'une machine asynchrone triphasée soumise à une rampe de fréquence de 0 à 50Hz en 1s

### II.3. Modèle comportemental d'un module HCPV

Afin d'estimer la puissance maximale produite par un module HCPV en tenant compte de la performance du suivi du soleil (qui dépend de la performance de la stratégie de commande adoptée), trois modèles comportementaux seront présentés dans ce chapitre. Ces modèles seront combinés par la suite, ce qui donne naissance à d'autres modèles comportementaux plus précis. Les paramètres de ces modèles sont identifiés expérimentalement au travers de données "constructeur" du module HCPV du tracker pris comme référence dans cette étude. La précision de ces modèles est évaluée afin de choisir le plus performant, qui sera implémenté dans le simulateur du tracker HCPV.

Dans un second temps, nous proposons un dispositif expérimental et un plan d'expérience, permettant d'identifier et de valider expérimentalement ces modèles sur un prototype tracker HCPV à deux axes. L'expérimentation telle que définie dans ce chapitre

n'étant pas réalisée, une exploitation des résultats, d'une expérimentation similaire, est présentée et analysée à la fin de ce chapitre.

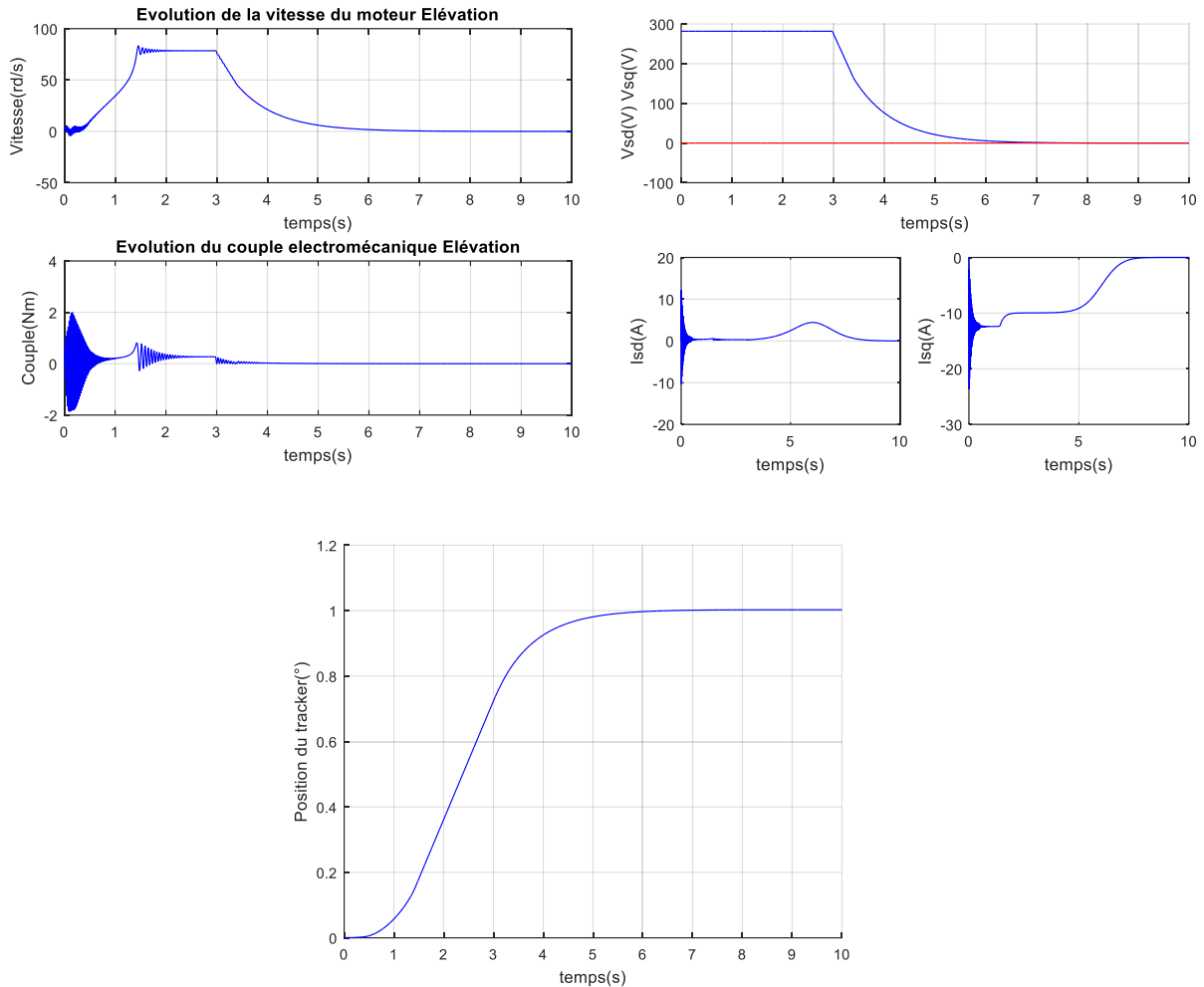


Figure 39 - Réponses indicielle d'un axe du tracker asservi en position

### II.3.1. Proposition de modèles comportementaux d'un module HCPV

Le modèle du module HCPV proposé est un modèle qui tient compte de la performance du suivi du soleil en plus des facteurs atmosphériques. Il permet de prédire la puissance maximale du module HCPV à partir des 4 entrées suivantes : l'erreur de position d'azimut, l'erreur de position d'élévation, l'ensoleillement direct et la température ambiante.

$$P_{HCPV} = f(\varepsilon_A, \varepsilon_h, DNI, T_{air}) \quad (26)$$

Ce modèle, représenté Figure 40, est en fait la combinaison de deux sous-modèles : Le premier permet une estimation du pourcentage de la puissance du module (la production du module) en fonction de l'erreur de position ( $\varepsilon_A, \varepsilon_h$ ). Il permet ainsi d'étudier l'influence de la performance du suivi du tracker sur la production du module HCPV. Ce premier sous-modèle définit la forme de la caractéristique de puissance. Le deuxième sous-modèle permet une

prédiction de la puissance maximale fournie par le module HCPV en fonction de l'ensoleillement direct, de la température et des caractéristiques du module. De manière complémentaire au premier modèle, celui-ci, sert à calculer l'amplitude de la caractéristique de puissance. Cette décomposition implique une hypothèse selon laquelle la forme de la caractéristique est indépendante de l'ensoleillement et de la température. Cette hypothèse reste à confirmer expérimentalement.

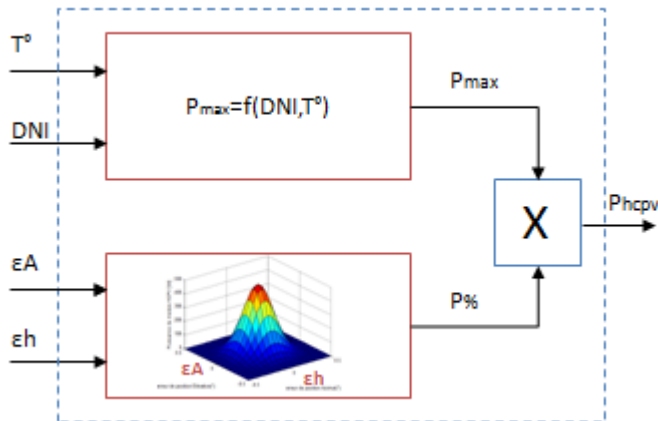


Figure 40- Schéma synoptique du modèle comportementale d'un module HCPV

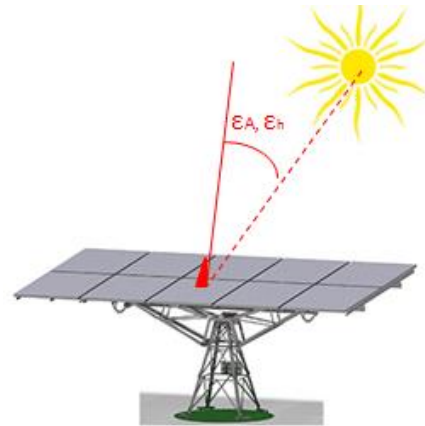


Figure 41- Illustration de l'erreur de position en azimut et en élévation du tracker par rapport au soleil

Premier sous-Modèle : Puissance du module en fonction de l'erreur de suivi :

La forme de la caractéristique de puissance recherchée doit avoir une allure avec une puissance proche de 100% (sommet de la courbe) pour des erreurs d'azimut et d'élévation proches de 0 et une diminution de la puissance au-delà de ce point maximal, jusqu'à atteindre le 0% (production nulle). Pour correspondre à cette forme de caractéristique, trois modèles comportementaux de prédiction de la puissance en fonction de l'erreur de suivi sont proposés sur la base d'une fonction gaussienne, cosinus ou polynomiale :

- Un premier est un modèle comportemental proposé sous forme d'une gaussienne de deux dimensions correspondant aux deux axes d'erreur de position du tracker :

$$f(x, y) = Amp e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)} \quad (27)$$

Les variables  $x$  et  $y$  sont respectivement associées aux erreurs de position d'azimut et d'élévation ( $\epsilon_A, \epsilon_h$ ), l'amplitude  $Amp$  correspond à la sortie modèle de détermination de la puissance maximale, la position de l'extremum ( $x_0, y_0$ ) permet de prendre en compte une éventuelle erreur d'alignement, par construction, entre le module et la position visée par le tracker, et enfin  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  définissent les écarts types de la caractéristique selon les deux axes.

- Un deuxième modèle comportemental utilise une fonction cosinus des erreurs de position du tracker :

$$f(x, y) = Amp.\cos(w_1.x + \phi_1).\cos(w_2.y + \phi_2) \quad (28)$$

Comme précédemment,  $x$  et  $y$  sont respectivement les erreurs de position d'azimut et d'élévation ( $\varepsilon_A, \varepsilon_h$ ),  $\phi$  la phase à l'origine de la fonction cosinus permettant de prendre en compte une éventuelle erreur d'alignement.

- Un troisième modèle comportemental utilise une fonction polynomiale des erreurs de position du tracker :

$$f(x, y) = Amp.(A_1.(x - x_0)^2 + B_1.(x - x_0) + C_1).(A_2.(y - y_0)^2 + B_2.(y - y_0) + C_2) \quad (29)$$

$A$ ,  $B$  et  $C$  sont les paramètres de la fonction polynomiale et  $x$  et  $y$  sont respectivement les erreurs de position d'azimut et d'élévation ( $\varepsilon_A, \varepsilon_h$ ). Les variables  $x_0$  et  $y_0$  définissent la position de l'extremum permettant ainsi de prendre en compte un éventuel décalage entre le module et la position visée par le tracker.

### Deuxième sous-modèle : Puissance maximale du module en fonction des conditions atmosphériques :

Le deuxième élément du modèle de module HCPV est un sous-modèle d'estimation de la puissance maximale d'un module HCPV en fonction de l'ensoleillement direct et de la température ambiante. Il permet ainsi de déterminer l'amplitude de la caractéristique de puissance en fonction de l'erreur de position, après avoir déterminé sa forme.

Le modèle proposé par (Fernandez, 2013) est adopté pour cette étude. Ses paramètres sont déterminés à partir des données caractéristiques du module HCPV monté sur le démonstrateur de tracker HCPV choisi pour ces travaux de thèse.

$$P_{HCPV\_max}(DNI, T) = \frac{P^*}{DNI^*} DNI (1 - \sigma_p (T_{air}^* - T_{air}^2)) \quad (30)$$

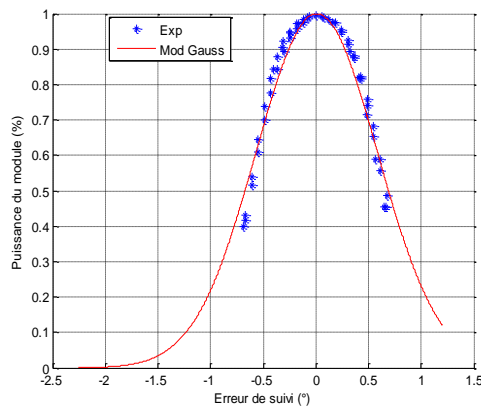
Les paramètres  $P^*$ ,  $DNI^*$  et  $T_{air}^*$  sont respectivement la puissance maximale délivrable par le module, l'ensoleillement direct et la température dans les conditions de référence.  $\sigma_p$  est le coefficient de température de la puissance maximale.

### **II.3.2. Identification des paramètres des modèles comportementaux**

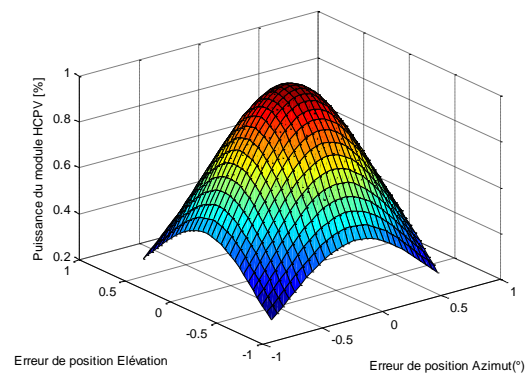
Les paramètres des trois modèles comportementaux proposés sous forme gaussienne (l'amplitude, le centre et l'écart type), sous forme d'une fonction cosinus (l'amplitude, la pulsation et la phase) et encore sous forme d'une fonction polynomiale ont été identifiés à partir de mesures expérimentales. L'identification basée sur un algorithme d'optimisation du type méthode de Newton a été réalisée sous Excel. Les données expérimentales, utilisées pour cette identification, sont fournies par le constructeur de module HCPV sous forme d'une

caractéristique de puissance en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur le module. Cet angle d'incidence est à rapprocher de l'erreur de position du tracker par rapport à la position théorique optimale (du soleil). Cette caractéristique de puissance n'est fournie que sur un axe, ce qui conduit à faire l'hypothèse d'un comportement isotrope du module. Dans un second temps, une expérimentation, sur le démonstrateur HCPV pris comme référence dans cette étude, est envisagée afin d'identifier et de valider les modèles comportementaux sur les deux axes (azimut et élévation). Le dispositif expérimental et le plan d'expérience envisagés sont explicités dans la partie suivante.

Après identification des paramètres, les caractéristiques de puissance sont tracées, Figure 42 à Figure 44, en pourcentage de la puissance maximale du module HCPV, en fonction de l'erreur de position, pour les trois modèles comportementaux proposés dans cette étude. Une visualisation 3D des caractéristiques de la puissance, en fonction des erreurs de suivi sur les deux axes azimut et élévation ( $\varepsilon_A, \varepsilon_h$ ), est également proposée.

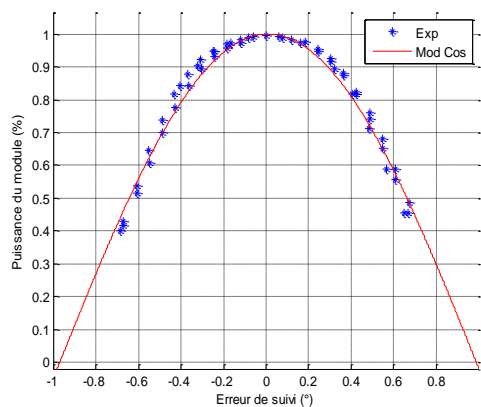


(a)

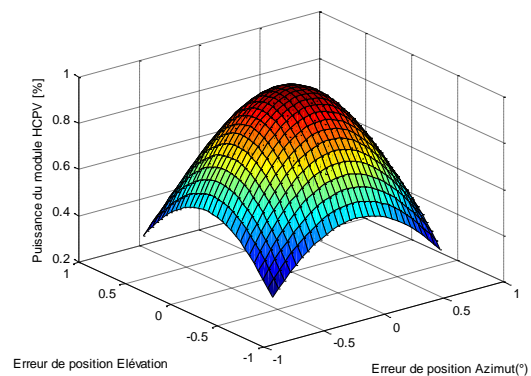


(b)

Figure 42- Modèle comportemental basé sur une fonction gaussienne d'un module HCPV : a) Puissance en fonction de l'erreur de suivi b) Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation



(a)



(b)

Figure 43- Modèle comportemental basé sur une fonction cosinus d'un module HCPV: a) Puissance en fonction de l'erreur de suivi b) Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation

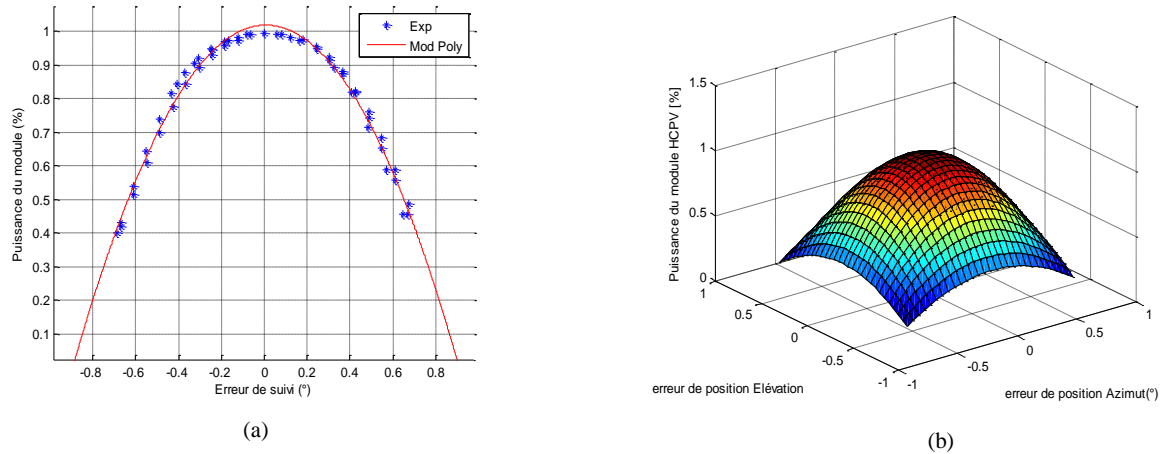


Figure 44- Modèle comportemental basé sur une fonction polynomiale d'un module HCPV: a) Puissance en fonction de l'erreur de suivi b) Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation

Le domaine de validité est défini à  $[-0.65^{\circ}, 0.65]$ , selon les points expérimentaux utilisés pour l'indentification des paramètres. Les Figure 42 à Figure 44 montrent que les trois modèles proposés correspondent bien à la forme de caractéristique de puissance souhaitée, à l'intérieur du domaine de validité. En effet, ils permettent d'avoir une puissance du module (en pourcentage) qui atteint son maximum quand l'erreur de position se rapproche de zéro et qui diminue au-delà de cette valeur avant de chuter rapidement au-delà d'une certaine erreur appelée angle d'acceptance du module. En dehors du domaine de validité les trois fonctions proposées n'ont pas le même comportement. La fonction gaussienne modélise une convergence lente de la puissance vers 0 (production nulle). Les deux autres fonctions proposent une descente plus rapide de la puissance vers 0, pour donner des valeurs négatives, comportement inadapté au comportement physique modélisé. Afin d'éviter ce comportement, l'erreur de position sera limitée à un intervalle défini lors de l'implémentation du modèle dans le simulateur du tracker HCPV.

La Figure 45 propose une comparaison des trois modèles présentés ci-dessus. Cette figure montre que ces modèles ne présentent pas les mêmes performances (précision de modélisation) et que leurs performances diffèrent en fonction de l'intervalle d'angle d'incidence. On constate que le modèle basé sur la fonction cosinus est plus performant pour des puissances proches du maximum, dans un intervalle d'erreur de  $[-0.3^{\circ}, 0.3^{\circ}]$ . Le modèle basé sur la fonction polynomiale est le plus performant en dehors de cette zone. Ces modèles constituent différentes approximations du fichier de points expérimental identifiées sur l'ensemble des points disponibles.

En se basant sur ces constatations, différentes combinaisons de deux modèles ont été testées, avec une identification par morceaux, sur deux groupes d'intervalles (*Annexe 6*). Les deux combinaisons qui ressortent de cette étude comparative sont celle d'un modèle cosinus, à l'intérieur de l'intervalle  $[-0.3^{\circ}, 0.3^{\circ}]$ , associé à un modèle polynomial en dehors de cette zone, et celle de deux modèles polynomiaux distincts, identifiés respectivement sur les mêmes intervalles que pour la première combinaison. Les caractéristiques de puissance en fonction de l'erreur de suivi de ces deux modèles combinés sont présentées en Figure 46 et mettent en

évidence une modélisation légèrement plus précise avec l'association de deux fonctions polynomiales.

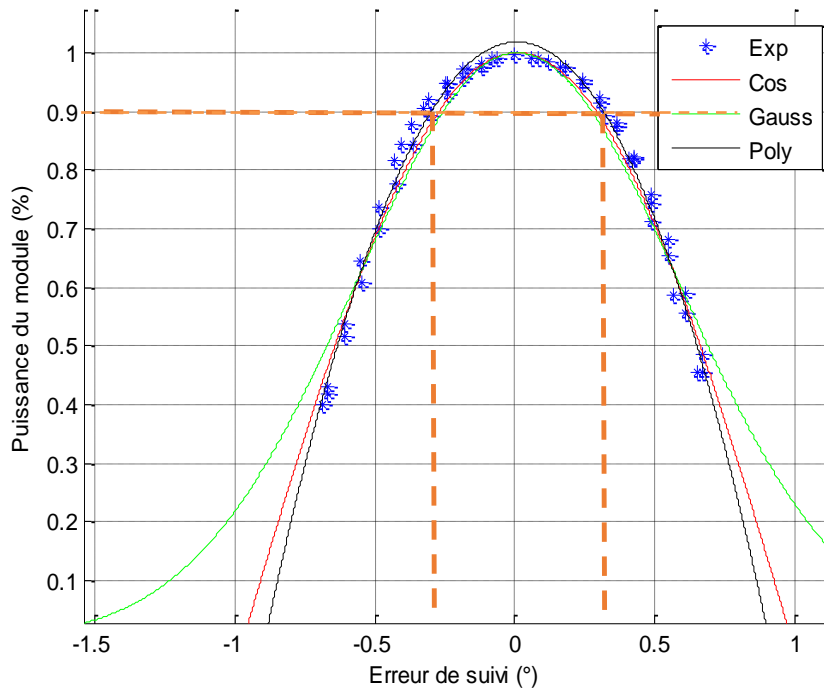


Figure 45- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles gaussien , cosinus et polynomial comparées avec les points expérimentaux

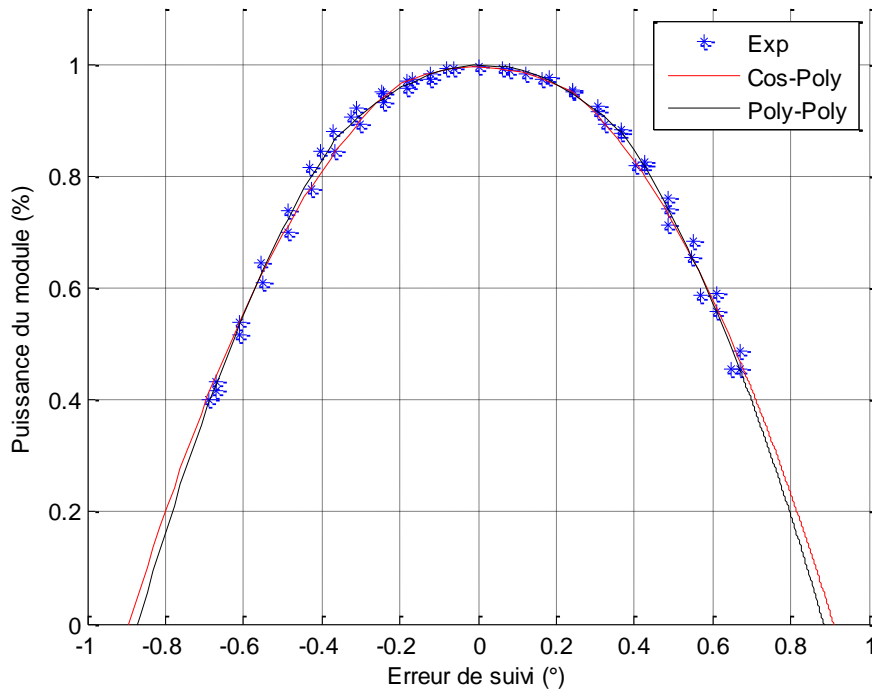


Figure 46- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles combinés cosinus-polynomial et polynomial-polynomial comparées avec les points expérimentaux



Afin de confirmer cette conclusion et de pouvoir mieux comparer ces modèles, un calcul des écarts de chaque modèle par rapport aux points expérimentaux s'avère intéressant. Le premier indicateur calculé est l'erreur quadratique moyenne (*MSE* pour Mean Square Error) :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \quad (31)$$

$y_i$ ,  $x_i$  et  $N$  sont respectivement la puissance simulée, la puissance mesurée expérimentalement et le nombre de points de mesure.

La racine carrée de MSE (RMSE) et l'écart maximal ont été calculé aussi. Le Tableau 4 présente un comparatif des écarts calculés pour chaque modèle proposé.

Tableau 4 MSE, RMSE et erreur MAX des modèles simulés

	Modèle Cos	Modèle Gauss	Modèle Polynomial	Modèle Cos-Cos	Modèle Gauss-Gauss	Modèle Poly-Poly	Modèle Cos-Poly
MSE	0.0008	0.0017	0.0008	0.0016	0.0008	0.0002	0.0004
RMSE	0.0287	0.0413	0.0206	0.0276	0.0397	0.0158	0.0189
MAX	0.0642	0.0878	0.0489	0.0631	0.0868	0.0377	0.0489

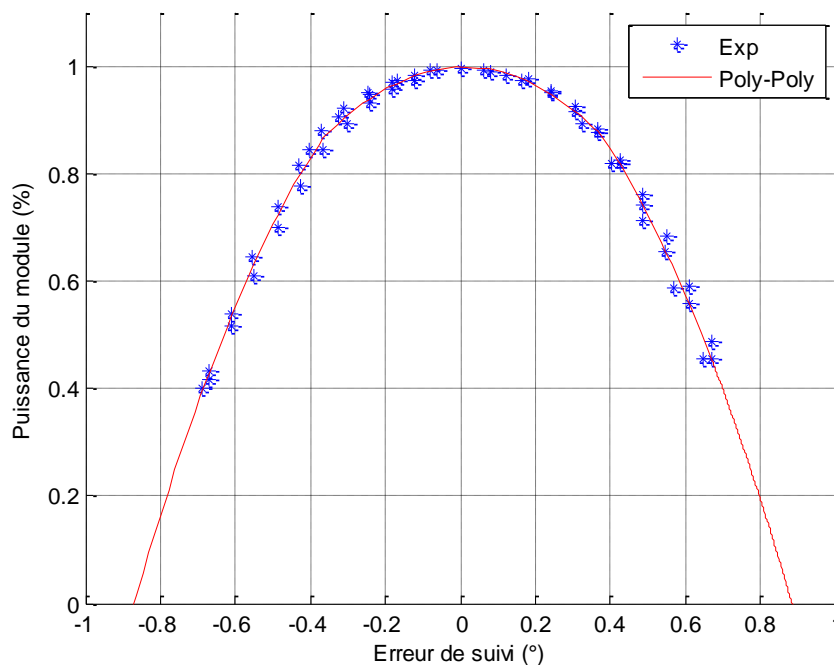


Figure 47- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné polynomial-polynomial comparées avec les points expérimentaux

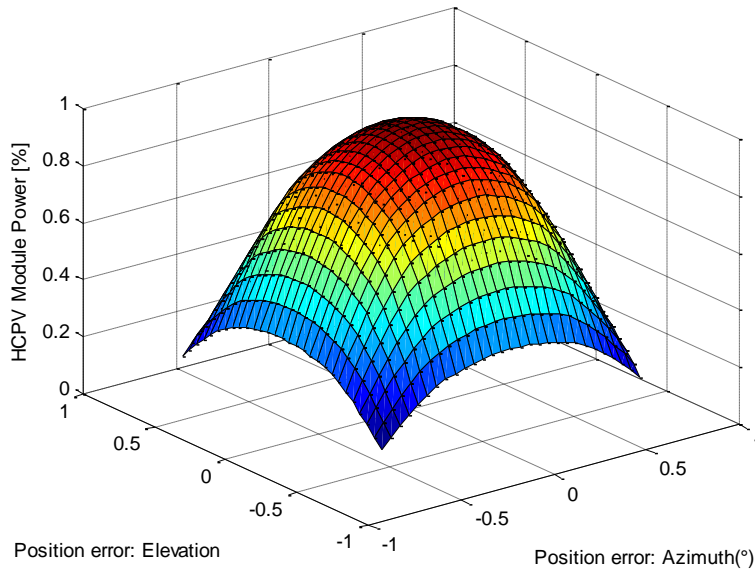


Figure 48- Puissance en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation : Modèle combiné polynomial-polynomial

Cette étude comparative montre que le modèle combiné de deux fonctions polynomiales possède les écarts MSE et RMSE et l'erreur maximale les plus faibles parmi tous les modèles. Les Figure 47 et Figure 48 présentent la caractéristique de la puissance calculée par ce modèle en fonction de l'erreur de suivi sur un axe puis, en 3D sur les deux axes.

### II.3.3. Moyens expérimentaux et plans d'expériences

Les paramètres des modèles proposés dans la partie précédente ont été identifiés sur la base de données du constructeur du module HCPV, en faisant l'hypothèse d'un comportement isotrope. L'objectif de l'expérimentation est d'identifier et de valider ces modèles au travers de mesures prises sur un prototype de tracker HCPV à deux axes. Des relevés de production d'un module HCPV en fonction de l'erreur de position du tracker sur l'axe d'azimut et sur l'axe d'élévation s'avèrent nécessaires pour cette identification. Ces relevés doivent être pris pour un ensoleillement direct, un ensoleillement global et une température les plus constants possible.

Ces expérimentations visent à contrôler les erreurs de positions ( $\varepsilon_A, \varepsilon_h$ ), du tracker, pour des fins d'identification de la caractéristique de puissance en fonction de l'erreur de suivi. Cet objectif, nous mène donc à la recherche d'une trajectoire (un plan d'expérience) permettant de désaligner volontairement le tracker pour maximiser le nombre de points relevés dans le plan ( $\varepsilon_A, \varepsilon_h$ ). La trajectoire recherchée doit prendre en considération la minimisation des modifications à apporter dans l'algorithme de commande du tracker pour cette expérimentation.

Un dispositif expérimental a été retenu (Figure 49) afin de satisfaire l'objectif de récupération des données expérimentales et de pouvoir les traiter et les exploiter pour identifier et valider les modèles comportementaux. Cette solution est basée sur l'utilisation

d'une carte d'acquisition Dspace 1104 (*Annexe 7*). Cette carte possède 5 entrées analogiques permettant d'acquérir les données analogiques telles que le courant et la tension continue du module HCPV. Cette carte permet aussi de communiquer avec la carte de commande du tracker, via une interface série RS232, afin de récupérer les données d'erreur de position mesurées par le viseur solaire et la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre, ainsi que l'ensoleillement global et la température.

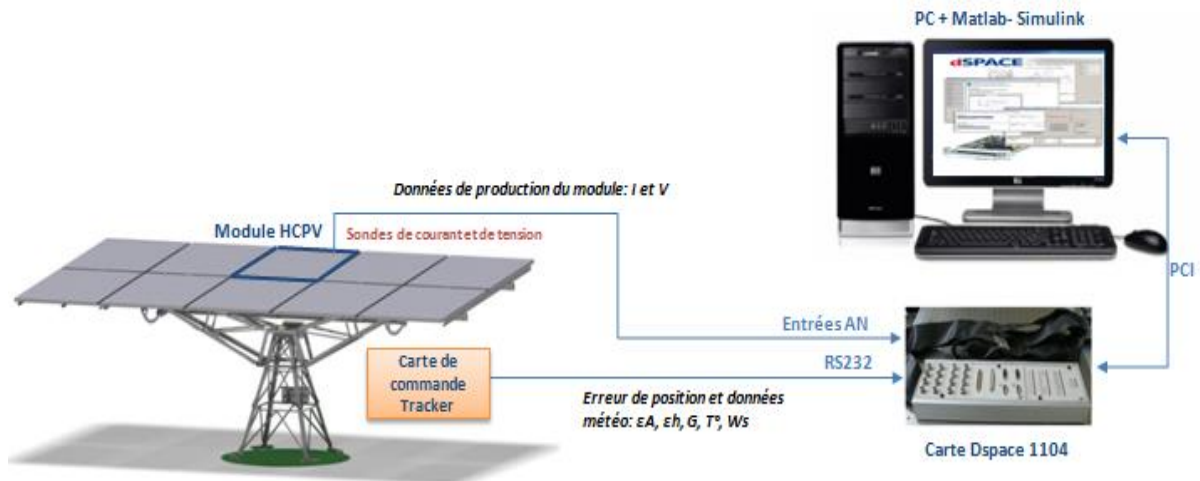


Figure 49- Architecture de la plateforme d'expérimentation

Sur un tracker équipé de plusieurs modules, le module HCPV choisi pour ces essais doit être le plus proche possible du viseur solaire pour minimiser l'incertitude sur  $\varepsilon_A$  et  $\varepsilon_h$ . Ce module doit être connecté à un onduleur comportant un algorithme MPPT (maximum power point tracking) en fonctionnement, de manière à obtenir un relevé de puissance maximale en fonction des erreurs de positions  $\varepsilon_A$  et  $\varepsilon_h$ . Le temps de réponse de cet algorithme MPPT doit être suffisamment faible devant les constantes de temps associées aux mouvements du tracker sur les axes d'azimut et d'élévation.

### II.3.3.1. Plan d'expériences

Dans ce chapitre, des scénarios d'expérimentation sont proposés et définis, ainsi qu'une étude comparative afin de pouvoir choisir le scénario susceptible de fournir le maximum de points de mesures (relevé d'erreur de position du tracker correspondant à un désalignement contrôlé volontairement) tout en restant acceptable en termes de complexité de l'algorithme. Cette complexité est évaluée par la quantité de modifications à apporter à l'algorithme de commande du tracker et par la surcharge de calculs pour le microcontrôleur de la carte de contrôle. Initialement, cette carte de commande assure les fonctions de contrôle de position (asservissements) des deux axes, de calcul de la position théorique du soleil (calcul astronomique) ainsi que de communication avec le viseur solaire et d'autres capteurs (acquisition de données). Dans le cadre de cette expérimentation, d'autres fonctions seront ajoutées à cette carte, telles que le calcul de trajectoires spécifiques au plan d'expériences et la gestion de la transmission des données évoquées précédemment sur une liaison série, à destination de la carte d'acquisition (dSPACE).

Il est nécessaire de définir une trajectoire du tracker variant légèrement autour de la trajectoire du soleil (trajectoire théorique déterminée par calcul astronomique). Celle-ci permettra de faire varier l'erreur de position dans un ou plusieurs intervalles donnés. Le plus important des intervalles est celui de l'angle d'acceptance du module HCPV permettant d'avoir plus que 90% de production. L'objectif est de tracer, par la suite, les nuages de points de la puissance maximale produite en fonction de l'erreur de position en azimut et en élévation.

La Figure 50 montre l'évolution de l'ensoleillement global et la trajectoire du soleil en azimut et en élévation pendant une journée. Ces données d'ensoleillement ont été fournies par la base de données européenne de PVGIS alors que les données de trajectoire du soleil (Azimut et élévation) sont fournies par la base de données de l'observatoire naval des États-Unis. Ces données sont prises pour la même date et pour les mêmes coordonnées GPS. Ces données seront utilisées pour simuler les trajectoires proposées pour chaque plan d'expérience.

De manière à avoir un ensoleillement global et une température les plus constants possible, une durée de 1 heure entre 12h et 13h a été fixée pour les essais. Cette durée, correspond à 3500 points de mesures relevés avec un échantillonnage de 1s. Afin de minimiser les pertes de production provoquées par ces essais, leur durée ne doit pas dépasser un jour.

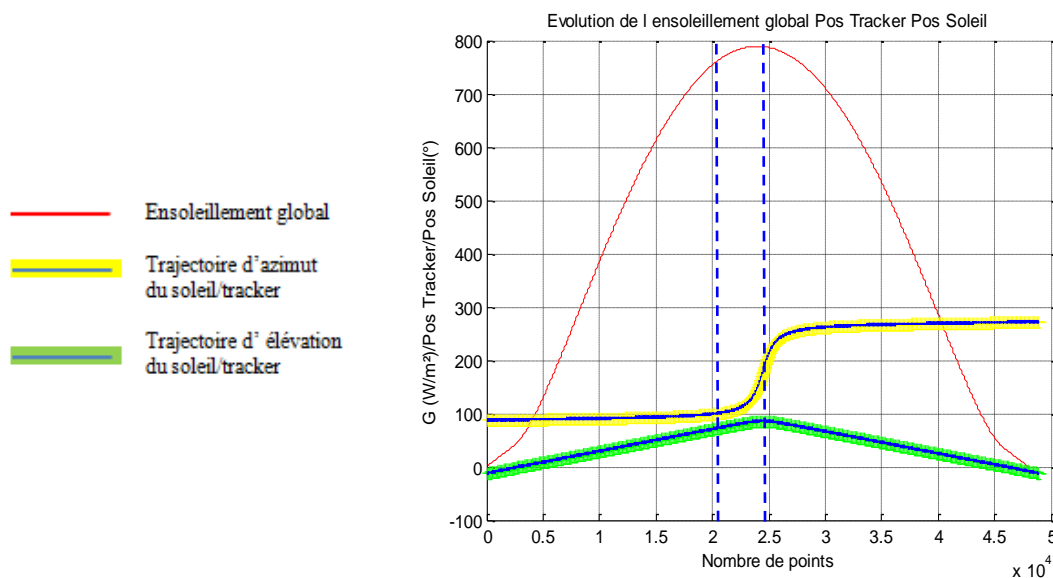


Figure 50- Evolution de l'ensoleillement global, de la position du tracker et de la position du soleil sur une journée

### II.3.3.2. Etude comparative de trajectoires pour l'identification

Deux plans d'expériences sont proposés et simulés. Pour chacun, les trajectoires et nuages de points obtenus sont donnés et analysés. Les deux solutions sont ensuite évaluées sur différents critères afin de sélectionner le plan d'expérience permettant le meilleur compromis entre densité du relevé, complexité des modifications de l'algorithme de la carte de contrôle du tracker, et sollicitation des actionneurs.

*a. Trajectoire 1*

La première trajectoire proposée est la plus simple au regard des objectifs de l'expérimentation. En effet, cette trajectoire consiste à faire varier les erreurs d'azimut et d'élévation simultanément dans un intervalle plus large que l'angle d'acceptance du module HCPV, ici entre  $-2^\circ$  et  $2^\circ$ . Les courbes de la Figure 51 montrent la variation de la position du tracker autour de la position du soleil qui implique une variation régulière de l'erreur de position et un nombre important de points enregistrés (Figure 52 et Figure 53). Néanmoins l'inconvénient majeur de la solution est qu'elle sollicite énormément les moteurs par rapport au mode de fonctionnement normal (expliqué dans le chapitre suivant) du tracker. Une étude thermique complémentaire serait nécessaire pour déterminer la durée maximale d'un tel essai admissible par les machines asynchrones (dimensionnées pour un fonctionnement discontinu). De plus cette solution nécessite de modifier de manière conséquente l'algorithme de génération de trajectoire ou de remplacer les correcteurs par des correcteurs à mode glissant associés aux trajectoires d'azimut et d'élévation issues du calcul astronomique.

*b. Trajectoire 2*

Le deuxième scénario proposé est le plus proche possible de l'algorithme de contrôle du tracker en fonctionnement normal. En effet, ce fonctionnement normal consiste à laisser le soleil prendre de l'avance sur la position du tracker jusqu'à atteindre un seuil d'erreur de position, ci-après appelé "retard", puis le tracker rattrape ce retard et prend de l'avance sur le soleil. La valeur de position d'avance est appelée, ci-après "anticipation".

Cette deuxième trajectoire, consiste donc à garder la même stratégie en modifiant simplement les valeurs de retard et d'anticipation (Figure 54). Ces valeurs sont fixées à  $2^\circ$ , ce qui donne une variation de l'erreur de position entre  $-2^\circ$  et  $2^\circ$  pour les deux axes. Comme les trajectoires azimut et élévation du soleil sont différentes avec des vitesses différentes, cela implique des mouvements non synchronisés des deux axes et devrait permettre une répartition correcte des relevés dans le plan  $(\varepsilon_A, \varepsilon_h)$ .

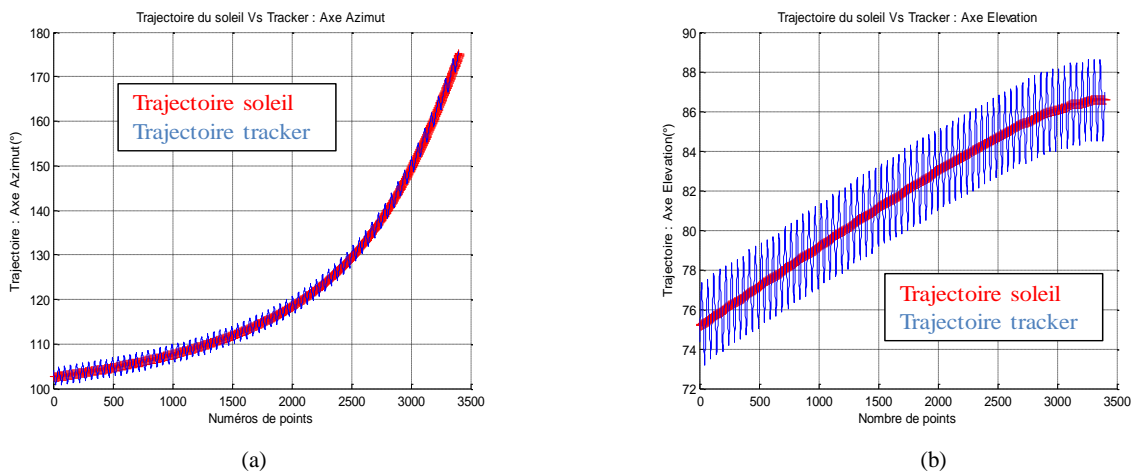


Figure 51- Trajectoire 1 du soleil et du tracker : (a) Azimut (b) Elévation

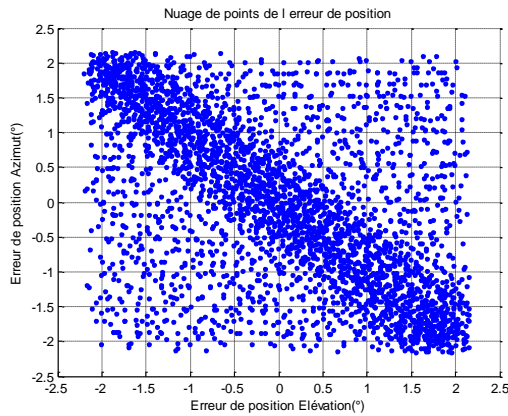


Figure 52- Nuage de point du plan d'expérience 1 dans le plan des erreurs de position

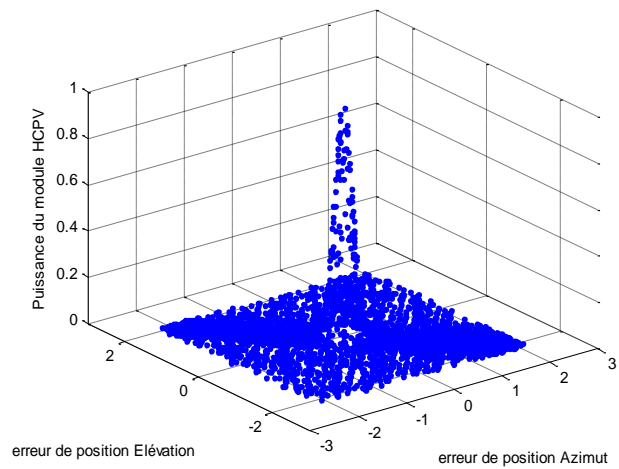
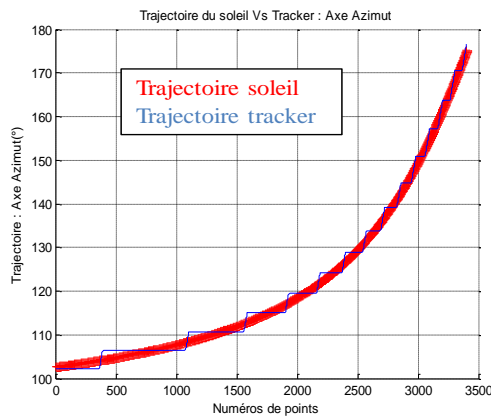
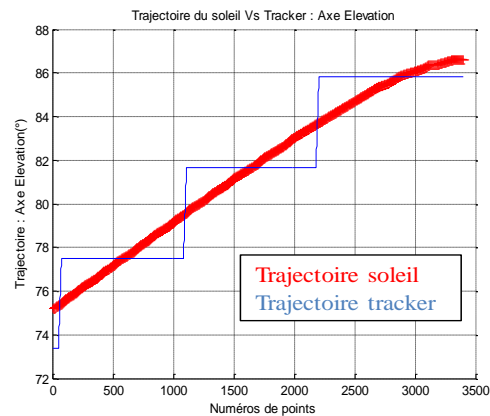


Figure 53- Caractéristique de puissance (%) du module HCPV reconstruite avec le modèle polynomial pour le plan d'expérience 1

Cette trajectoire assure donc un fonctionnement proche du fonctionnement normal, avec des mouvements discontinus, par palier. Ces mouvements sont de plus grande amplitude mais moins fréquents, ce qui permet d'éviter les problèmes thermiques par rapport au dimensionnement des moteurs. Néanmoins elle propose moins de points de mesure de la puissance en fonction des erreurs  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_h$ , surtout autour de  $0^\circ$  (Figure 55 et Figure 56), dans un intervalle correspondant à l'angle d'acceptance.



(a)



(b)

Figure 54- Trajectoire 2 du soleil et du tracker : (a) Azimut (b) Elévation

Pour pallier cet inconvénient, un plan d'expérimentation complémentaire est à prévoir, avec un intervalle de variation des erreurs  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_h$  plus faible, entre  $-0.5^\circ$  et  $0.5^\circ$ , de manière à augmenter la fréquence des mouvements et donc densifier le nuage de points relevés sur cet intervalle (Figure 58 et Figure 59). Ce plan d'expérimentation nécessite seulement une modification des valeurs de retard et d'anticipation.

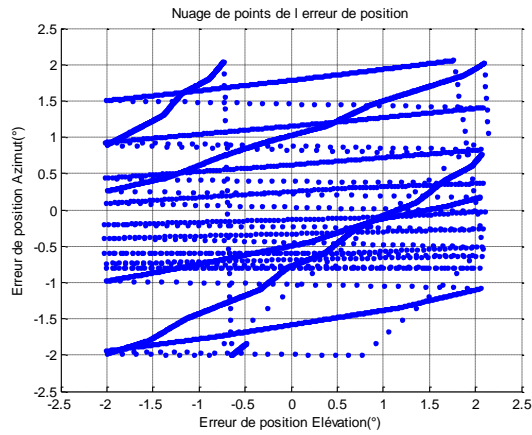


Figure 55- Nuage de point du plan d'expérience 2 dans le plan des erreurs de position

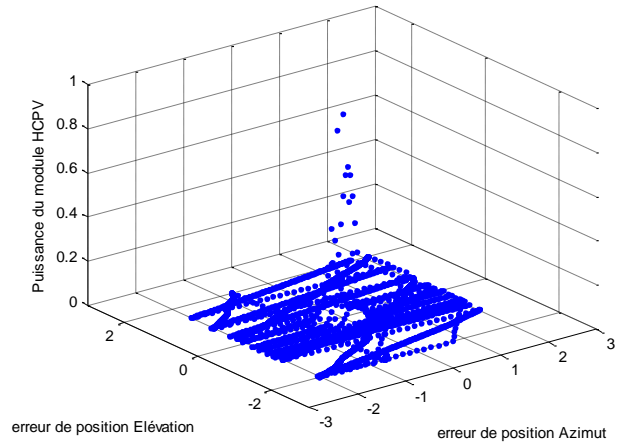
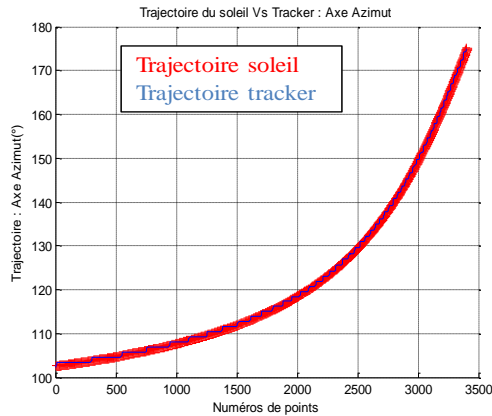
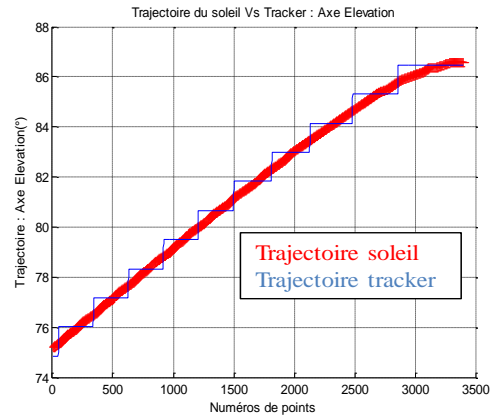


Figure 56- Caractéristique de puissance (%) du module HCPV reconstruite avec le modèle polynomial pour le plan d'expérience 2



(a)



(b)

Figure 57- Trajectoire 3 du soleil et du tracker : (a) Azimut (b) Elévation

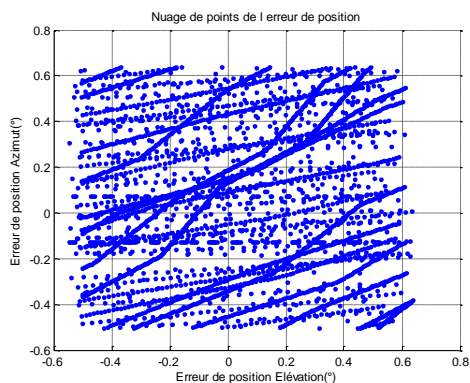


Figure 58- Nuage de point du plan d'expérience 3 dans le plan des erreurs de position

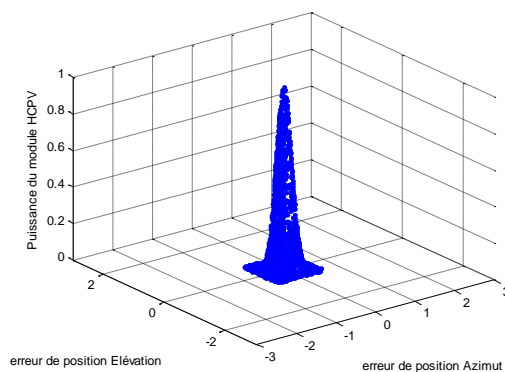
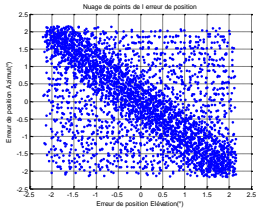
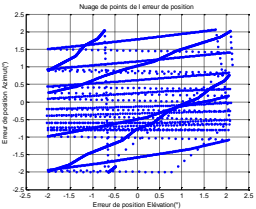
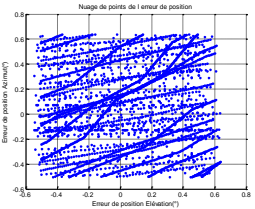
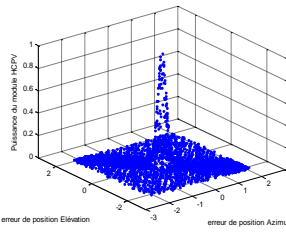
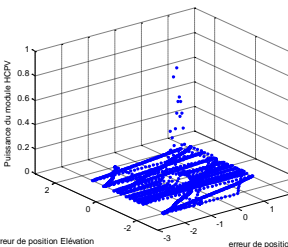
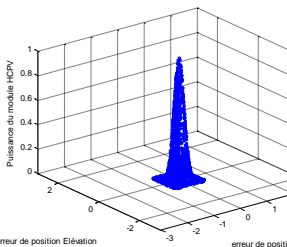


Figure 59- Caractéristique de puissance (%) du module HCPV reconstruite avec le modèle polynomial pour le plan d'expérience 3

Le Tableau 5 résume l'apport ainsi que les moyens nécessaires. En termes de résultats présentés par les nuages de points et par la construction de la caractéristique de puissance, le premier plan d'expérience s'avère le plus intéressant car il présente le maximum de points de mesures pour une même durée. Par contre, en ce qui concerne la sollicitation des moteurs et la complexité et l'importance des modifications à apporter sur l'algorithme de commande du tracker HCPV, éventuellement associées à des ressources (mémoire et temps de calcul), le deuxième plan d'expérience est le plus performant car il nécessite le moins de modifications. En effet, ce scénario basé sur la stratégie de commande actuelle du tracker nécessite uniquement une modification des valeurs de retard et d'anticipation. Afin de trouver un compromis entre résultats de test et moyens requis, le choix s'est porté sur le deuxième plan d'expérience garantissant le minimum de modifications sur l'algorithme. De plus, avec cette solution, il sera possible d'augmenter si nécessaire le nombre de points de mesure, en effectuant plusieurs essais avec différentes valeurs de retard et d'anticipation (0.1°, 0.5°, ...).

Tableau 5 Comparatif des deux plans d'expériences

	Trajectoire 1	Trajectoire 2	Trajectoire 3
Nuages de points de l'erreur de position			
Pourcentage de puissance par rapport à l'erreur de position azimut et élévation			
Modification de l'algorithme de commande	Maximale : varier l'erreur de position sur les 2 axes	Minimale : Action uniquement sur le pas de discrétisation des positions	Minimale : Action uniquement sur le pas de discrétisation des positions

### II.3.3.3. Premiers résultats d'expérimentation

Une expérimentation basée sur le dispositif et le plan d'expérience proposés ci-dessus a été envisagée, afin d'identifier les paramètres du modèle de module HCPV retenu sur les deux axes du tracker, sans avoir recours à l'hypothèse d'isotropie. Elle permettrait aussi la validation de certaines hypothèses par l'étude de phénomènes tels que l'influence de la variation de l'ensoleillement global et direct ainsi que la température sur la forme de la caractéristique de puissance des modules HCPV. Bien que les travaux de mise en place du dispositif expérimental, d'un point de vue matériel et logiciel (communication entre la carte de commande du tracker et la carte d'acquisition (dSPACE 1104), programme d'acquisition et



de traitement des données reçues), aient été menés à bien, cette expérimentation a été reportée à une date ultérieure en raison de problèmes techniques survenus sur le prototype de tracker HCPV (*annexe 1*).

En attendant la réalisation de l'expérimentation telle que décrite dans la partie précédente, nous proposons ici une exploitation de résultats obtenus lors d'une expérimentation partielle, réalisée pour un objectif différent de ceux visés dans ces travaux. En effet, cette expérimentation visait à vérifier la qualité du réglage de l'orientation de chacun des modules HCPV montés sur le même prototype de tracker, par rapport la direction de référence donnée par le réglage du viseur solaire. Le dispositif expérimental mis en place pour atteindre cet objectif est différent de celui prévu pour nos essais. La première différence est que ces essais ne nécessitent pas un grand nombre de point de mesure. En outre, ces essais ne visent pas une large variation des erreurs de position.

En dépit de ces points de différence, les essais consistent à mesurer la puissance maximale de chaque module en fonction de l'erreur de position en azimut  $\varepsilon_A$  puis en élévation  $\varepsilon_h$  ce qui est proche de ce que nous souhaitons obtenir comme relevés. Les prises de mesures ont été effectuées séparément sur chacun des deux axes du tracker, ce qui explique la présence de deux caractéristiques expérimentales de puissance en fonction de l'erreur  $\varepsilon_A$  puis  $\varepsilon_h$ , pour chaque module.

Les essais dont les résultats sont exploités dans ce travail sont ceux d'un module présentant un décalage sur les deux axes par rapport au viseur solaire (utilisé pour mesurer l'erreur de d'alignement du tracker par rapport à la position réelle du soleil). Ce décalage vient donc justifier que les caractéristiques de puissance (en pourcentage) en fonction de l'erreur de suivi de chacun des deux axes ne sont pas centrées en 0 (Figure 60 et Figure 61). L'équation (29), par ses paramètres  $x_0$  et  $y_0$ , permet de prendre en compte ce décalage.

La première exploitation de ces résultats consiste donc à identifier les paramètres, du modèle polynomiale, sur la base des deux relevés expérimentaux (azimut et élévation). La comparaison des paramètres issues des deux identifications, a donné des valeurs proches ce qui peut confirmer l'hypothèse d'isotropie. Cette éventuelle confirmation de l'hypothèse d'isotropie constitue donc le premier résultat de l'expérimentation. La deuxième constatation est que les paramètres du modèle combiné de deux fonctions polynomiales identifié à partir de cette expérimentation sont proches de ceux identifiés sur la base des données constructeurs du module HCPV. L'erreur peut être justifiée par le manque de précision des mesures effectuées dans cette expérimentation, en lien avec l'objectif différent de celui des présents travaux.

La caractéristique de la puissance en fonction de l'erreur de position en azimut  $\varepsilon_A$  et en élévation  $\varepsilon_h$  (caractéristique 3D) du modèle identifié (Figure 62) a été comparée à celle construite à partir des points expérimentaux (Figure 63) en azimut et en élévation, permettant ainsi de montrer la précision du modèle proposé.

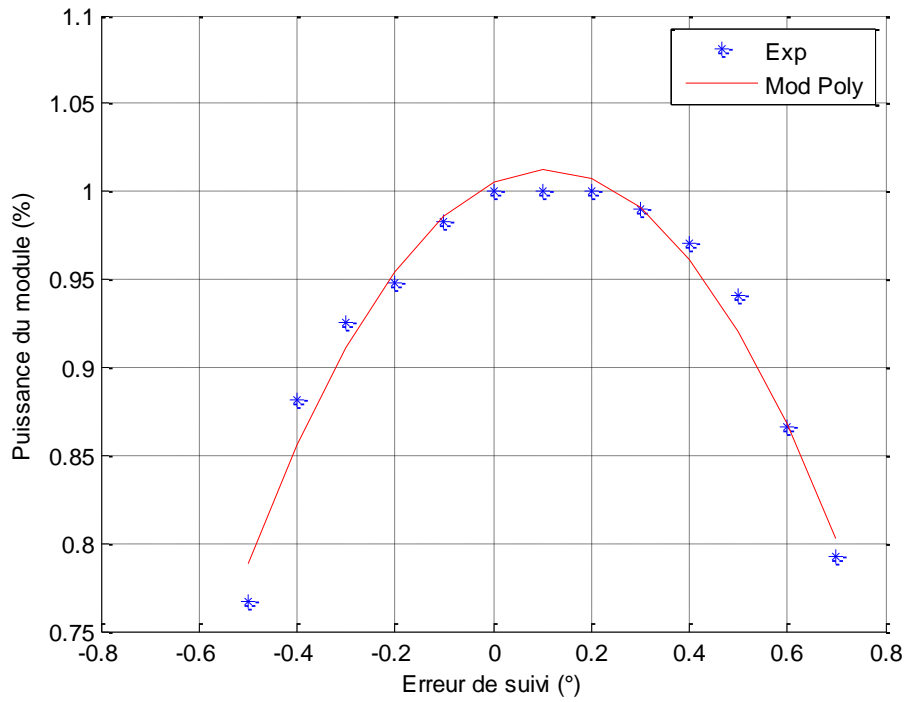


Figure 60- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi en azimut pour le modèle combiné polynomial-polynomial comparées avec les mesures expérimentales prise sur le prototype tracker HCPV à deux axes

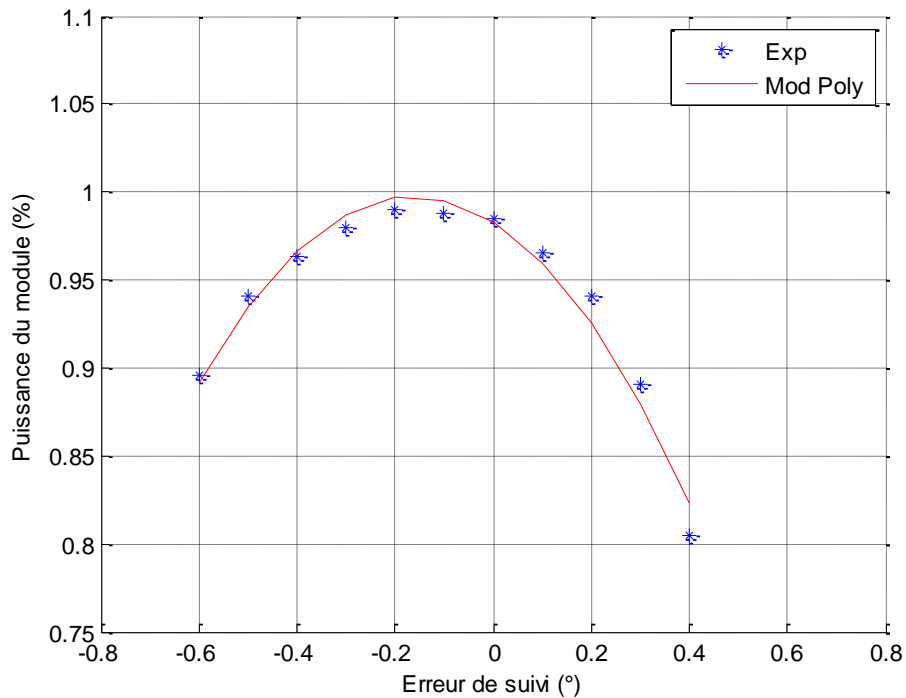


Figure 61- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi en élévation pour le modèle combiné polynomial-polynomial comparées avec les mesures expérimentales prise sur le prototype tracker HCPV à deux axes

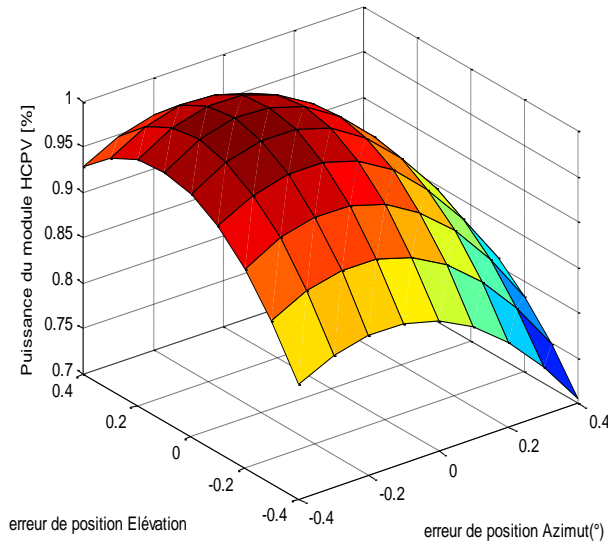


Figure 62- Puissance (%) en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation : Modèle combiné polynomial-polynomial

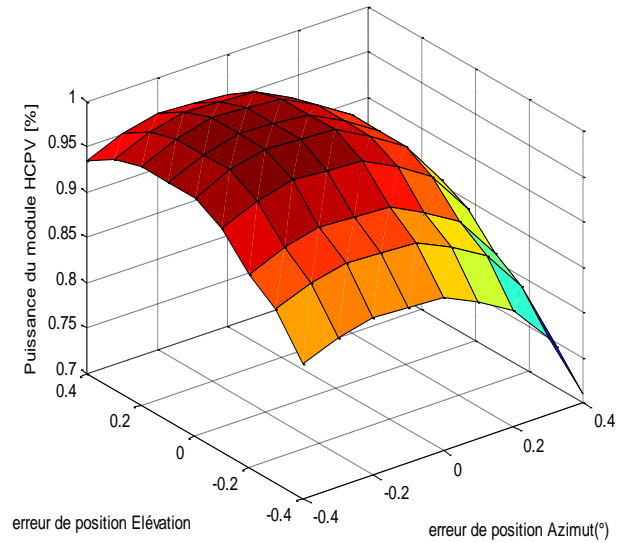


Figure 63- Caractéristique de la puissance (%) en fonction des erreurs d'azimut et d'élévation, construite à partir des points expérimentaux

## II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, un simulateur de tracker HCPV a été proposé avec ses différents sous-modèles. Ainsi, un modèle de soleil, permettant de générer la trajectoire théorique du tracker et les paramètres atmosphériques, a été présenté. Un modèle dynamique du bloc moto-variateur couplé à un modèle rigide de la structure mécanique des axes du tracker a été proposé et permet de déterminer les positions d'azimut et d'élévation des modules. Les choix de modélisation, de commande et d'hypothèses simplificatrices sont justifiés par la nécessité de se rapprocher le plus possible du système adopté pour le prototype tracker HCPV pris comme référence dans ces travaux de thèse, même si des améliorations de la structure de commande des actionneurs pourraient être facilement proposées (contrôle vectoriel) et constitueraient une meilleure base pour l'étude des stratégies de génération de la trajectoire du tracker.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la modélisation des modules HCPV montés sur le tracker. Des modèles comportementaux basés sur des fonctions mathématiques (Cosinus, gaussienne et polynomiale), et d'autres basés sur des combinaisons de ces fonctions, ont été proposés. Leurs paramètres respectifs ont été identifiés au travers de données constructeurs et en faisant l'hypothèse d'un comportement isotrope des modules. Les modèles comportementaux ont été par la suite évalués et comparés : le modèle basé sur une combinaison de deux fonctions polynomiales a présenté les meilleures performances. Dans un second temps, une identification des paramètres par une expérimentation réalisée sur les deux axes du tracker a été envisagée, notamment pour valider l'hypothèse d'isotropie. Cette expérimentation devrait également permettre de vérifier l'influence de l'ensoleillement direct et de la température sur la forme de la caractéristique de puissance en fonction des erreurs de position  $\varepsilon_A$  et  $\varepsilon_h$ . Le dispositif expérimental et les plans d'expériences nécessaires ont été

proposés, mais la réalisation de ces essais a finalement été ralentie par des problèmes techniques survenus sur le prototype de tracker HCPV. Dans l'attente de réaliser l'expérimentation telle que définie dans ce chapitre, nous avons pu exploiter les résultats d'une expérimentation similaire. Un premier résultat important de cette première expérimentation concerne la confirmation de l'hypothèse d'isotropie du module HCPV.

Le modèle ainsi développé et identifié pour le simulateur de tracker HCPV permet de prédire la puissance maximale en fonction de l'erreur de suivi. Les détails d'implémentation sont exposés en annexe 4. Ce simulateur permet de tester et de comparer les différentes stratégies de génération de trajectoire du tracker dont le développement est l'objet du chapitre suivant.



---

## Chapitre III

# Commande et stratégie de génération de trajectoire d'un tracker HCPV

---

L'objectif étant d'améliorer la stratégie de commande et de génération de la trajectoire d'un tracker HCPV en termes de maximisation de l'ensoleillement et de réduction des coûts, ce chapitre sera consacré à la proposition, la validation sur le simulateur développé et présenté dans le chapitre précédent et la comparaison de stratégies de commandes.

La première partie de ce chapitre sera consacrée à une présentation de la stratégie de commande dite de référence, commande hybride basée sur l'utilisation d'un viseur solaire et exploitant un calcul astronomique pour générer la trajectoire du tracker. Les performances de cette stratégie sont ensuite testées sur le simulateur de tracker HCPV.

Afin d'améliorer les performances de la commande du tracker et de réduire son coût, une nouvelle approche de stratégie de commande est proposée, permettant notamment de remplacer le viseur solaire par les cellules du module HCPV utilisées comme capteur solaire. Celle-ci s'inspire d'une méthode d'optimisation du gradient pour la génération de trajectoire du tracker visant à maximiser la puissance. Le principe de cette commande et la description de l'algorithme, la simulation de ses performances, son intérêt et ses limites seront présentées dans la deuxième partie de ce chapitre.

En évitant l'utilisation d'un capteur supplémentaire la stratégie permet de réduire le coût de mis en place, de réglage et de maintenance de la commande. Selon le rapport du Fraunhofer ISE en 2015 (Philipps.S.P, 2015), les prix de construction des centrales CPV installées pour des projets de 10MW sont entre 1400€/KW et 2200 €/kW. Les coûts des viseurs solaires étant estimés pour une centrale de 10MW à 10 €/kW, le gain de l'adoption de cette nouvelle stratégie est estimé à 0.7% pour l'achat des viseurs, sans compter leur coût de réglage et d'entretien.

Certes, cette stratégie est intéressante dans un contexte multi-modules, tel que le démonstrateur tracker HCPV pris comme référence dans ces travaux, cependant la solution paraît plus rentable dans un contexte de tracker miniaturisé, pour un ou deux modules. En effet, comme la stratégie de commande de référence exige l'utilisation d'un viseur par tracker, l'élimination du viseur dans ce contexte de « mini tracker » sera d'autant plus intéressante, à

puissance installée donnée, pour réduire les coûts d'achat, de réglage et d'entretien. De plus, la notion de tracker de petites dimensions conduit à considérer des installations également moins onéreuses que pour un tracker de grande taille, en raison de fondations moins coûteuses (installation et démantèlement) car destinées à supporter une structure mécanique plus légère, elle aussi moins coûteuse, cette dernière impliquant le recours à une motorisation moins puissante et donc meilleur marché.

### III.1. Stratégie de commande de référence du tracker HCPV

Cette première stratégie (Figure 64) repose sur une commande hybride exploitant, comme exposé avec §I.4.3, un calcul astronomique pour poursuivre la trajectoire du soleil, ainsi qu'un viseur solaire pour corriger l'erreur de poursuite quand elle dépasse un certain seuil. Le calcul astronomique dépend de la date, l'heure et des données géographiques (latitude et longitude de la zone) du site. La Figure 65 présente la trajectoire théorique du soleil et la trajectoire du tracker. Ce dernier laisse le soleil prendre de l'avance jusqu'à un certain seuil d'erreur «  $s_e$  » puis il rattrape le soleil et prend ensuite une avance «  $\Delta A$  ». Le seuil de l'erreur  $s_e$  et la valeur d'anticipation  $\Delta A$  sont réglés en fonction de la précision du suivi souhaitée et des caractéristiques de l'actionneur utilisé. Ainsi, cette commande permet de préserver les actionneurs en garantissant un temps de repos et en évitant la fatigue inutile d'un suivi en continu.

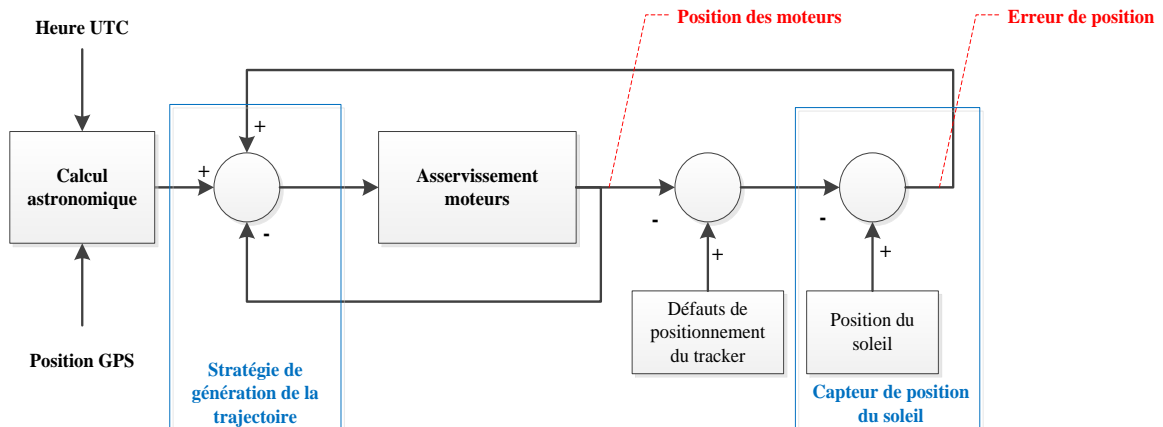


Figure 64- Stratégie de commande de référence du tracker CPV

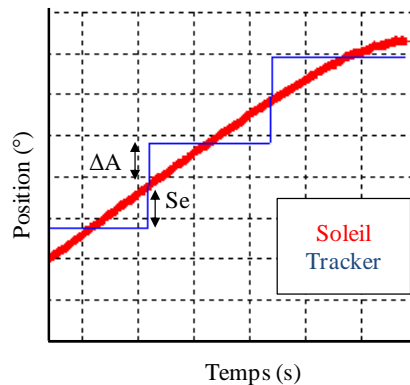


Figure 65- Trajectoire du tracker CPV générée par la stratégie de commande de référence

L'organigramme de la Figure 66, décrit l'algorithme adopté pour cette stratégie de commande de référence. Elle commence par un calcul astronomique de la position du soleil à viser par le tracker ( $A_s$  et  $h_s$ ) après une transformation des coordonnées dans le repère horizontal. La position calculée doit être adaptée au champ d'accessibilité des angles d'azimute et d'élévation définie par le constructeur du tracker selon la structure et l'emplacement de ce dernier. Cette opération est appelée aussi, dans le langage de spécialistes des trackers, écrêtage de la position désirée. S'ensuit le calcul de l'erreur théorique instantanée entre de la position du tracker ( $A_r$  et  $h_r$ ) et la position de référence issue du calcul ( $A_s$  et  $h_s$ ).

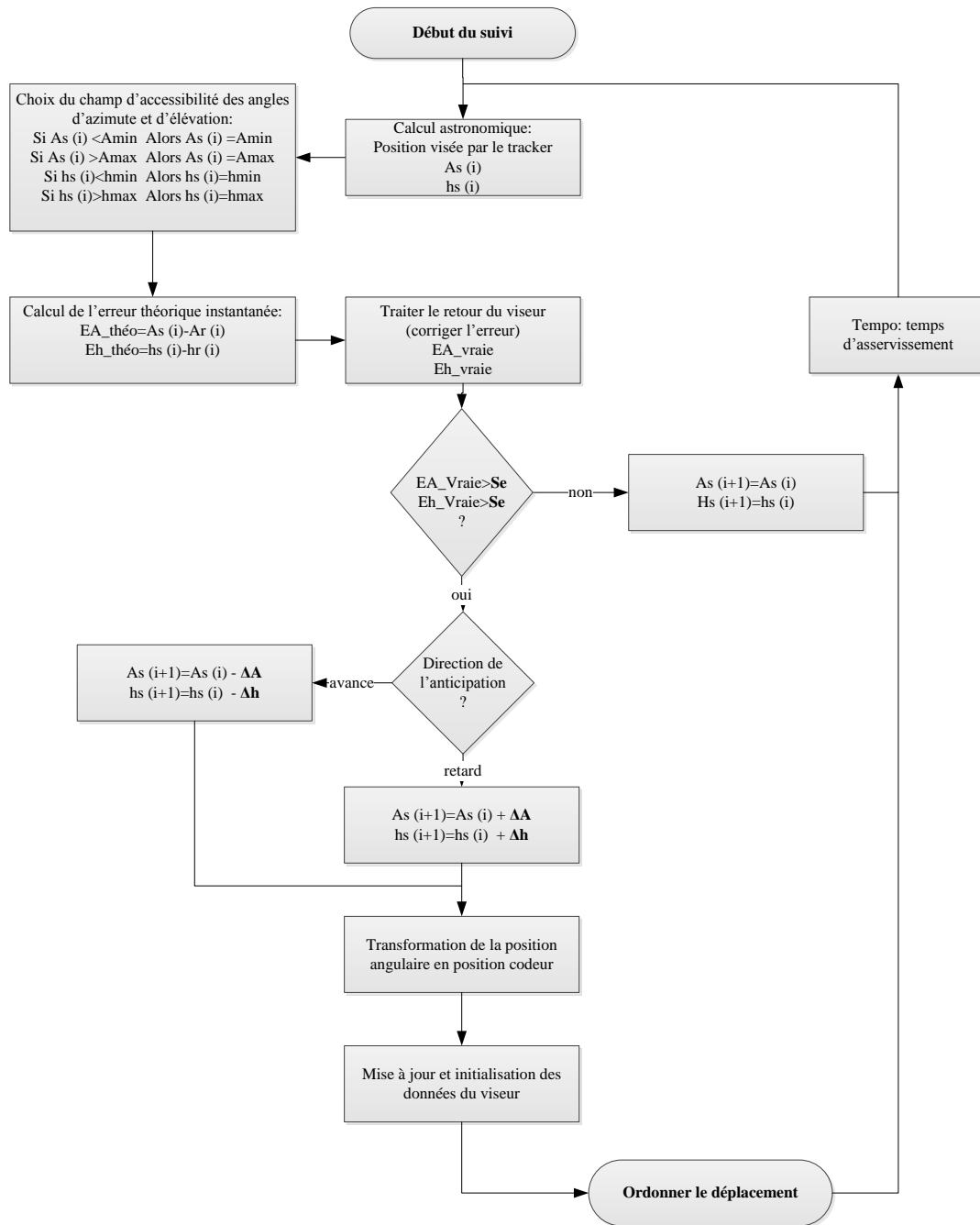


Figure 66- Algorithme de la commande hybride de référence du tracker CPV



Cette erreur est corrigée par le retour du viseur solaire ( $EA_{vraie}$  et  $Eh_{vraie}$ ). Celle-ci est ensuite comparée au seuil d'erreur  $S_e$  afin de déterminer la consigne de position appliquée aux asservissements des actionneurs. Plus précisément, si l'erreur "vraie" est supérieure au seuil fixé, la consigne de la valeur d'anticipation  $\Delta A$  est appliquée selon la direction d'anticipation. Dans le cas contraire, aucun déplacement ne sera sollicité. La dernière étape consiste à réinitialiser et mettre à jour les données du retour du viseur.

Cette commande a été implémentée sur le simulateur de tracker comme première stratégie de commande (Annexe 5) afin d'évaluer ses performances en simulation. Les résultats obtenus par une simulation de 5 minutes (à partir de 12h00) sont représentés Figure 67. On peut constater que le tracker suit la trajectoire théorique calculée avec une erreur ne dépassant pas la valeur fixée par le seuil  $S_e$  (Figure 67-c) appliqué aux deux axes du tracker azimut et élévation. Ce seuil d'erreur est défini en amont par la précision du suivi de trajectoire souhaitée, qui dépend aussi de l'angle d'acceptance des modules (il est défini à  $0.05^\circ$  dans notre cas). La Figure 67 -d montre l'évolution de la puissance produite parallèlement par le module HCPV (le module monté sur le tracker) toujours pour cette même séquence de poursuite.

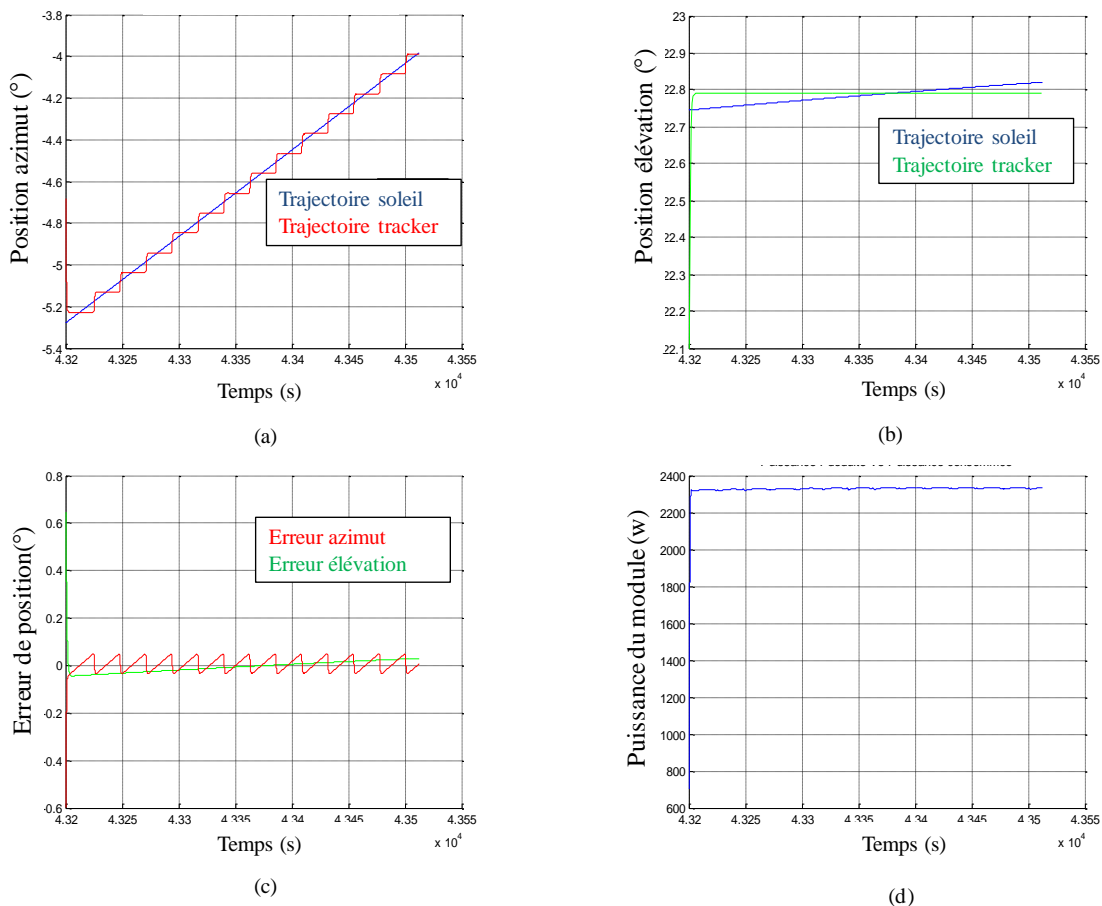


Figure 67- Résultats de simulation de la stratégie de commande de référence : Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

Cette simulation a permis donc de vérifier le bon fonctionnement du simulateur avec cette stratégie de commande de référence. Ces résultats présentent une base pour les comparaisons futures avec d'autres stratégies.

### III.2. Génération de trajectoire par un algorithme du gradient

Cette stratégie de commande est basée sur une méthode d'optimisation appelée *gradient à pas optimal* pour la génération de la trajectoire du tracker. Cette méthode consiste en une recherche, en temps réel, de la position optimale permettant de maximiser la puissance produite par le module HCPV et ainsi de poursuivre en temps réel la trajectoire du soleil. La Figure 68 montre la caractéristique de la puissance du module HCPV en fonction de cette erreur de suivi (caractéristique du modèle présenté dans le chapitre précédent) pour un ensoleillement et une température donnés. L'objectif est donc de se rapprocher de cette puissance maximale en réduisant l'erreur du suivi et par conséquent de suivre au mieux la trajectoire du soleil. La direction du nouveau point correspondant à la puissance maximale est estimée à l'aide d'une évaluation du gradient de la puissance, appelée *direction de montée* de l'algorithme d'optimisation.

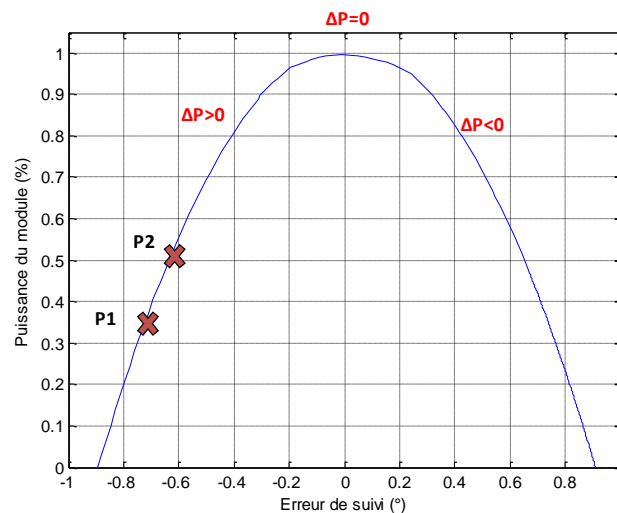


Figure 68- Caractéristique de la puissance du module en fonction de l'erreur de position pour un ensoleillement et une température fixes

Cette stratégie est considérée comme une commande en boucle fermée car elle repose sur une mesure de la puissance produite par le ou les modules HCPV associé(s) à un onduleur chargé d'obtenir à chaque instant la puissance maximale (par un algorithme de recherche de la puissance maximale appelé MPPT). Cette stratégie peut être hybride si on l'associe, à la manière de la stratégie hybride de référence, à un algorithme de calcul astronomique permettant de poursuivre le soleil en boucle ouverte dans le cas, par exemple, d'un ensoleillement trop faible rendant temporairement indisponible l'information de puissance du module HCPV (présence de nuages). Cette situation correspond alors à une ouverture de la boucle de contrôle qui, si elle se prolonge, peut rendre la stratégie d'optimisation inopérante. En effet, si le modèle de module HCPV a pu être identifié sur une plage d'erreur de  $\pm 0.65^\circ$  en raison des données expérimentales à disposition, l'extrapolation de ce modèle laisse espérer

une exploitation possible des modules comme capteur solaire seulement sur une plage d'environ  $\pm 0.9^\circ$  pour la technologie de modules considérée. En dehors de cet intervalle, le module ne peut plus être utilisé comme capteur tant qu'un algorithme complémentaire n'a pas recentré le tracker, avec une tolérance inférieure à  $\pm 0.9^\circ$ .

### III.2.1. Algorithme d'optimisation du « Gradient à pas optimal »

La recherche du maximum d'une fonction  $f(x)$ , par cette méthode, repose sur un calcul du gradient  $\nabla f(x)$ . Le maximum de montée est obtenu au prix d'une recherche linéaire le long de la demi-droite  $x(\alpha)_{\alpha>0} = x^k + \alpha \nabla f(x^k)$ . A l'itération  $k$  le pas optimal  $\alpha = \alpha^k$  est obtenu lorsque la fonction  $f(x^k + \alpha \nabla f(x^k))$  atteint son premier maximum. L'itération  $k$  de l'algorithme du gradient à pas optimal peut donc s'écrire comme suit:

- Effectuer la recherche linéaire pour trouver le pas optimal  $\alpha^k > 0$
- Calculer  $x^{k+1} = x^k + \alpha \nabla f(x^k)$
- Tester la convergence  $\|x^{k+1} - x^k\| < \varepsilon_1$ .

Dans le présent contexte, le maximum recherché est unique à un instant donné, mais se déplace lentement dans le temps, avec le soleil. Ce contexte d'application de la méthode du gradient nécessite de travailler en temps réel car les évaluations de la fonction (ici de la puissance) nécessitent des déplacements physiques des axes du tracker.

### III.2.2. Application de la méthode du gradient pour une maximisation en temps réel

Le principe de la méthode, présenté précédemment, a donc été retravaillé comme expliqué dans l'organigramme de la Figure 69. La première étape consiste à évaluer le gradient de puissance du module dans un repère orthonormé (A, h). Les deux composantes du vecteur gradient de puissance en azimut et en élévation sont  $dP(A^k)$  et  $dP(h^k)$ . Cette évaluation du gradient de puissance nécessite, dans ce contexte, un déplacement sur chacun des axes azimut et élévation, respectivement  $\beta_A$  et  $\beta_h$ , et une mesure de la puissance correspondant à chaque déplacement. Le gradient de puissance permet alors de définir une première direction vers le point de puissance maximale. Les équations de (32) à (35) présentent les déplacements à effectuer pour les deux axes et l'évaluation des composantes du gradient de puissance correspondant à chaque axe.

$$A_\beta^k = A^k + \beta_A \quad (32)$$

$$h_\beta^k = h^k + \beta_h \quad (33)$$

$$dP(A^k) = \frac{\partial P}{\partial A} = \frac{P_A^k - P_{A_\beta}^k}{\beta_A} \quad (34)$$

$$dP(h^k) = \frac{\partial P}{\partial h} = \frac{P_h^k - P_{h_\beta}^k}{\beta_h} \quad (35)$$

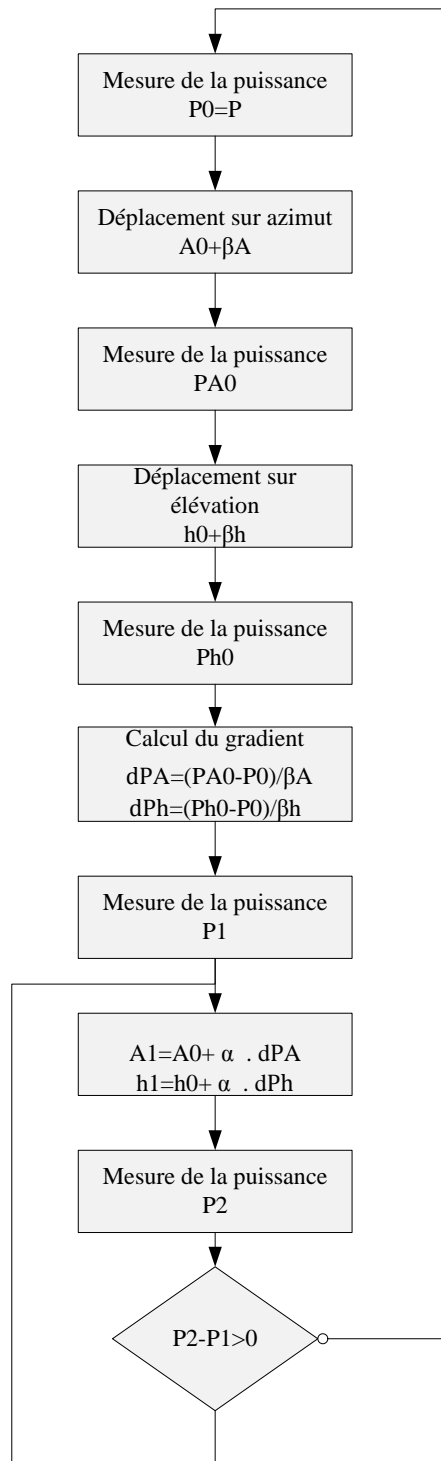


Figure 69- Algorithme de la commande de basée sur la méthode d'optimisation du gradient

Le maximum de puissance est obtenu par une recherche le long de la demi-droite  $(A, h)(\alpha)_{\alpha>0} = (A, h)^k + \alpha \nabla P(A, h)^k$ . A l'itération  $k$  de l'algorithme, le *pas optimal*  $\alpha = \alpha^k$  correspond à la distance à parcourir dans la direction du gradient pour atteindre le maximum de puissance (Figure 70). La détermination théorique de cette distance n'est pas envisageable simplement, la position du point optimal dans la direction d'avance déterminée doit se faire empiriquement, en temps réel, pendant un déplacement dans cette direction. La recherche du point optimal peut par exemple utiliser une évaluation en temps réel de la dérivée de la

puissance dans la direction prise (par rapport à  $\alpha$ ). Lorsque  $\frac{\Delta P}{\Delta \alpha}$  atteint zéro, le maximum de puissance est atteint, les axes doivent donc être arrêtés. Comme la caractéristique de puissance s'est déplacée dans le plan  $(A, h)$  pendant l'itération, une nouvelle itération de l'algorithme peut débuter pour poursuivre les coordonnées du maximum de puissance.

Une des difficultés de l'application de la méthode du gradient dans ce contexte de tracker, est le déplacement de la position optimale, et donc le maximum de puissance visé, en permanence avec le soleil. En effet, ce phénomène peut affecter la caractéristique  $P(\varepsilon A, \varepsilon h)$  et causer une incertitude sur l'évaluation du gradient.

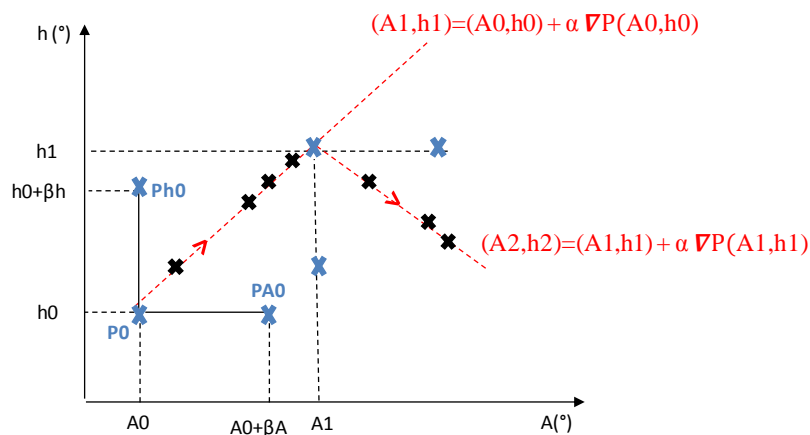


Figure 70- Recherche de la puissance maximale du module HCPV par la méthode du gradient

### III.2.3. Simulation de l'algorithme de génération de trajectoire proposé

La stratégie de génération de trajectoire présentée précédemment a été implémentée sur le simulateur du tracker HCPV développé sous Simulink (Figure 71). La démarche suivie sous Simulink utilisant une machine d'état, est décrite en détail en *annexe 5*. L'objectif de la simulation est de tester les performances de la stratégie de commande et de la valider en simulation puis de la comparer à la stratégie de commande de référence. L'entrée de la commande  $P^k$  est la puissance maximale du module HCPV calculée à l'instant  $k$ . Cette puissance maximale  $P_{\max}$  correspondant dans le système réel à la puissance calculée par l'algorithme de recherche de la puissance maximale (MPPT) utilisé par l'onduleur connecté aux modules HCPV. Cette puissance est différente de la puissance maximale recherchée par la méthode du gradient et qui correspond à une erreur de position nulle  $(\varepsilon A, \varepsilon h) = (0, 0)$ .

A partir de l'entrée  $P^k$  et en appliquant l'algorithme de la méthode d'optimisation du gradient, nous déterminons la consigne de position en azimut et en élévation.

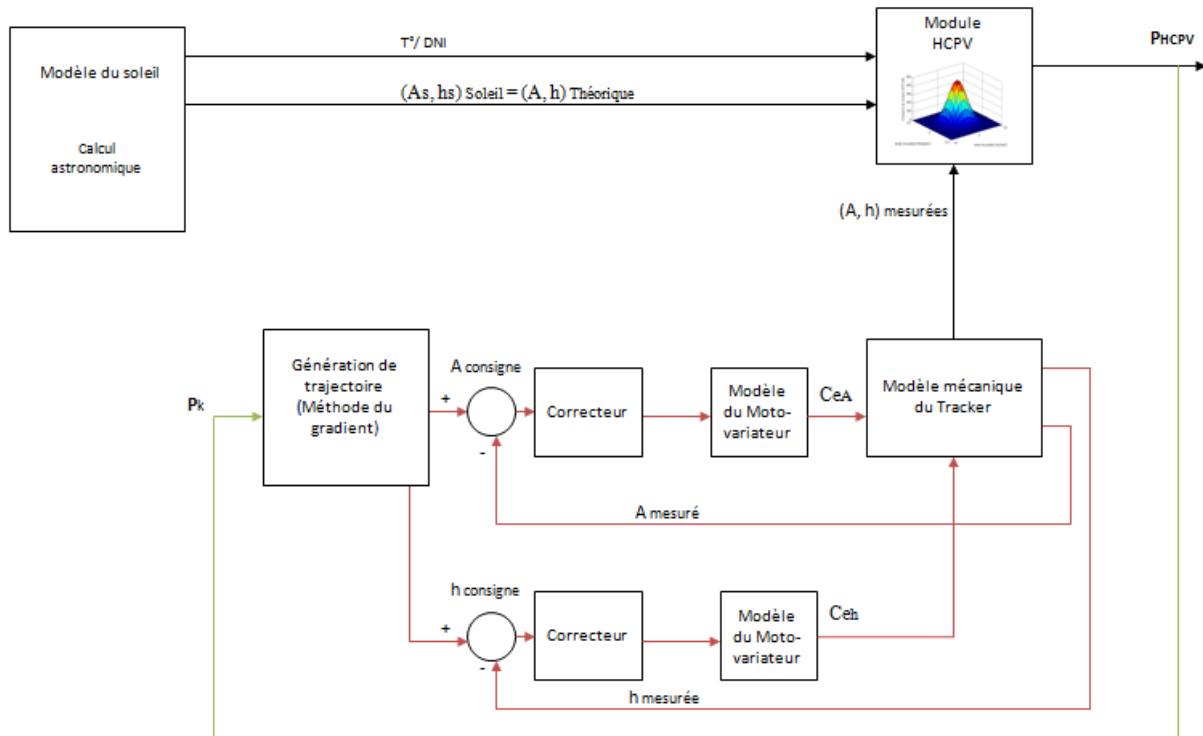


Figure 71- Schéma du simulateur du tracker HCPV avec une stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient

Les premières simulations ont été effectuées avec un ensoleillement de  $1000 \text{ w/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$  (valeurs des conditions standard de test). Ces conditions sont maintenues constantes sur la durée de 5 minutes. Nous cherchons, dans cette simulation, à poursuivre la trajectoire du soleil en azimut et en élévation permettant d'atteindre une puissance maximale. Concernant la trajectoire de recherche de la puissance maximale, dans ces premières simulations nous avons opté pour la stratégie expliquée dans le schéma de la Figure 72. Selon le principe de la méthode du gradient appliquée à un système dont le comportement évolue dans le temps, la trajectoire consiste à effectuer un déplacement  $\beta_A$  sur un premier axe (Azimut) et mesurer la variation de puissance qui en résulte ( $PA^k - P^k$ ) puis revenir au point de départ et reprendre la même opération sur le deuxième axe. Ces déplacements sont numérotés de 1 à 4 sur la Figure 72. La trajectoire de la recherche de la puissance maximale partira du point initial  $(A_0, h_0)$  défini avant les déplacements, dans la direction définie à partir de l'évaluation du gradient.

Les résultats obtenus (voir Figure 73) montrent que cette première version d'algorithme de poursuite du soleil basé sur le calcul du gradient de puissance permet une poursuite de la trajectoire du soleil sur les deux axes azimut et élévation (Figure 73 -a et -b) avec une erreur de position qui varie entre  $-0.1^\circ$  et  $0.2^\circ$ . Cette erreur ne dépasse pas l'intervalle d'angle d'acceptance du module HCPV, ce qui garantit une puissance de plus de 90% de la puissance maximale du module. Néanmoins, elle reste moins performante que la stratégie de commande dite de référence en termes de précision du suivi. En effet, l'erreur de suivi est largement supérieure à l'erreur maximale de la stratégie de référence ( $0.05^\circ$ ).

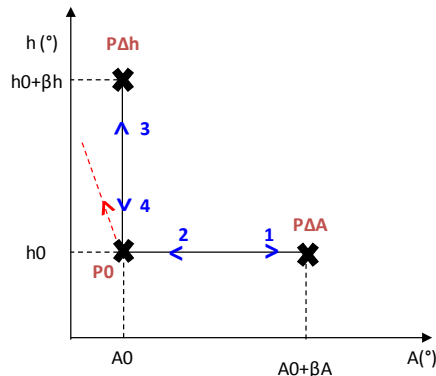


Figure 72- Première version de l'algorithme de la stratégie de commande basée sur un algorithme de gradient

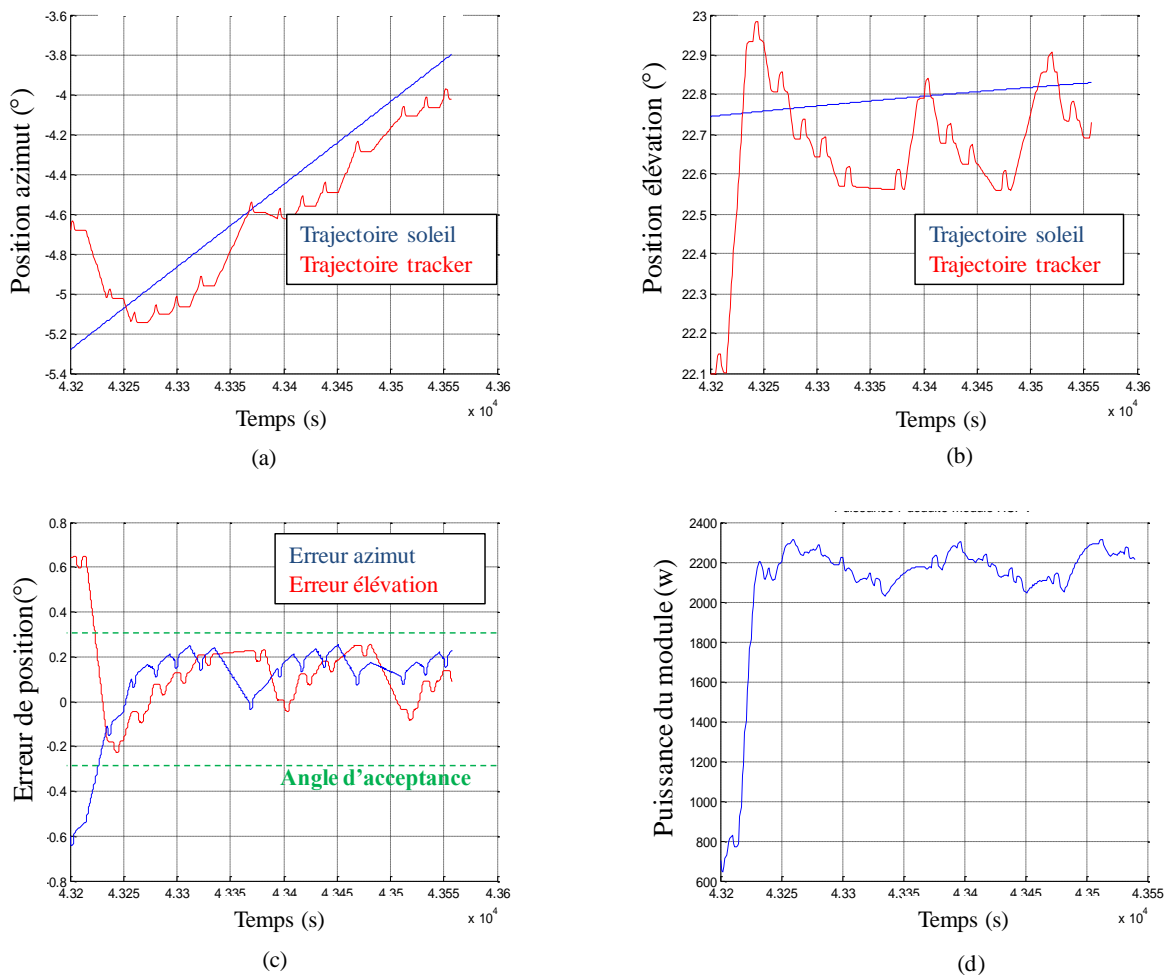


Figure 73- Résultats de simulation de la stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient: Trajectoire du tracker en azimut(a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

L'erreur de suivi en azimut et en élévation (Figure 73 –c) a été agrandie (Figure 74) afin de pouvoir analyser les trajectoires en azimut et en élévation générées par la méthode du gradient. La Figure 74 met en évidence les étapes d'une itération : En premier lieu, deux

déplacements sont effectués sur les axes d'azimut et d'élévation afin d'évaluer le gradient. S'ensuit le déplacement du tracker dans la direction du gradient évalué, jusqu'à atteindre la puissance maximale, comme le montre la Figure 73 -d.

Dans l'objectif de mettre en évidence la variation de l'ensoleillement, des simulations de la même version de l'algorithme ont été effectuées avec un ensoleillement variable (600, 1000 puis 300 W/m<sup>2</sup>). Cette variation de l'ensoleillement, qui peut être causé par un passage de nuages, causera la variation de la puissance maximale produite par le module HCPV.

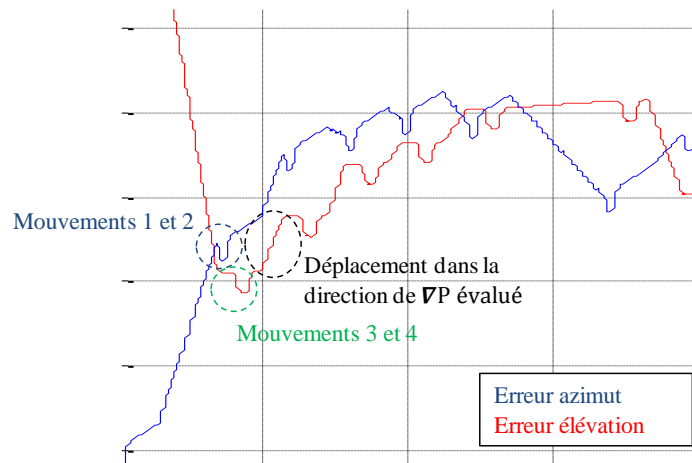


Figure 74- Détail de la Figure 73

Les résultats obtenus ensuite (Figure 75) montrent que l'algorithme de la stratégie basée sur le calcul du gradient de puissance permet une poursuite de cette puissance maximale qui varie à 2 reprises suite à la variation de l'ensoleillement direct (Figure 75 -d). Cette recherche continue du maximum de puissance a permis de suivre la course du soleil pour les deux axes azimut et élévation (Figure 75 -a et -b) avec une erreur de position qui varie entre -0.1° et 0.2°. Cette erreur, comme pour la première simulation, ne dépasse pas l'intervalle d'angle d'acceptance du module HCPV ce qui garantit une puissance de plus que 90% de la puissance maximale du module.

En fait, les résultats sont encourageants au regard de l'objectif de réduction du coût du tracker HCPV avec un contrôle sans viseur solaire, mais insuffisants du point de vue précision du suivi, et donc de la production des modules. En effet, le contrôle proposé est moins performant que la stratégie de commande de référence.

Afin de détecter les insuffisances de la stratégie proposée, le premier élément de la méthode ciblé par un diagnostic est la méthode d'évaluation du gradient. L'objectif est donc d'analyser l'influence du déplacement permanent de la caractéristique de puissance avec le soleil sur l'évaluation du gradient de puissance. Une étude est donc proposée afin de vérifier si la trajectoire basée sur le gradient évalué permet bien de prendre la direction du sommet de la caractéristique de puissance, sommet dont la position (en azimut et en élévation) aura évolué entre les instants de début et de fin de la procédure d'évaluation du gradient.



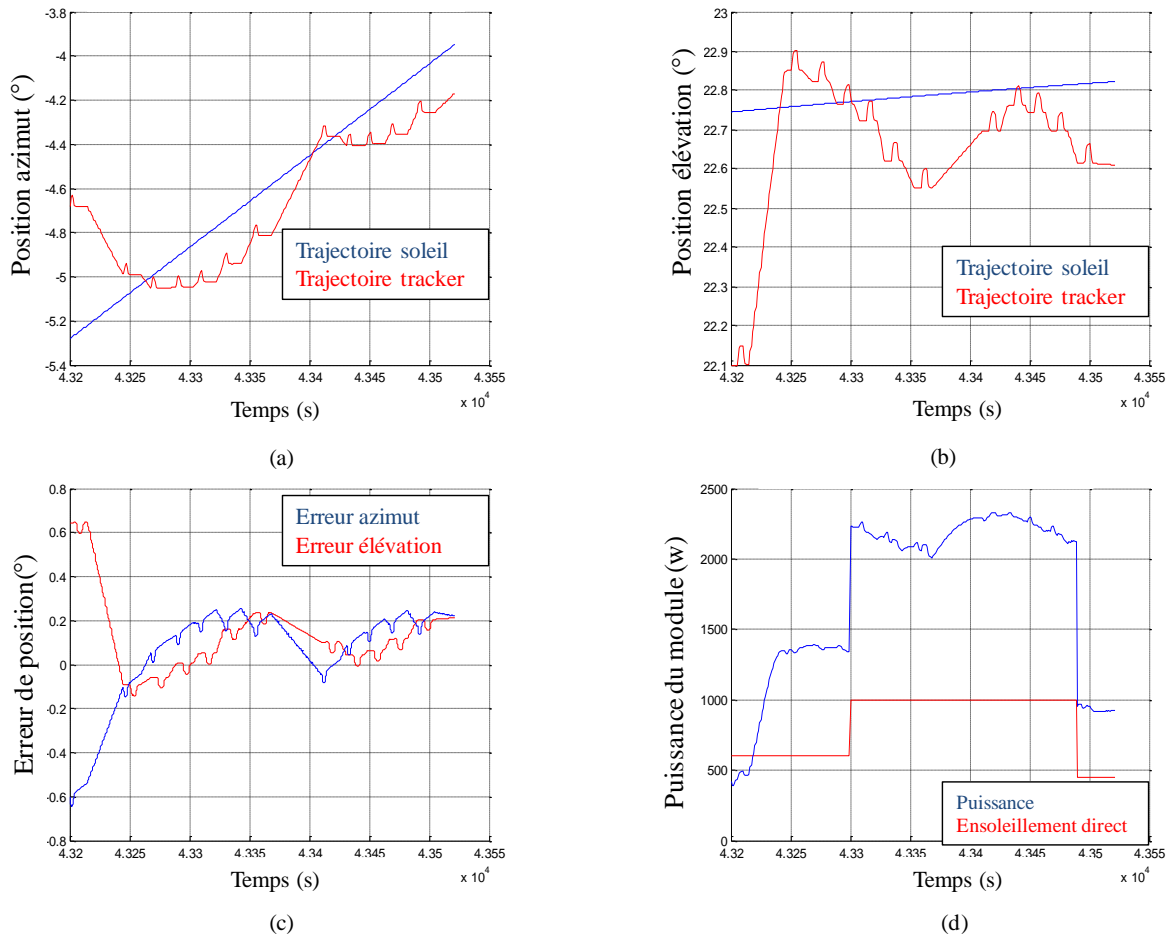


Figure 75- Résultats de simulation de la stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient avec une variation de l'ensoleillement direct: Trajectoire du tracker en azimuth (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimuth et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV et ensoleillement direct (DNI) (d)

Ce diagnostic de l'évaluation du gradient consiste à tracer la trajectoire du soleil dans un repère orthonormé  $(A, h)$ , ainsi que la caractéristique théorique de puissance  $P(\varepsilon_A, \varepsilon_h)$  pour les deux positions occupées par le soleil au début de l'évaluation du gradient  $(A_{td}, h_{td})$  et à la fin de cette évaluation  $(A_{tf}, h_{tf})$ . Sur cette même représentation (Figure 77) un tracé de la trajectoire idéale de la recherche de puissance maximale est proposé, partant de la position de départ du tracker  $(A_0, h_0)$  (en début de la simulation) et dont la direction serait donnée par une évaluation parfaite du gradient telle qu'elle pourrait être obtenue si la caractéristique réelle de puissance en fonction de la position du soleil était connue en tout point à l'instant  $t = t_0$  pris pour l'évaluation du gradient. Ce calcul correspondrait donc à une application de la méthode du gradient dans un cas idéal tel que décrit à la Figure 76-a : la puissance du module pour les trois positions nécessaires à l'évaluation du gradient,  $P_0$ ,  $P_{\Delta A}$  et  $P_{\Delta h}$  seraient connues, sans déplacement physique des axes du tracker, en un même instant  $t_0$ . Naturellement, cette trajectoire idéale conduit effectivement au point correspondant au maximum de puissance de la caractéristique du module tracée à l'instant  $t = t_0$ , tel qu'illustré à la Figure 77.

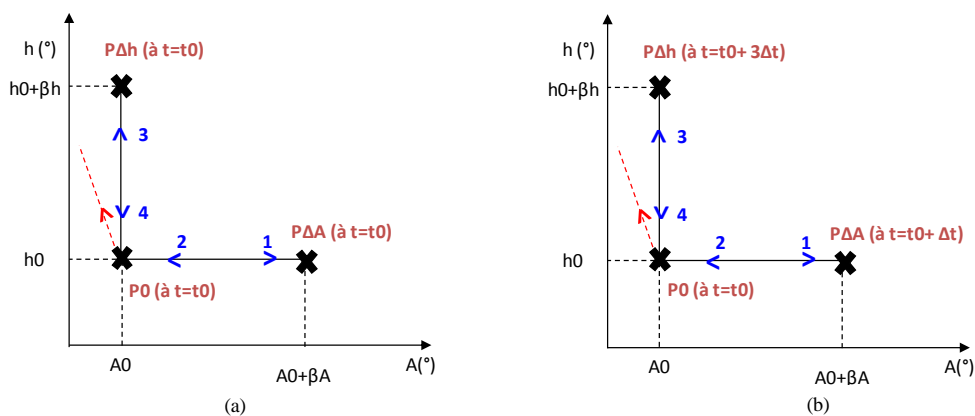


Figure 76- Principe de l'évaluation du gradient : Cas idéal (a) Cas réel (b)

Dans un objectif de comparaison avec la trajectoire idéale, la trajectoire réelle est également tracée : elle part du point  $(A_0, h_0)$  et suit la direction du gradient évalué à partir d'une mesure de puissance aux trois positions nécessaires à cette évaluation. Les mesures de puissances  $P_{\Delta A}$  et  $P_{\Delta h}$  nécessitent des déplacements physiques  $(\beta_A, \beta_h)$  des axes du tracker numérotés de 1 à 4 sur la Figure 76-b. Les trois mesures  $P_0$ ,  $P_{\Delta A}$  et  $P_{\Delta h}$  sont donc effectuées à trois instants différents  $(t_0, t_0+\Delta t$  et  $t_0+3\Delta t)$  en raison du temps de réponse  $\Delta t$  des asservissements de position des axes. Pendant ces déplacements physiques sur les deux axes, la caractéristique de puissance du module continue d'évoluer avec la position du soleil, ce qui introduit un biais sur l'évaluation du gradient ainsi obtenue, tel qu'illustré à la Figure 77.

Le diagnostic effectué sur l'évaluation du gradient, présenté par la Figure 77, a permis de mettre en évidence un des problèmes de cette évaluation dans ce contexte particulier. En effet le gradient évalué vise une position différente de celle occupée par le soleil en début de calcul. Le déplacement de la position théorique pendant l'évaluation du gradient (durée des déplacements nécessaires à l'évaluation du gradient) a provoqué une erreur de mesure de la puissance et une incertitude sur l'évaluation du gradient. Cette incertitude peut donc justifier les résultats insuffisants du point de vue précision du suivi (Figure 73 -c).

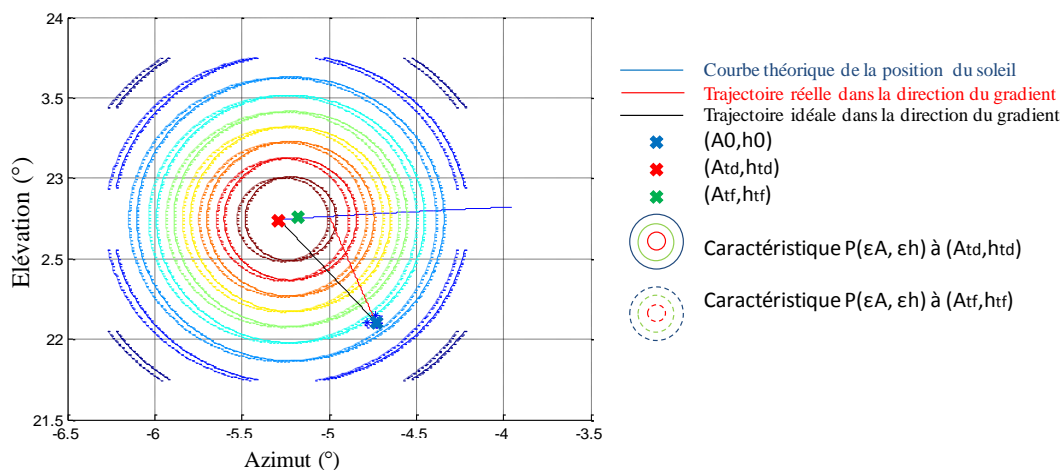


Figure 77- Résultats du diagnostic de l'évaluation du gradient

L'objectif est de réduire la durée des déplacements nécessaires à l'évaluation du gradient afin de minimiser l'erreur de mesure de la puissance et l'incertitude de l'évaluation du gradient. Plutôt que de réaliser simplement deux allers-retours (un par axe) pour mesurer la puissance en  $(A_0 + \beta_A, h_0)$  et  $(A_0, h_0 + \beta_h)$  et ainsi évaluer le gradient en  $(A_0, h_0)$ , nous proposons, dans cette version (Figure 78), une mesure de la puissance en  $(A_0 + \beta_A, h_0)$  et  $(A_0 + \beta_A, h_0 + \beta_h)$  pour une évaluation du gradient en  $(A_0 + \beta_A, h_0)$ . Le gradient évalué est utilisé pour construire une trajectoire en direction du maximum à partir de  $(A_0 + \beta_A, h_0)$ . Cette trajectoire est directement rejointe à partir du dernier point atteint, en  $(A_0 + \beta_A, h_0 + \beta_h)$ , ce afin d'éliminer un inutile mouvement de retour vers le point  $(A_0 + \beta_A, h_0)$ . Cette version propose donc un seul déplacement pour chaque axe (Figure 78), ce qui réduit le temps de l'évaluation du gradient.

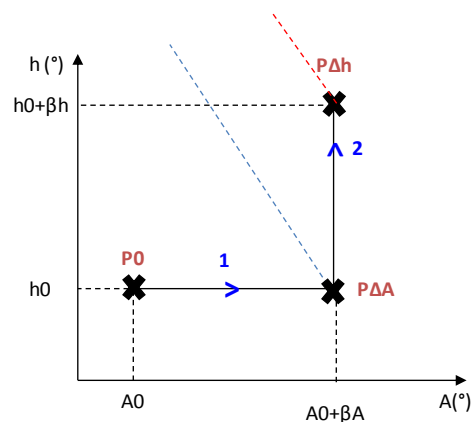


Figure 78- Deuxième version de l'algorithme de la stratégie basée sur la méthode du gradient

En se basant sur cette version améliorée de la méthode du gradient, nous avons repris les simulations avec un ensoleillement et une température définis respectivement à  $1000 \text{ w/m}^2$  et  $25^\circ\text{C}$  dans l'objectif de poursuivre la trajectoire théorique du soleil.

Cette version de l'algorithme a effectivement amélioré la précision du suivi sur les deux axes (Figure 79 -a et -b) ce qui a permis d'augmenter la puissance produite par le module HCPV (Figure 79 -d). En effet, l'erreur de suivi ne dépasse plus  $0.05^\circ$  (Figure c) comme pour le cas de la stratégie de référence.

Afin de mieux évaluer les performances de cette deuxième version de l'évaluation du gradient, nous avons effectué le diagnostic appliqué sur la première version et expliqué précédemment. Les résultats du diagnostic, Figure 80, montrent que le gradient évalué vise une position du soleil plus loin de celle définie au début du calcul, mais nettement plus proche que ce que nous avons pu viser avec la première version de l'algorithme. En effet, la deuxième version de l'algorithme a permis de réduire le temps d'évaluation du gradient de 8s (avec seulement un déplacement par axe) ce qui a nettement amélioré son évaluation et par conséquent la précision du suivi.

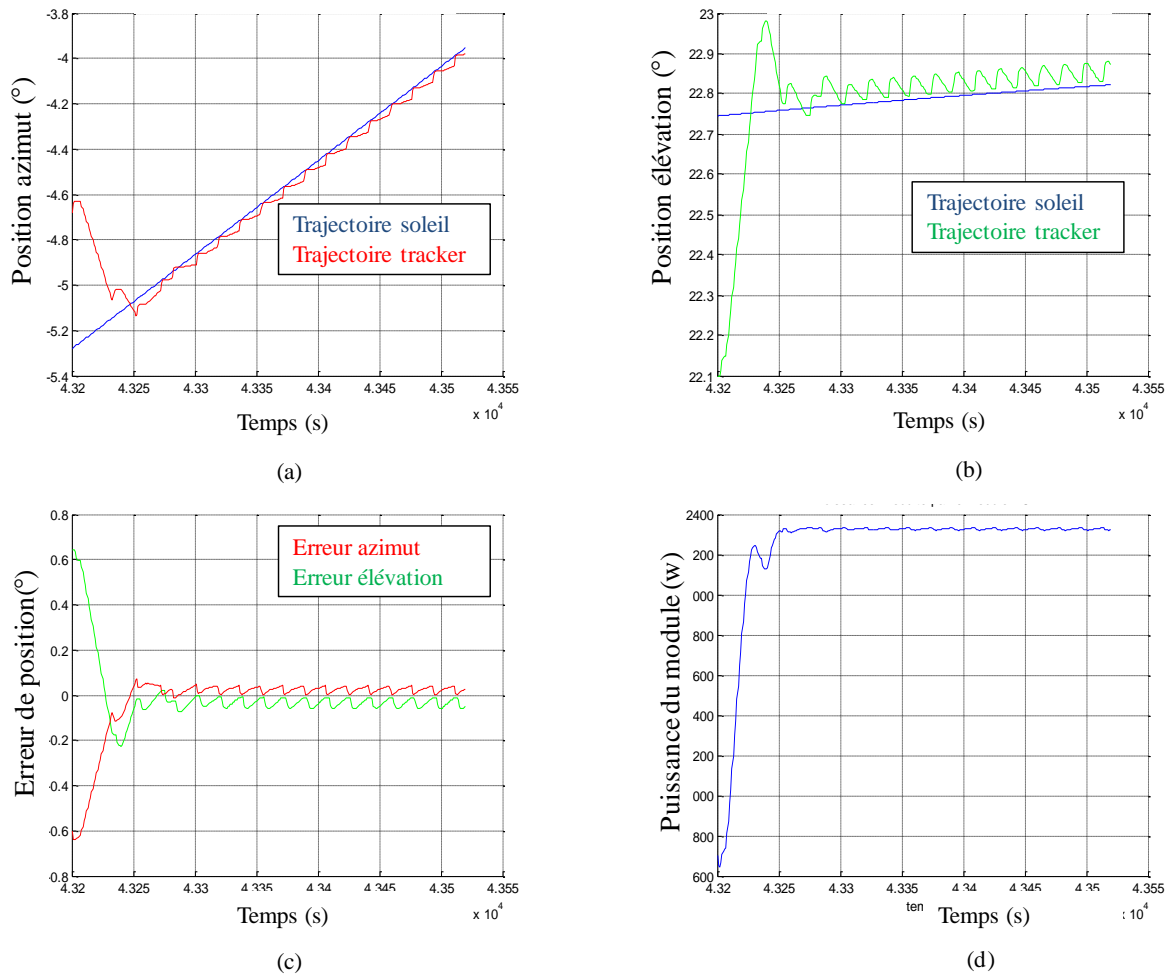


Figure 79- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

Ce premier diagnostic effectué met en évidence l'amélioration de l'évaluation du gradient, et par conséquent, la précision de la deuxième version de l'algorithme de la stratégie. Néanmoins, nous n'avons pas totalement résolu le problème d'incertitude sur l'évaluation du gradient puissance causé par le déplacement du soleil et donc de la position du maximum de la caractéristique de puissance du module pendant cette évaluation.

Cette conclusion nous amène à mieux exposer la problématique de l'influence du déplacement de la caractéristique de puissance (azimut et élévation) sur l'évaluation du gradient de puissance et donc sur la performance de la stratégie de commande proposée :

La Figure 81 propose une illustration de l'influence de la dérive de la caractéristique de puissance sur les mouvements réellement effectués par rapport à cette caractéristique. Cela conduit aux évaluations de puissances  $P_{\Delta AR}$  et  $P_{\Delta hR}$  suite aux mouvements indicés 1 et 2, respectivement caractérisés par les couples  $(\Delta_{AR1}, \Delta_{hR1})$  et  $(\Delta_{hR2}, \Delta_{AR2})$ . Ceci revient à considérer une déformation, par rapport à la caractéristique de puissance, du repère dans lequel est évalué le gradient, repère qui n'est alors plus orthonormé.

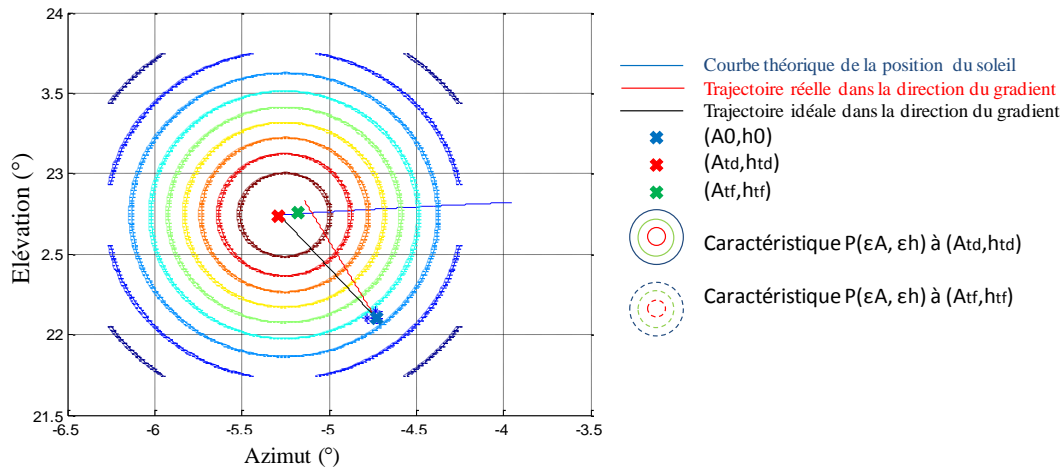


Figure 80- Résultats du diagnostic de la deuxième version de l'évaluation du gradient

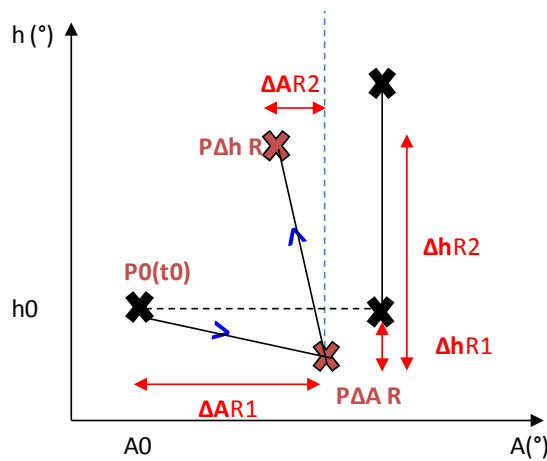


Figure 81- Représentation plus réaliste du comportement du tracker durant l'évaluation du gradient de puissance

Il est de plus important de noter que la position du maximum de puissance du module continue d'évoluer avec la position du soleil pendant la recherche de ce maximum de puissance dans la direction déterminée suite à l'évaluation du gradient de puissance. Le point de départ  $(A_0, h_0)$  pris arbitrairement pour exemple depuis le début de cette étude conduit à un biais dans l'évaluation du gradient qui se trouve finalement être relativement favorable à la poursuite du maximum de la caractéristique, dans la mesure où la direction de la trajectoire réellement prise permet, dans ce cas, d'anticiper l'évolution de la position du soleil (Figure 80).

Toujours, dans le cadre de cette étude de l'évaluation du gradient et afin de montrer que la deuxième version de l'algorithme est applicable avec des performances satisfaisantes en termes d'évaluation du gradient avec d'autres points de départ  $(A_0, h_0)$ , une campagne de simulation a été effectuée avec trois autres points de départ. Ces points ont été choisis de manière arbitraire, dans l'objectif d'illustrer les différentes configurations possibles par rapport

à la position du soleil : Point de départ en avance en azimut et en élévation (Figure 82 -a), en avance en azimut et en retard en élévation (Figure 82 -b, il s'agit du point de départ considéré depuis le début de l'étude), en retard en azimut et en avance en élévation (Figure 82-c), et enfin un dernier point de départ en retard en azimut et en élévation (Figure 82-d). Ces points ne constituent ni le cas le plus favorable ni le cas le plus défavorable. Ces simulations ont pour simple objectif d'illustrer quelle peut être l'influence du point de départ dans des cas moins favorables.

Les caractéristiques de l'évolution de la puissance du module HCPV, l'évolution de la trajectoire en azimut et en élévation du tracker et l'évolution de l'erreur de position pour chacun des 4 points de départ proposés sont présentées dans l'annexe 5. Les simulations effectuées mettent en évidence que l'algorithme de la stratégie proposée permet de poursuivre la course du soleil avec des performances satisfaisantes quelle que soit la position initiale définie. Comme l'illustrent les figures ci-dessous, le point de départ correspondant à un retard initial sur les deux axes (Figure 82-d) conduit finalement à la meilleure évaluation de la position du soleil, sans pour autant conduire à de meilleurs performances de suivi. En effet, le point de départ de la (Figure 82-b) se trouve être plus intéressant dans la mesure où l'erreur d'évaluation du gradient de puissance conduit à anticiper l'évolution de la position du soleil essentiellement en azimut, axe sur lequel le déplacement du soleil est le plus important à cette heure de la journée.

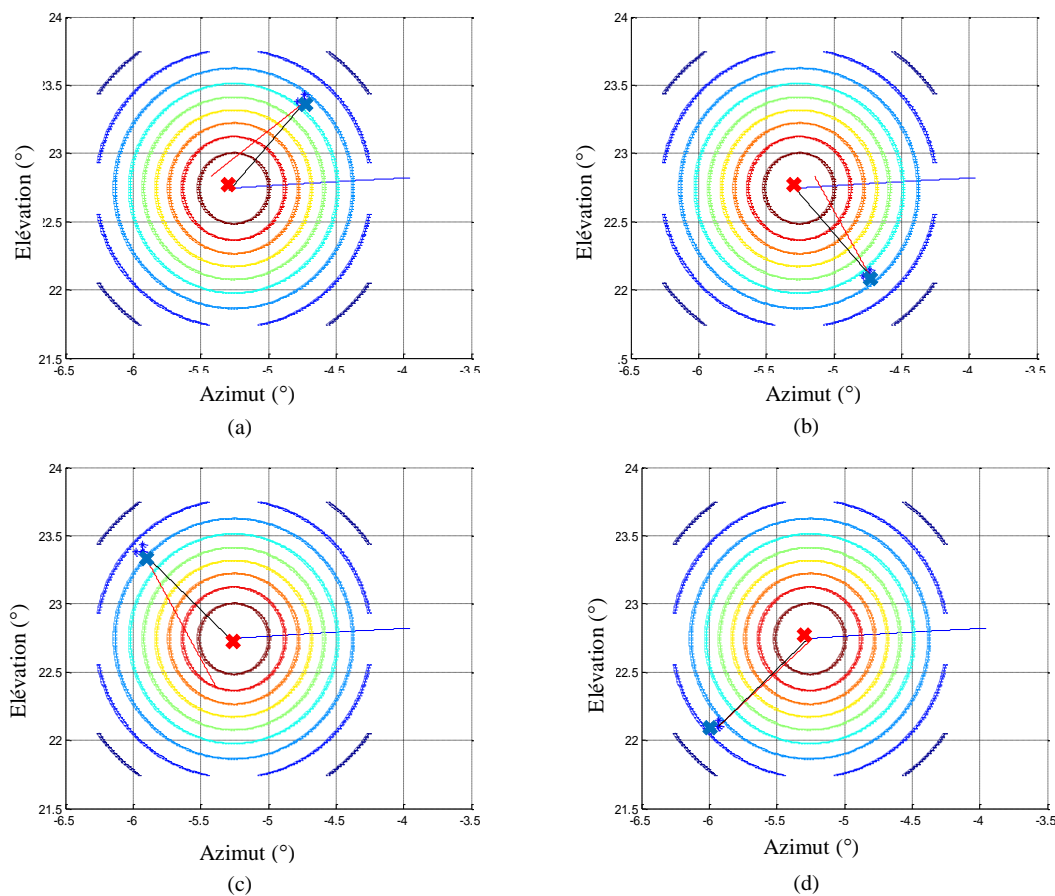


Figure 82- Diagnostic de l'évaluation du gradient pour 4 points de départ différents

Une troisième campagne de simulation est proposée afin d'observer l'influence de la distance entre la position initiale ( $A_0, h_0$ ) du tracker et la position du soleil (donc de l'erreur de position initiale) au moment de la mise en œuvre de l'algorithme. Pour cet objectif, nous avons choisi quatre points de départ de la manière suivante (Figure 83) :

- Un premier point ( $A_0, h_0$ ) correspond à des erreurs ( $\varepsilon A, \varepsilon h$ ) par rapport à la position initial du soleil telles que la puissance P1 est égale à 50 % de la puissance maximale du module. Il s'agit du point de départ considéré depuis le début de l'étude.
- Un deuxième point correspond à une puissance P2 supérieure à 90 % de la puissance maximale.
- Un troisième point correspond à une puissance P3 très faible, d'environ 20 % de la puissance maximale.
- Un quatrième point correspond à une puissance P4 nulle.

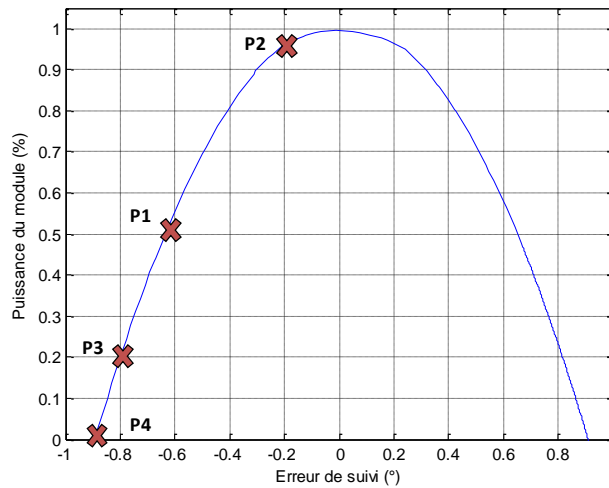


Figure 83- Choix des 4 points de départ en fonction de la puissance de départ qui en résulte

Les 4 représentations de la Figure 84 mettent en évidence que plus le point de départ ( $A_0, h_0$ ) est proche de la position théorique du soleil (proche du point de puissance maximale) meilleur sera l'évaluation du gradient et donc la recherche de la puissance maximale et le suivi de la trajectoire du soleil. Plus le point de départ ( $A_0, h_0$ ) est loin et plus l'incertitude de l'évaluation du gradient est importante ce qui augmente le risque de rater la puissance maximale à viser et de perdre, par conséquent, la course du soleil.

Dans un second temps, nous avons simulé la trajectoire du tracker en azimut et en élévation en partant du point de départ le plus proche (Figure 84) et le plus loin (Figure 85). Nous avons tracé aussi l'évolution de la puissance du module HCPV et l'évolution de l'erreur de position pour chaque cas. Le reste des simulations est présentés dans l'annexe 5.

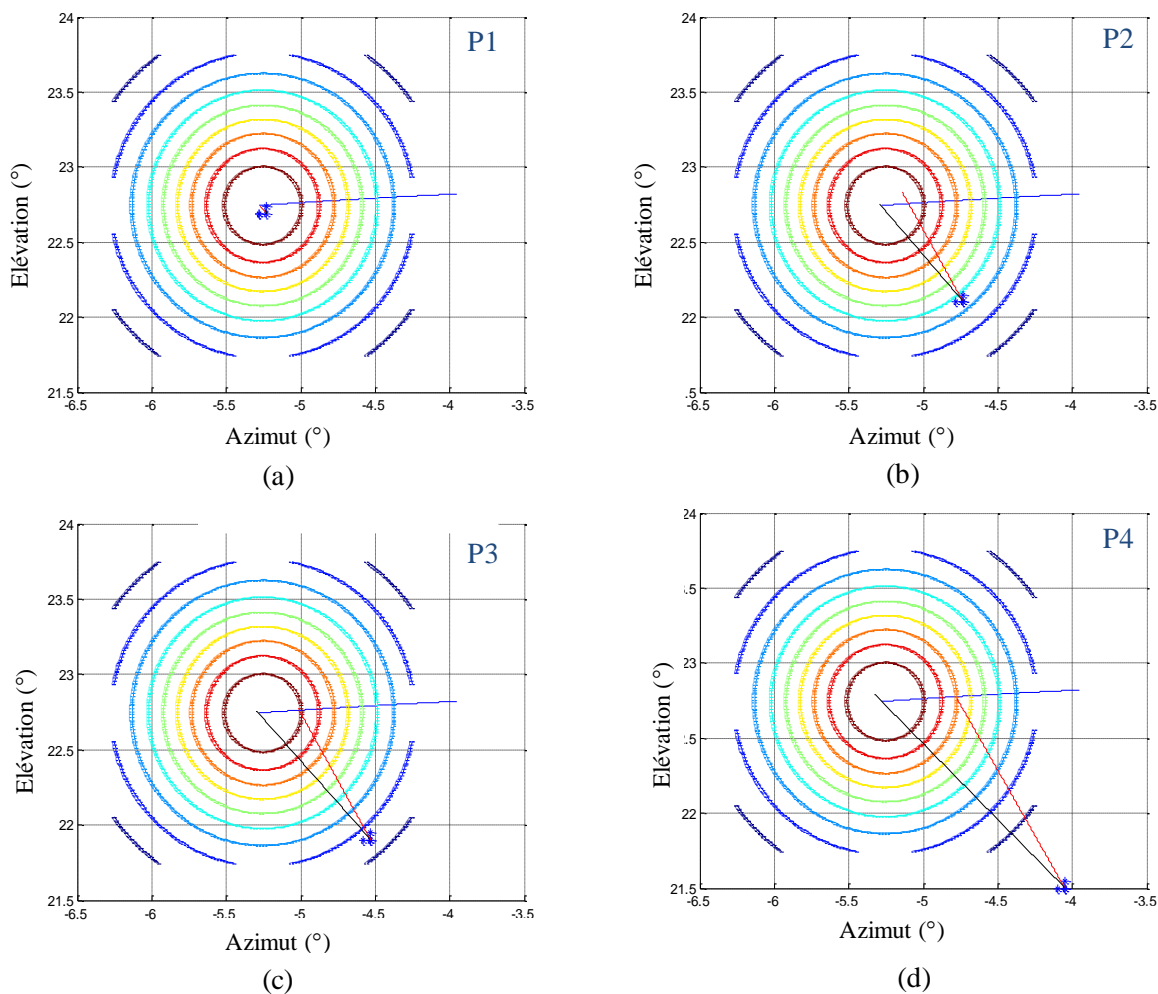


Figure 84- Diagnostic de l'évaluation du gradient pour 4 points de départ différents : Du plus proche au plus loin de la position initiale du soleil

Ces caractéristiques mettent en évidence l'importance du choix du point de départ et son influence sur la qualité du suivi. En effet, le point départ le plus proche de la position initiale du soleil offre un meilleur suivi. Ces caractéristiques illustrent aussi le temps nécessaire pour atteindre le maximum de puissance dans la direction prise, et donc pour rattraper la course du soleil. En outre, la poursuite de la trajectoire du soleil dans le cas d'un point de départ éloigné nécessite un fonctionnement des actionneurs en vitesse maximale.

Ces conclusions mettent en évidence l'intérêt d'un réglage en amont de la position du tracker. En effet, le tracker doit être mis en position de départ proche de la position du soleil à l'instant considéré, afin de trouver le plus rapidement possible la puissance maximale et "accrocher" la trajectoire du soleil. Cette mise en place doit être effectuée quotidiennement et automatiquement avant le lever du soleil. De même, le dispositif peut "décrocher" en cas de perte trop longue de l'ensoleillement (passage de nuages). Ces conclusions conduisent à la nécessité d'une hybridation de cet algorithme avec une génération de la trajectoire dite en boucle ouverte et basée sur un calcul astronomique de la position théorique à poursuivre.



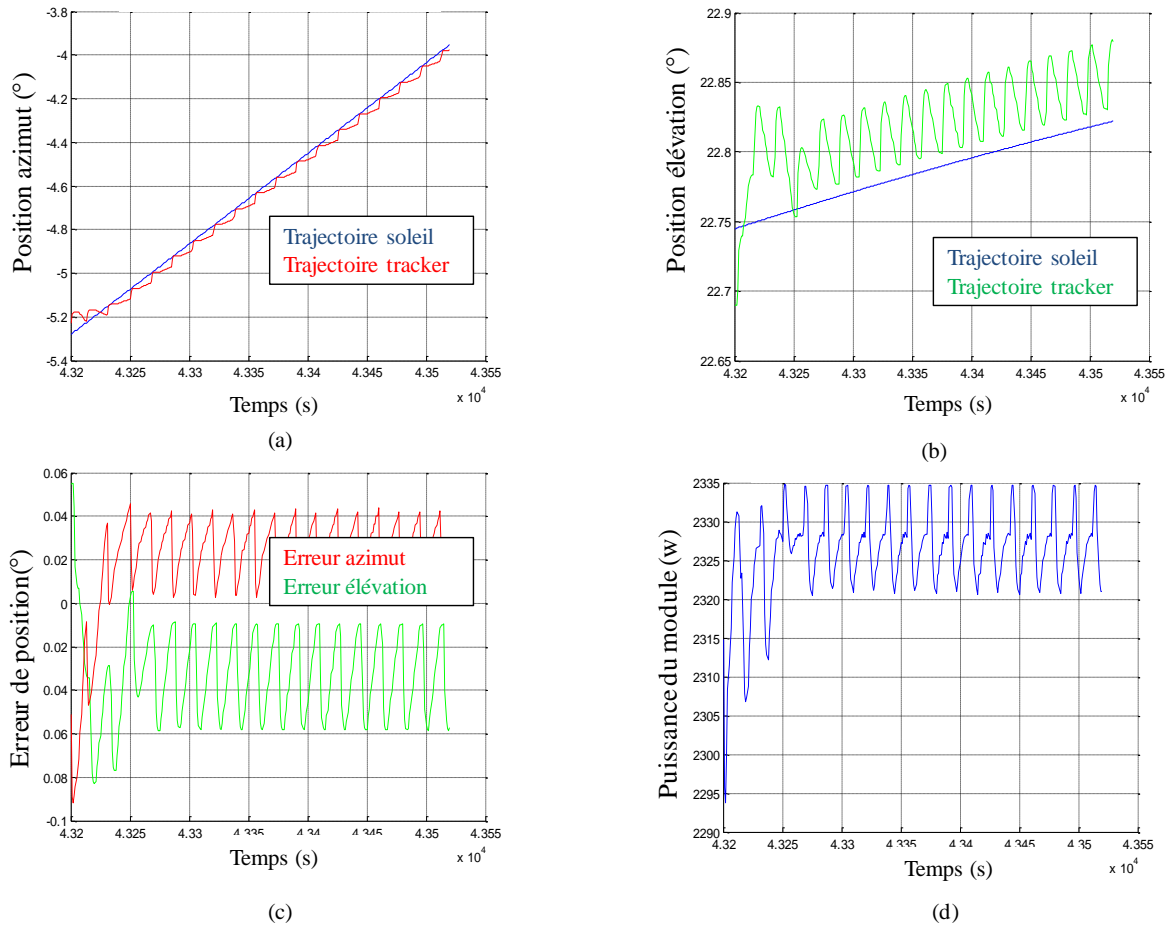


Figure 85- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ  $(A_0, h_0) = (-5, 22.5)$  donnant une puissance  $(P_2)$  proche du maximum: Trajectoire du tracker en azimuth (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimuth et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

### III.3. Conclusion : Intérêt et limitation de la stratégie de commande

Dans ce chapitre consacré à la stratégie de commande du tracker HCPV, celle dite de référence a été présentée en premier lieu. Ses performances ont été testées sur le simulateur. Une nouvelle stratégie de commande de tracker HCPV basée sur une méthode d'optimisation du gradient à pas optimal a été ensuite proposée. En plus de la réduction du coût de la commande du tracker, cette stratégie a présenté des performances satisfaisantes avec une précision de suivi de l'ordre de moins de  $0.1^\circ$ . En la comparant à la stratégie de commande de référence utilisée actuellement sur le démonstrateur tracker HCPV pris comme référence dans ces travaux de thèse, cette stratégie basée sur un algorithme du gradient nous garantit la même précision en étant moins coûteuse.

Cependant cette stratégie peut être encore plus intéressante et plus performante dans le cas de tracker à petites dimensions (tels que ceux de l'installation présentée Figure 87). En effet, un tracker de taille réduite (petite structure d'un ou deux modules) peut présenter moins de risques de déformation, rendant l'utilisation des modules comme capteur plus fiable.

Contrairement à celle du tracker de référence, cette structure permet aussi d'éviter le besoin de réglage (complexe) de l'alignement des modules les uns par rapport aux autres.

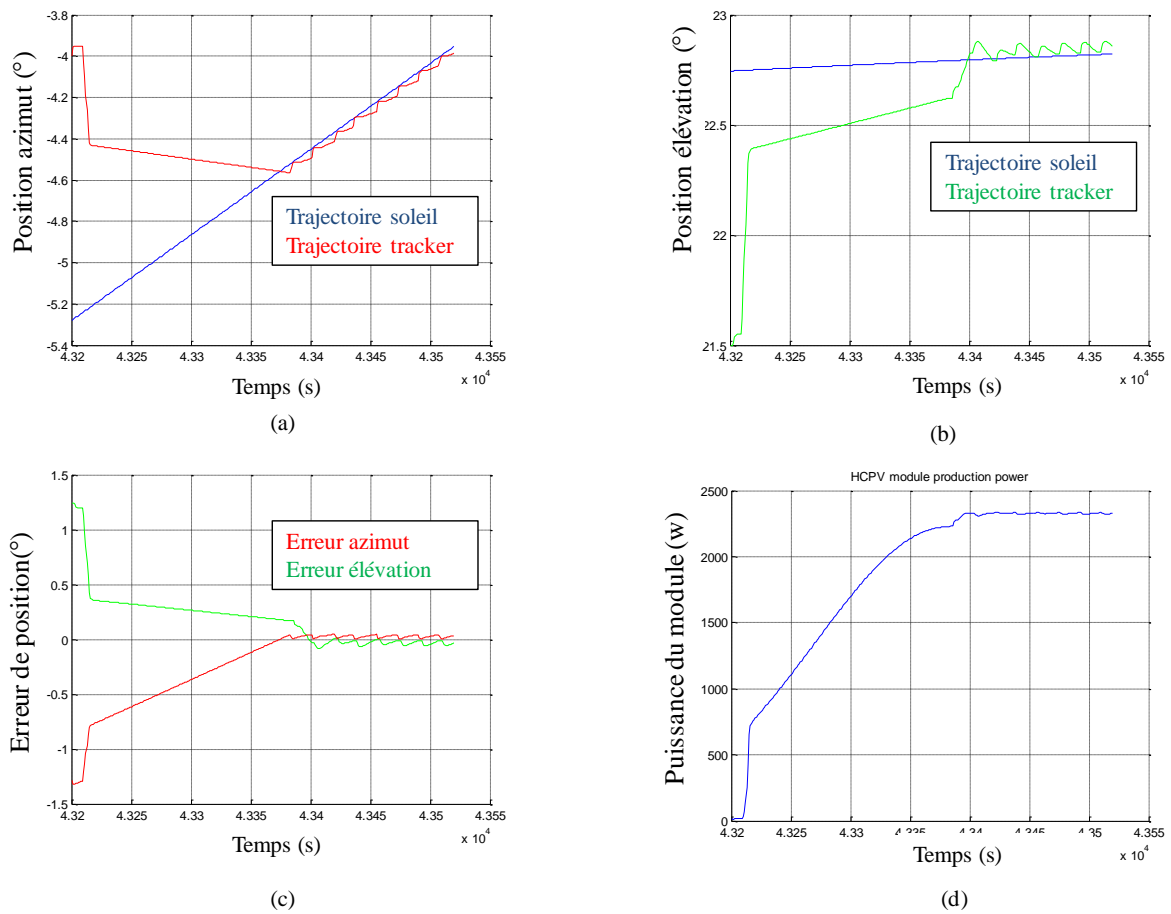


Figure 86- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ  $(A_0, h_0) = (-4, 21.5)$  donnant une puissance nulle ( $P_4$ ) : Trajectoire du tracker en azimuth (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimuth et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)



Figure 87- Trackers à petites dimensions proposés par (Foresi, J., 2015)

Parmi les problématiques de l'implémentation pratique de cette stratégie de commande, citons le temps de réponse et la dépendance de ses performances vis-à-vis du temps de calcul de l'algorithme de recherche du point de puissance maximale de l'onduleur (MPPT). Jusqu'à présent, l'hypothèse a été considérée d'un algorithme MPPT de l'onduleur suffisamment rapide par rapport aux constantes de temps associées au déplacement du tracker. Cependant, comme l'expose (Didier.V, 2007) dans son état de l'art sur les performances des onduleurs pour système photovoltaïques, le temps de réponse des onduleurs industriels pour la recherche de la nouvelle puissance maximale lors d'une variation d'ensoleillement varie entre 10 secondes et quelques minutes. Cette étude comparative a été effectuée sur des onduleurs d'industriels connus dans le domaine photovoltaïque, tels que SMA, SOLARMAX, Siemens et Kaco, pour une utilisation sur des panneaux PV classiques. Dans les travaux de (Kaito.T, 2004) (Roncero-Clemente.C, 2013), les algorithmes MPPT sont légèrement plus rapides et le temps de réponse varie entre 9s et 63s. Cependant, les algorithmes MPPT pour les modules PV proposés plus récemment dans (Beriber.D, 2013), (Liu.F, 2008) ou encore (Sahnoun.M.A, 2013), permettent d'espérer des temps de réponse bien meilleurs. En effet, pour les modules PV, ce temps de réponse varie entre 1 ms et quelques secondes ce qui devrait permettre une réponse satisfaisante à la cette problématique d'implémentation pratique de la stratégie de suivi du soleil basée l'évaluation du gradient de puissance.

Dans cette optique, nous présentons dans le chapitre suivant une étude sur les commandes MPPT utilisées dans le cas de modules PV. Ce travail a pour objectif de donner les ordres de grandeur de temps de réponse qu'il est possible d'atteindre pour les algorithmes classique. Nous proposons aussi une approche permettant d'améliorer la rapidité et la précision d'un algorithme MPPT.

Un autre point d'amélioration pour la stratégie proposée est la consommation des actionneurs. En effet, cette stratégie basée sur une recherche en permanence de la puissance maximale peut consommer plus d'énergie que la stratégie de référence. Cette hausse potentielle de l'énergie consommée n'est pas forcément significative par rapport à l'énergie produite, mais l'échauffement supplémentaire des actionneurs auquel elle peut conduire pourrait nécessiter un dimensionnement différent des moteurs et avoir ainsi un impact négatif sur le coût des installations.

---

# Chapitre IV

## Etude des algorithmes de recherche du point de puissance maximale d'un module PV

---

### IV.1. Introduction

L'objectif de l'étude proposée dans ce chapitre est de proposer des pistes de solution à la problématique liée au temps de réponse des algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) des onduleurs connectés aux modules HCPV et son impact pressenti sur l'efficacité de la stratégie de génération de trajectoire basée sur la méthode du gradient, proposée dans le chapitre précédent. Pour des raisons liées à des disponibilités matérielles, cette étude sur les algorithmes MPPT a été effectuée sur les modules photovoltaïques (PV). Les temps de réponse de ces algorithmes constatés avec des onduleurs industriels pour PV varient entre 10s et quelques minutes (Didier.V, 2007) (Kaito.T, 2004) (Roncero-Clemente.C, 2013). La présente étude a donc pour objectif de proposer des algorithmes MPPT avec un temps de réponse suffisamment faible pour ne pas affecter la qualité de l'évaluation du gradient et donc la recherche de maximum de puissance du module en fonction de la position du tracker.

Généralement, les travaux de recherche sur les commandes MPPT visent à augmenter la précision de la recherche du point de puissance maximale PPM (version française de MPP), en éliminant les oscillations autour de ce point. La rapidité de la commande reste secondaire car la dynamique de variation de l'ensoleillement et de la température, engendrant une variation du PPM, est lente. Dans ce cadre, nous proposons une commande MPPT qui assure un compromis entre précision et complexité de l'algorithme, et qui met en évidence aussi la rapidité de la recherche qui est, pour nous, un critère important.

Afin d'évaluer les performances des commandes MPPT proposées et de pouvoir les comparer, nous avons développé un modèle de simulation d'un panneau photovoltaïque classique. La première partie de ce chapitre sera consacrée à la modélisation, la simulation et la validation expérimentale. Dans la deuxième partie, un état de l'art sur les différentes commandes MPPT est présenté. Nous proposons ensuite une commande MPPT basée sur la

commande la plus classique et utilisée, dite P&O (Perturb and Observe), améliorée par un réseau de neurones artificiels à complexité réduite. Les performances en termes de rapidité de précision de cette nouvelle approche seront comparées à ceux de trois autres commandes P&O. Cette comparaison est suivie d'une conclusion sur les temps de réponse qu'il est possible d'atteindre et, en faisant l'hypothèse que ces résultats sont transposables au cas de modules HCPV, leur conséquence sur l'application de la stratégie de génération de trajectoire d'un tracker HCPV basée sur la méthode du gradient.

## IV.2. Modélisation d'un module PV

Un état de l'art sur la modélisation de panneaux photovoltaïques a été mené afin de sélectionner un modèle assurant un compromis entre simplicité du développement et précision.

### IV.2.1. Etat de l'art des modèles de panneaux PV

Les panneaux photovoltaïques sont constitués de plusieurs cellules photovoltaïques reliées en série et en parallèle. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basé sur une jonction N-P, ce qui justifie la modélisation basée sur un circuit électrique équivalent à une ou plusieurs diodes. Bien qu'il existe d'autres modèles pour estimer la production d'un module photovoltaïque classique comme le modèle à triples diodes (Sakurada.Y, 2011), les deux modèles les plus répandus sont le modèle à une seule diode et celui à double diodes car ils correspondent à un meilleur compromis entre précision et simplicité.

#### Modèle d'un panneau photovoltaïque à une seule diode :

Plusieurs travaux, dans la littérature, ont été menés sur le modèle à une seule diode (Rodrigues.E.M.G, 2011), (Hchan.D.S, 1987), (Villalva.M.G, 2009) et plusieurs auteurs l'ont utilisé pour différents objectifs, uniquement pour la simplicité de ce type de modélisation de panneaux photovoltaïques. En effet, ce modèle propose une seule diode mise en parallèle avec une source de courant proportionnelle au rayonnement solaire, comme le met en évidence le schéma équivalent de la cellule idéale (Figure 88).

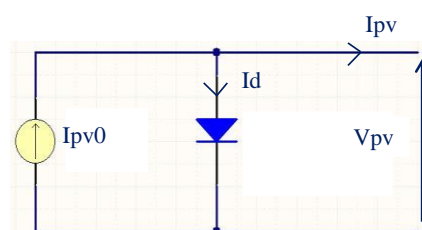


Figure 88- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode

Pour une modélisation plus réelle de la cellule photovoltaïque, il faut ajouter une résistance série de très faible valeur qui représente l'ensemble des contacts ohmiques et une résistance parallèle de valeur très importante représentant les fuites de courant (Villalva.M.G,

2009). Ce modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque plus réelle est représenté par le schéma de la Figure 89.

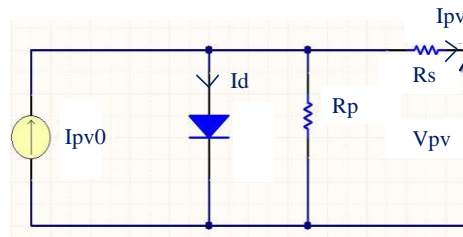


Figure 89- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode

Le modèle à une diode est simple à mettre en place car il ne présente pas beaucoup de paramètres à identifier expérimentalement. C'est l'une des raisons pour lesquelles il est le plus utilisé.

### **Modèle à double-diode :**

Dans la littérature un autre type de modélisation d'un panneau photovoltaïque apparaît tel que proposé par (Notton.G, 2010). Ce modèle est basé sur une source de courant et deux diodes en parallèle (Figure 90).

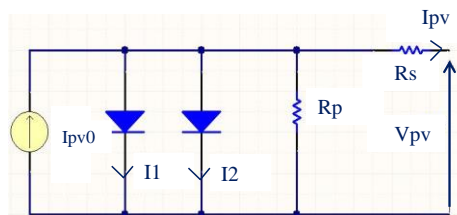


Figure 90- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à double-diode

Ce modèle est connu pour être plus précis que celui avec une seule diode, en revanche il est plus complexe en raison d'un nombre plus important de paramètres à identifier. Dans cette optique, d'autres modèles sont proposés assurant plus de précision, tels que (Sakurada.Y, 2011), (AlRashidi.M. R, 2013) ou encore (Junsangsri.P, 2010). Néanmoins, le degré de précision souhaité change d'une application à une autre.

Etant donné la difficulté de réaliser beaucoup d'expérimentations permettant d'identifier tous les paramètres d'un modèle à deux diodes, le choix s'est porté sur le modèle à une seule diode qui assure un compromis entre simplicité et précision comme le met en évidence la comparaison exposée dans (Khezzar.R, 2010). Le modèle reste suffisamment précis pour assurer l'objectif du modèle de simulation, qui est l'évaluation des algorithmes de recherche de la puissance maximale du panneau photovoltaïque.

#### IV.2.2. Modélisation et simulation d'un module PV

Le modèle à une seule diode est basé sur le circuit électrique de la Figure 89. A partir de ce schéma équivalent, l'équation (36) est élaborée. Elle décrit la cellule photovoltaïque et permet de tracer la caractéristique du courant en fonction de la tension  $I_{pv}(V_{pv})$ :

$$I_{pv} = I_{pv0} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (36)$$

$R_p$ ,  $R_s$ ,  $I_0$ ,  $I_{pv0}$ ,  $V_t$  e  $a$  sont respectivement la résistance parallèle du module PV, la résistance série, le courant de saturation, le photo courant créé par le rayonnement solaire, le potentiel thermique et le facteur d'idéalité de la diode.

Nous pouvons aussi déterminer la tension de la cellule photovoltaïque à partir du courant :

$$V_{pv} = R_p (I_{pv} - I_d - I_{pv0}) - R_s I_{pv} \quad (37)$$

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{N_s K T}\right) - 1 \right] \quad (38)$$

$$I_0 = \left[ \frac{I_{scn} + K_i \Delta T}{\exp((V_{scn} + K_v \Delta T) / a V_t)} \right] \quad (39)$$

Le photo-courant dépend linéairement de l'ensoleillement global  $G$  et de la température  $T$ , comme le met en évidence l'équation (40):

$$I_{pv0} = (I_{pvn} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (40)$$

$$V_t = \frac{N_s K T}{q} \quad (41)$$

$N_s$ ,  $K$  et  $q$  sont respectivement le nombre de cellules en série du module PV, la constante de Boltzmann et la charge de l'électron.

Le modèle de simulation du module PV, développé sous Matlab/Simulink® est présenté en annexe 7. La première simulation a été effectuée avec les paramètres du document constructeur du panneau photovoltaïque. Les caractéristiques de ce module sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 6 Caractéristique du module Sharp série NU48 sous les conditions standards (1000W/m2 et 25°C)

Puissance maximale	180	W
Tension à vide	30	V
Courant de court-circuit	8.37	A
Tension au point de puissance maximale	23.7	V
Courant au point de puissance maximale	7.6	A
Coefficient de température-tension à vide	-104	mV/°C
Coefficient de température-courant de court-circuit	0.0053	%/°C
Nombre de cellules en série	48	

L'objectif de cette simulation est de visualiser les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  en faisant varier la valeur du courant et en calculant la valeur de la tension puis la puissance. Ces caractéristiques, Figure 91, sont tracées pour un ensoleillement global et une température fixés respectivement à 1000 W/m<sup>2</sup> et 25°C, qui représentent les valeurs des conditions standards de tests.

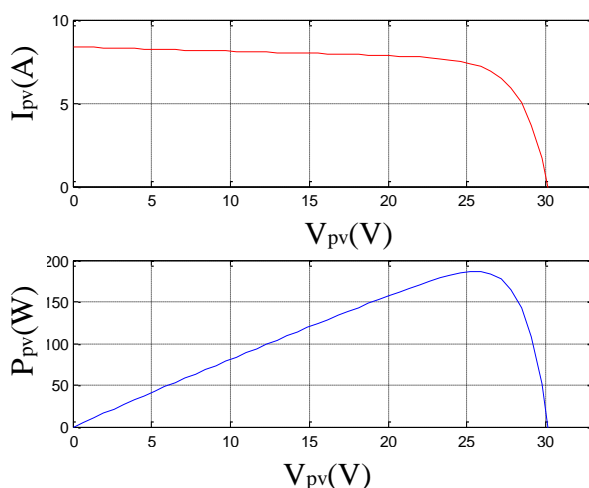


Figure 91- Caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  simulées SF125x125-72-M(L) avec un ensoleillement de 1000W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C pour un panneau

#### IV.2.3. Validation expérimentale du modèle

Le modèle mathématique établi est validé par des mesures expérimentales prises sur le panneau photovoltaïque Sharp série NU48. Les mesures de courant  $I_{pv}$  et de la tension  $V_{pv}$  ont été prises pour une température de 21.5° et un ensoleillement global de 301W/m<sup>2</sup>. Le dispositif expérimental est présenté en détails en annexe 8. La simulation des caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  est ensuite conduite pour les mêmes conditions atmosphériques de température et d'ensoleillement afin de pouvoir comparer les valeurs de la puissance, du courant et de la tension maximale de la courbe simulée (Figure 92) et avec les caractéristiques tracés expérimentalement (Figure 93).

Dans un premier temps nous avons pu constater que les caractéristiques simulées et expérimentales sont semblables, avec une puissance maximale proche de 45W, un courant de



court-circuit proche de 2.5A et une tension à vide proche de 27V. De même, les valeurs de la tension et du courant optimale expérimentales et simulées diffèrent peu :

- Expérimentation :  $I_{mpp} = 1.95A$  et  $V_{mpp} = 23V$
- Simulation :  $I_{mpp} = 1.91A$  et  $V_{mpp} = 23.3V$

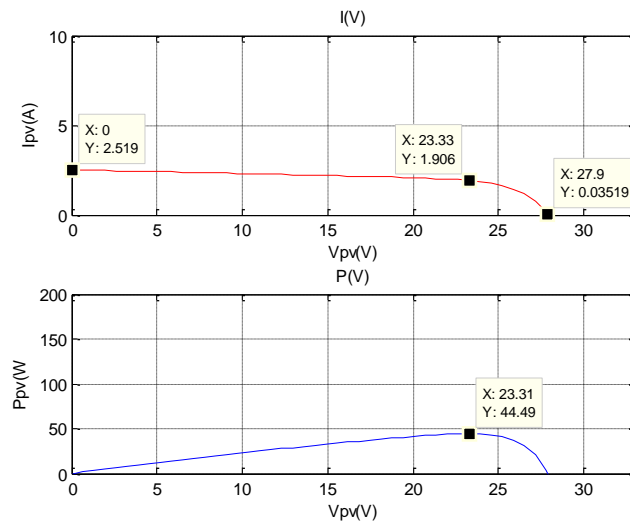


Figure 92- Caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  simulées avec un ensoleillement de 301W/m2 et une température de 21.5°C

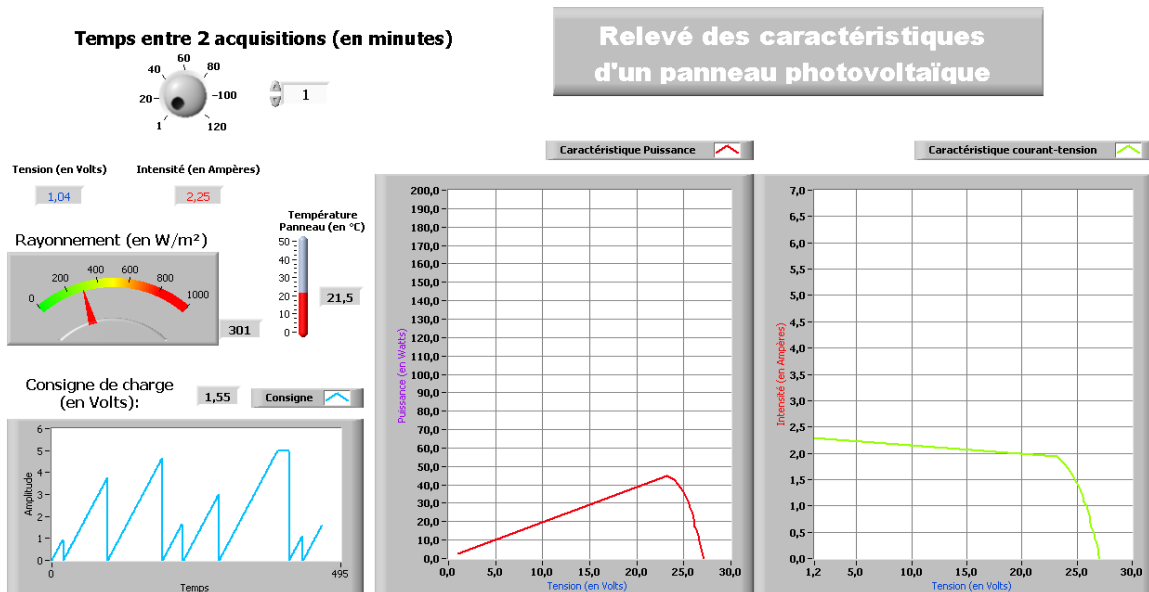


Figure 93- Relevé des caractéristiques expérimentales  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  du panneau (Labview) (301W/m2, 21.5°C)

Afin de valider le modèle simulé une comparaison a été menée entre les caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  expérimentales et simulées sous Matlab. D'après la Figure 94, les courbes sont semblables. En outre, l'erreur moyenne MBE est égale à 0.23 pour le courant du panneau photovoltaïque.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} \quad (42)$$

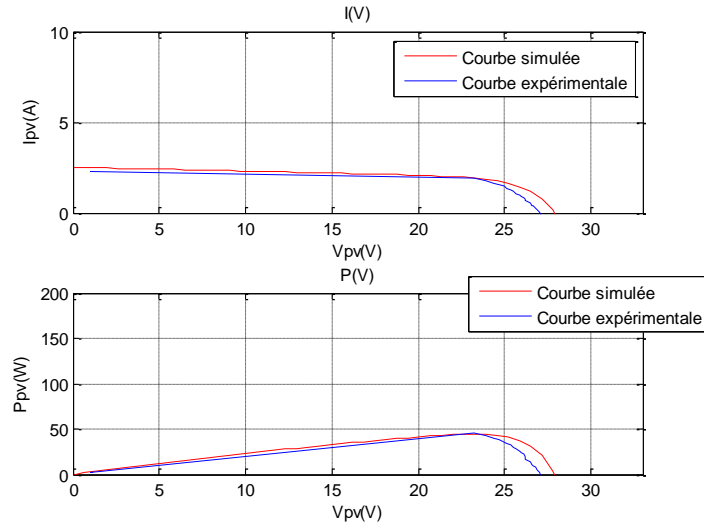


Figure 94- Caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  expérimentales et simulées (301W/m2, 21.5°C)

L'objectif de la simulation étant d'avoir un support pour les comparaisons de performances des algorithmes MPPT, la précision de la caractéristique n'est pas très importante et celle présentée dans ce travail est donc suffisante. C'est d'ailleurs ce qui nous permet de travailler sur un PV classique plutôt que HCPV qui nous intéresse réellement.

### IV.3. Commandes MPPT

Une commande MPPT est une commande qui permet de suivre le point de puissance maximale d'un module photovoltaïque en faisant fonctionner le module PV dans son point de fonctionnement optimal, quelles que soient les conditions atmosphériques (température et ensoleillement global) et la valeur de la charge (Kassmi.K, 2007).

La Figure 95, illustre l'évolution du point de puissance maximale de la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  suite à des variations au niveau de la charge ou au niveau de la puissance d'irradiation solaire. Cela éloigne le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque du point de puissance maximale (PPM). Le rôle de la commande MPPT est donc, d'agir sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC afin de rejoindre le nouveau PPM.

Les commandes MPPT sont basées sur un algorithme de contrôle adaptatif permettant de maintenir le système à son point de puissance maximale (PPM). Le principe de la commande (Figure 96) consiste, en premier lieu, à mesurer le courant du panneau photovoltaïque  $I_{pv}$  et sa tension  $V_{pv}$  à un instant  $t_i$  pour en déduire la puissance, la stocker en mémoire puis la comparer à une puissance calculée à  $t_{i-1}$ . Cette comparaison permet d'évaluer la variation de la puissance par rapport à  $\alpha$  ( $\frac{\Delta P}{\Delta \alpha} = \frac{P_i - P_{i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}}$ ), le rapport cyclique du

convertisseur DC/DC, et ainsi en déduire l'action nécessaire sur  $\alpha$  pour obtenir une variation positive de la puissance sur l'itération suivante.

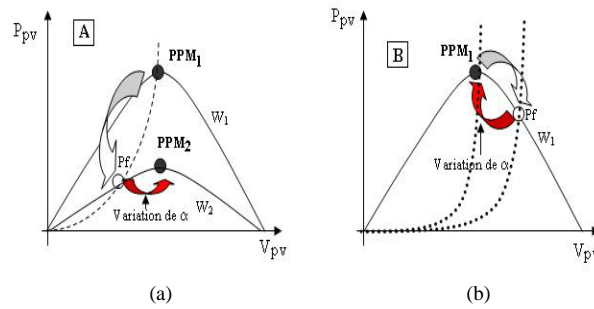


Figure 95- Variation du point de puissance maximale en fonction de l'insolation (a) et de la charge (b) (Kassmi.K, 2007)

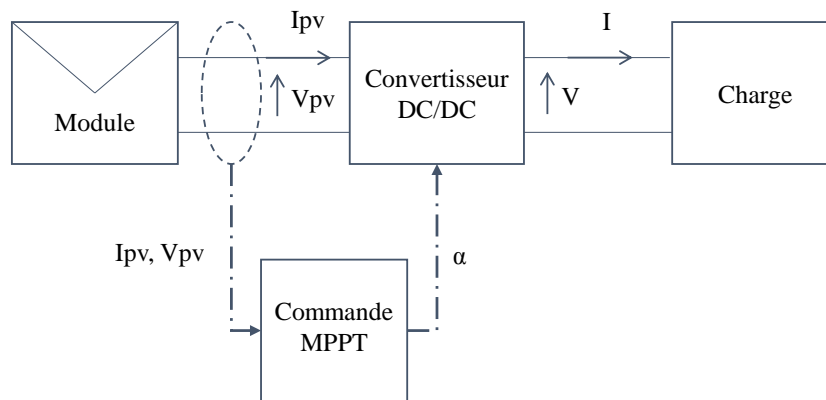


Figure 96- Principe de la commande MPPT

### IV.3.1. Etat de l'art des commandes MPPT

Une synthèse bibliographique est proposée dans ce paragraphe visant à décrire les différentes approches de commande MPPT apparues dans littérature. L'objectif de l'étude est de cibler une approche qui permette d'assurer un compromis entre précision, rapidité et complexité.

#### IV.3.1.1. Commande Perturb & Observe (P&O)

Comme le met en évidence l'algorithme présenté dans la Figure 97 la commande perturbation et observation (P&O) consiste à introduire une perturbation en faisant varier la tension  $V_{pv}$  par une valeur constante  $\Delta V$ , appelée valeur d'incrément ou valeur de perturbation (Cabal.C, 2008), et à observer le comportement de la variation de la puissance  $P_{pv}$  qui en découle. A partir de l'évaluation de la variation de la puissance le point de fonctionnement peut être situé par rapport au point de puissance maximale (Figure 98).

La commande P&O est l'une des commandes les plus traitées dans les travaux de recherche (Wasynczuk.O, 1983), (Femia.N, 2005), (Cabal.C, 2008) et l'une des plus répandues dans l'industrie. En effet, elle est facile à implémenter expérimentalement et elle

n'est pas coûteuse en mémoire et en temps de calculs. Néanmoins, elle est aussi l'une des commandes les moins précises car elle génère de fortes oscillations autour du point de puissance maximale en raison de la méthode mise en œuvre pour poursuivre en permanence le PPM. En effet, la rapidité et la précision de cette commande dépendent du choix de la valeur de perturbation  $\Delta V$ .

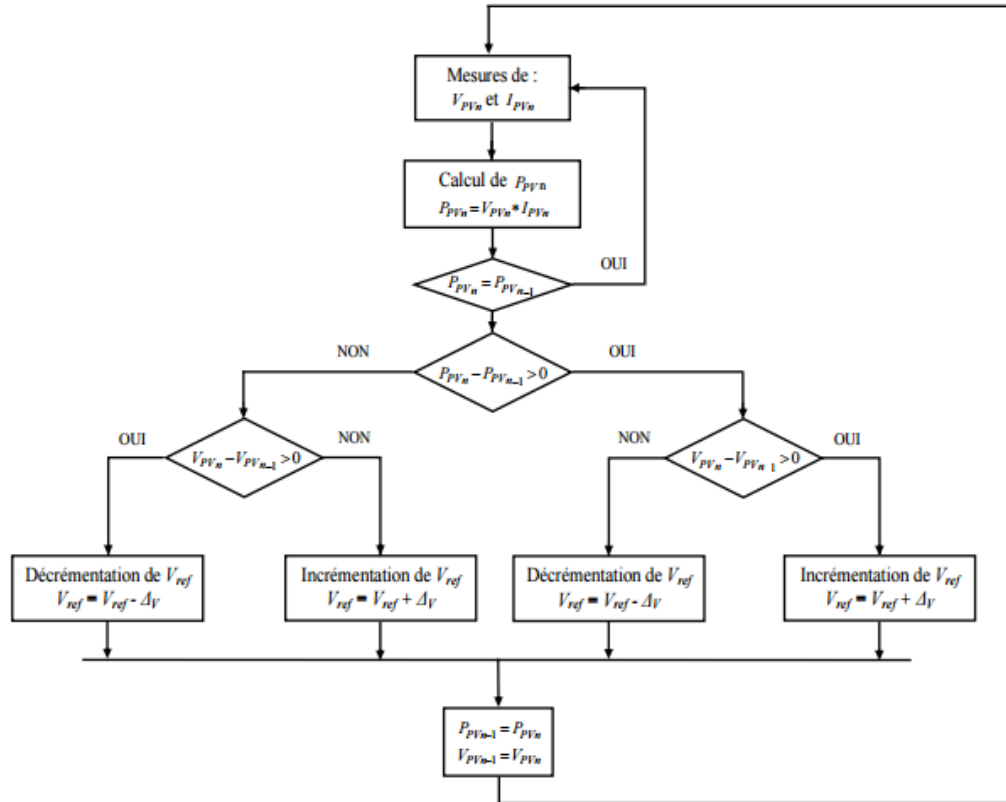


Figure 97- Algorithme de la commande P&O (Cabal.C, 2008)

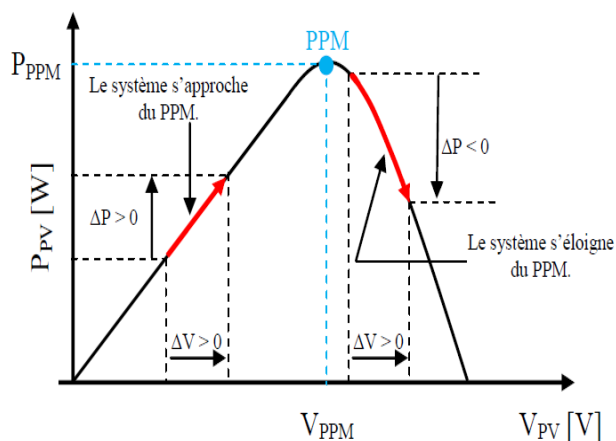


Figure 98- Caractéristique de puissance d'un panneau photovoltaïque (Cabal.C, 2008)

### IV.3.1.2. Commande MPPT incrémentale

Cette commande inspirée de la méthode de la conduction incrémentale, qui apparaît dans plusieurs travaux (Boitier.V, 2008) , (Lokanadham.M, 2012), (Selvan.D, 2013), est basée sur l'équation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (43)$$

D'après l'équation (43), l'évolution de la variation de puissance pour déterminer la direction du PPM (point de puissance maximale) est remplacée par une évaluation de la variation de conductance  $\frac{dI}{dV}$ . Le sens de la recherche du PPM est défini sur la base d'une comparaison entre  $\frac{dI}{dV}$  et  $-\frac{I}{V}$ .

Les performances de la commande MPPT incrémentale, telles que présentées dans la littérature, sont proches de celles de la commande P&O. Néanmoins, elle est moins rapide en raison d'un algorithme plus complexe.

### IV.3.1.3. Commandes basées sur les relations de proportionnalité

Ce type de commandes apparu dans (Cabal.C, 2008) et (Boitier.V, 2008) est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux ( $V_{mpp}$  et  $I_{mpp}$ ) et les paramètres caractéristiques du module PV que sont la tension à vide et le courant de court-circuit du panneau ( $V_{oc}$  et  $I_{cc}$ ).

La première relation donnant un lien entre la tension à vide  $V_{oc}$  et la tension optimale est présentée par l'équation suivante :

$$V_{opt} \approx K_1 V_{oc}, K_1 < 1 \quad (44)$$

A partir de cette équation, la tension de référence optimale peut être déterminée suite à une mesure de tension à vide et le panneau peut être contrôlé par un asservissement de tension (Figure 99), par exemple à l'aide d'un régulateur PI.

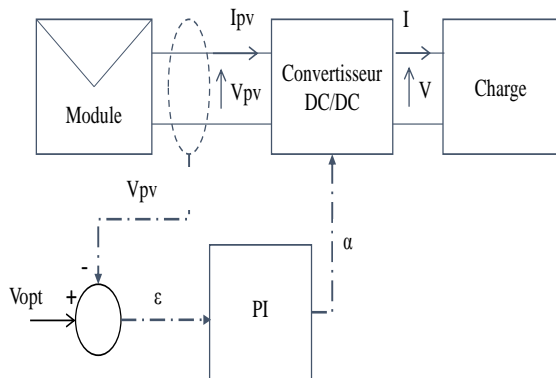


Figure 99- Asservissement de tension

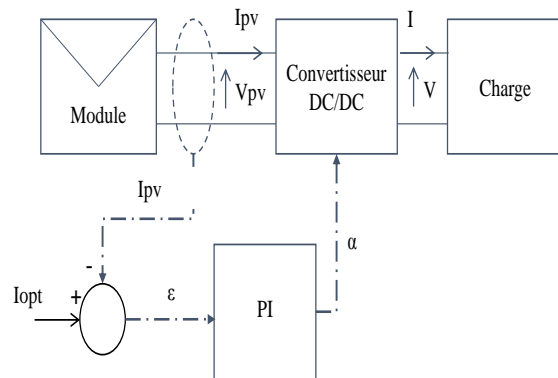


Figure 100- Asservissement de courant

De même, l'équation (45) établit un lien entre le courant de court-circuit, mesuré à la mise en court-circuit du PV, et le courant optimal et permet ainsi d'envisager un asservissement de courant, tel que présenté en Figure 100.

$$I_{opt} \approx K_2 I_{cc}, K_2 < 1 \quad (45)$$

D'après (Cabal.C, 2008), les valeurs  $K_1$  et  $K_2$  dépendent du panneau photovoltaïque et sont comprises respectivement entre 0.71 et 0.78 et 0.78 et 0.91.

Les deux commandes MPPT présentées, ci-dessus, sont faciles à mettre en place expérimentalement puisqu'elles ne nécessitent qu'un seul capteur. Elles sont donc moins coûteuses que la commande P&O et la commande incrémentale. Néanmoins, d'un point de vue précision elles sont aussi peu performantes que la commande P&O en raison de l'estimation des paramètres  $V_{oc}$  et  $I_{cc}$  et de la difficulté d'interrompre la conversion pour prendre des mesures de  $V_{oc}$  et  $I_{cc}$  trop souvent (Cabal.C, 2008). D'après l'auteur l'algorithme de ces commandes est moins rapide que celui de la commande P&O.

**IV.3.1.4. Commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue et les réseaux de neurones artificiels**

Les commandes MPPT floues proposées dans plusieurs travaux (Cheikh, 2007), (Hatti.M, 2008), (Bernard.C, 2009) et (Chekireda.F, 2011) sont basées, comme tout contrôle flou, sur les trois étapes suivantes : la fuzzification, le raisonnement flou et la défuzzification.

La première étape, avant d'entamer ces trois grandes parties, est de choisir les variables d'entrées et de sorties du bloc de commande. Dans la plupart des travaux sur les commandes MPPT floues apparus dans la littérature, les variables d'entrées sont l'erreur  $E$  de  $\frac{dP}{dV}$  et la variation de cet erreur  $\Delta E$ . La variable de sortie n'est autre que la variation du rapport cyclique du convertisseur comme l'expliquent (Bernard.C, 2009) et (Chekireda.F, 2011). Les trois étapes de la construction d'une commande MPPT floue sont présentées et expliquées dans (Timothy, 2004). La Figure 101 illustre un exemple d'une telle commande :

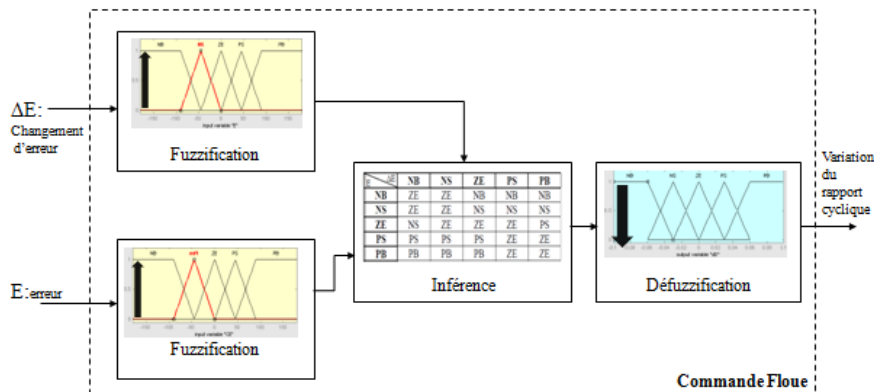


Figure 101- Exemple de commande MPPT floue

Comme toute commande MPPT, les commandes basées sur des réseaux de neurones artificiels permettent de trouver un rapport cyclique (variable de sortie) adéquat, pour garantir un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque (Habibi.M, 2009). Comme l'illustre la Figure 102, le rapport cyclique adéquat est calculé à l'aide d'un réseau de neurones, après apprentissage supervisé et en fonction des entrées  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$ .

La construction d'une commande MPPT neuronale comporte les étapes suivantes :

- Définition des variables d'entrées et de sorties du réseau de neurones ;
- Choix de la structure du modèle, de l'architecture du réseau :
  - Le nombre de couches cachées ;
  - Le nombre de neurones dans chaque couche ;
  - L'architecture du réseau (multicouche, multi perceptrons) ;
  - La définition de la fonction d'activation de chaque neurone (fonction seuil, fonction sigmoïde, ...)
- Apprentissage par un algorithme qui consiste à modifier les paramètres du réseau (les poids des arcs) en réaction une base de données d'entraînement.

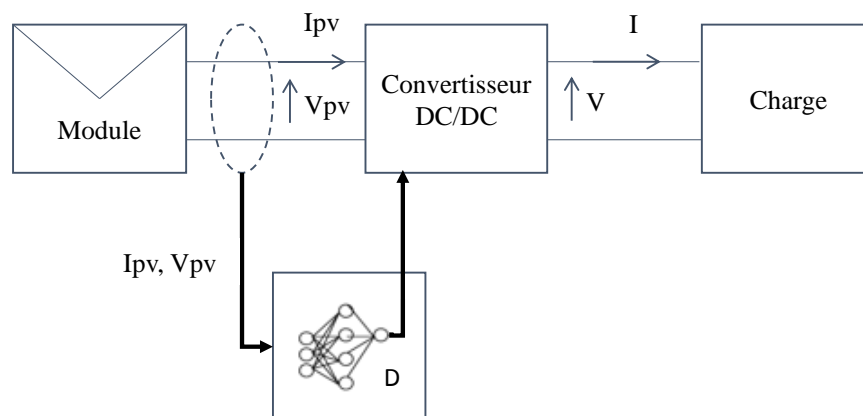


Figure 102- Convertisseur DC/DC contrôlé par une commande MPPT neuronale

Les commandes basées sur des approches de logique floue et de réseaux de neurones sont de plus en plus utilisées pour les systèmes présentant des non linéarités. Dans le contexte des commandes MPPT, ces techniques permettent d'apporter plus de précision et d'éliminer les oscillations autour du point de puissance maximale. Néanmoins, ces types de commandes sont assez complexes et nécessitent des microcontrôleurs assez performants en termes de temps de calcul et de mémoire. En effet, la précision de la commande floue dépend de la taille de la table de vérité utilisée. Un des inconvénients majeurs des commandes neuronales est qu'elles nécessitent un nombre important de mesures expérimentales pour l'apprentissage.

#### IV.3.2. Proposition de commandes MPPT P&O améliorées

La synthèse bibliographique nous a permis de comparer les performances de chacune des commandes MPPT. En effet, la commande P&O est la plus intéressante car elle assure un compromis entre la simplicité de la mise en place expérimentale et la rapidité et la simplicité de l'algorithme. La commande MPPT P&O classique, comme présentée dans le paragraphe

précédent, consiste à provoquer une perturbation de la tension par un paramètre  $\Delta V$  et observer le comportement de la variation de la puissance du panneau photovoltaïque. Une grande valeur de  $\Delta V$ , améliore la rapidité mais augmente les oscillations autour du point de puissance maximale. En revanche une petite valeur de  $\Delta V$  diminue les oscillations mais affaiblie le temps de réponse de la commande. Le choix de  $\Delta V$  doit donc assurer un compromis entre précision et rapidité de la commande.

L'objectif étant d'améliorer la précision de la commande en réduisant les oscillations autour du point de puissance maximale, la solution proposée dans cette étude consiste à faire varier la valeur de  $\Delta V$ , qui est définie comme constante dans la commande P&O classique (Figure 97).

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes pour améliorer la recherche du point de puissance maximale. (Femia.N, 2005) propose par exemple une optimisation de la commande MPPT P&O basée sur un choix optimal des paramètres par rapport au comportement dynamique du système (PV+ convertisseur DC/DC). Un algorithme qui peut servir à l'amélioration de la commande P&O par variation du gain, issu de la littérature, a été choisi dans ce travail comme point de comparaison avec les algorithmes proposés et la commande P&O classique. Le choix de l'algorithme « Search then convergence » est justifié par la simplicité de son implémentation car notre objectif de départ était de tester la rapidité des algorithmes MPPT et d'avoir un ordre de grandeur du temps de réponse de ces algorithmes.

L'algorithme « Search then convergence », proposé par (Cichocki.A, 1993), est basé sur la fonction suivante :

$$\Delta V_{k+1} = \frac{\Delta V_k}{1 + \left(\frac{k}{K_0}\right)} \quad (46)$$

Avec  $K_0 = \frac{100}{3}$

La valeur  $K_0$  est choisie de manière empirique. Cet algorithme permet donc de trouver la puissance maximale du module photovoltaïque avec un gain  $\Delta V$  qui diminue dans le temps.

Le premier algorithme proposé est inspiré de l'algorithme « Search then convergence », mais utilise une relation simplifiée (47) pour diminuer la valeur  $\Delta V$ .

$$\Delta V_{k+1} = \Delta V_k - [(\Delta V_k)X_0] \quad (47)$$

$X_0 = 0.10$  ;

La synthèse bibliographique a mis en évidence l'impact de la technique basée sur des réseaux de neurones artificiels sur l'amélioration de la précision (diminution des oscillations) de la commande MPPT. Néanmoins, cette technique présente un algorithme assez complexe. Sur la base des conclusions tirées de la synthèse bibliographique, un algorithme d'amélioration de la commande MPPT P&O classique par un réseau de neurones à complexité



réduite est proposé dans cette étude. Ce réseau de neurones est utilisé pour estimer et faire varier le paramètre  $\Delta V$ , initialement constant dans la commande P&O, afin de réduire les oscillations autour du point de puissance maximale. Comme l'illustre la Figure 103, l'algorithme prend en compte la variation de la puissance, du courant et de la tension du module photovoltaïque pour déterminer la variable  $\Delta V$  qui donne la puissance maximale. Cette variable est calculée grâce à un algorithme d'apprentissage et aux changements du poids des neurones.

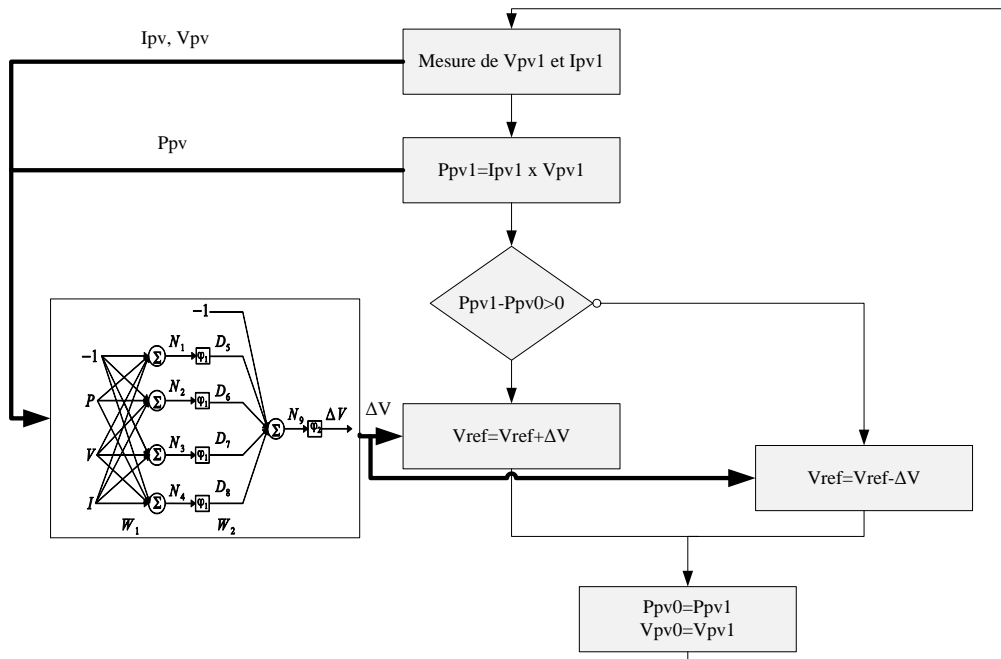


Figure 103- Principe de la commande P&O optimisée avec un réseau de neurones

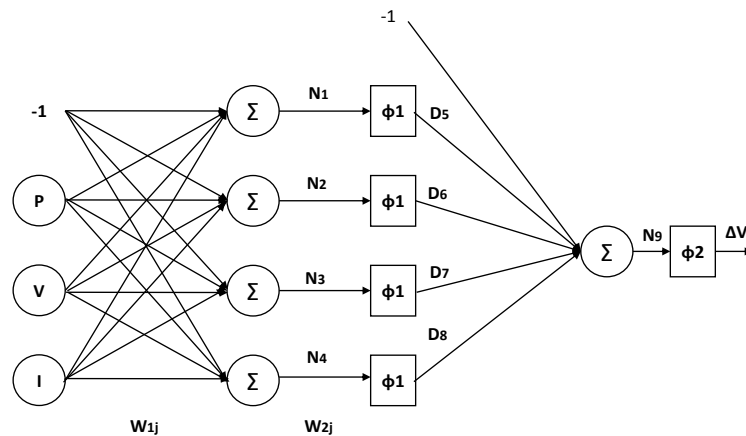


Figure 104- Architecture à complexité réduite du réseau de neurones

La procédure de réduction de la complexité du réseau de neurones, expliquée en détail dans (Romero-Ugalde.H.M, 2013), consiste à construire le réseau de neurones sous deux hypothèses de conception. La première concerne le choix des fonctions d'activation des couches du réseau : au moins une couche du réseau doit avoir toutes ses fonctions d'activation choisies comme fonctions linéaires ( $\Phi_1$  ou  $\Phi_2$ ). La seconde hypothèse consiste à choisir le

même état initial des poids synaptiques ( $W_{1j}$  et  $W_{2j}$ ) pour chaque groupe de neurones (équation (49)).

$$\Phi_1(T)=T \text{ (linéaire) et } \Phi_2(T)=\text{sigmoïde}(T) \quad (48)$$

$$W_{11}(0) = W_{1j}(0) \quad (49)$$

$$W_{21}(0) = W_{2j}(0)$$

Avec  $j=1, \dots, n$ , où  $n$  est le nombre de neurones.

Le choix des conditions initiales des poids synaptiques étant différent des méthodes classiques, des expériences complètes, détaillées dans (Romero-Ugalde.H.M, 2013), mettent en évidence la validité de ce choix, sans perte significative de généralité dans les applications pratiques.

La représentation mathématique du réseau de neurones proposé est donc la suivante:

$$\Delta V = \Phi_1(N_9) = \text{sigmoid}(N_9) \quad (50)$$

$$N_9 = \sum_{j=1}^n W_{2j}(N_j) + \theta_2 \quad (51)$$

$$N_i = \sum_{j=1}^n X.W_{1j} + \theta_1 N_9 \quad (52)$$

$$\Delta V = \text{sigmoid}(nn(W_{2j}(X.W_{1j} + \theta_1)) + \theta_2) \quad (53)$$

Dans l'équation (53), il n'est pas nécessaire d'entraîner les poids synaptiques  $W_{1j}$  et  $W_{2j}$  ( $nn$ ) fois, car les valeurs finales sont égales, groupe par groupe. En ce sens, le coût de calcul nécessaire pour entraîner le réseau neuronal complet (plus complexe) est réduit, en gardant la même précision.

#### IV.3.3. Etude comparative de 4 commandes MPPT

Pour la validation de cette commande MPPT P&O améliorée par réseau de neurones les simulations ont été effectuées, sur le modèle de simulation développé sous Matlab/Simulink® (Annexe 7). Les conditions de température et d'ensoleillement global constantes sont fixées respectivement à 25 ° C et 1000 W/m<sup>2</sup> pour cette simulation.

L'objectif de ces simulations est de visualiser l'évolution de la puissance du module photovoltaïque pour quatre différentes commandes MPPT basées sur l'algorithme P&O afin de pouvoir évaluer et comparer leurs performances respectives. L'évolution de la variable de perturbation de la tension  $\Delta V$  est tracée pour chaque algorithme.

Le résultat de simulation, Figure 105, met en évidence les fortes oscillations autour du PPM pour le cas de la commande P&O classique. Ces oscillations sont expliquées par l'évaluation de la valeur  $\Delta V$ . Cependant, les trois commandes P&O améliorées sont capables de réduire les oscillations autour du PPM. La commande P&O améliorée par un simple algorithme linéaire présente de forts dépassements en régime transitoire ce qui peut causer des pertes avant d'atteindre la puissance maximale. En se basant sur le nombre d'itérations, la commande P&O neuronale n'est pas la plus rapide en revanche elle est la plus précise car elle présente la meilleur minimisation des oscillations comme l'illustre la Figure 106.

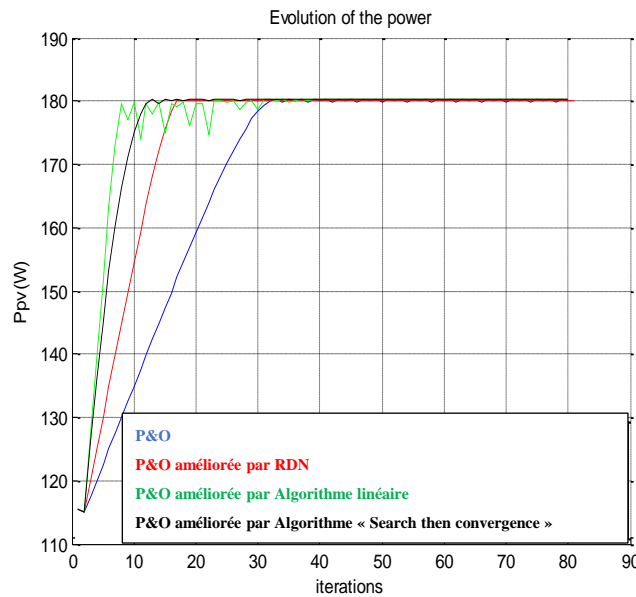


Figure 105- Evolution de la puissance  $P_{pv}$  des 4 algorithmes P&O étudiés

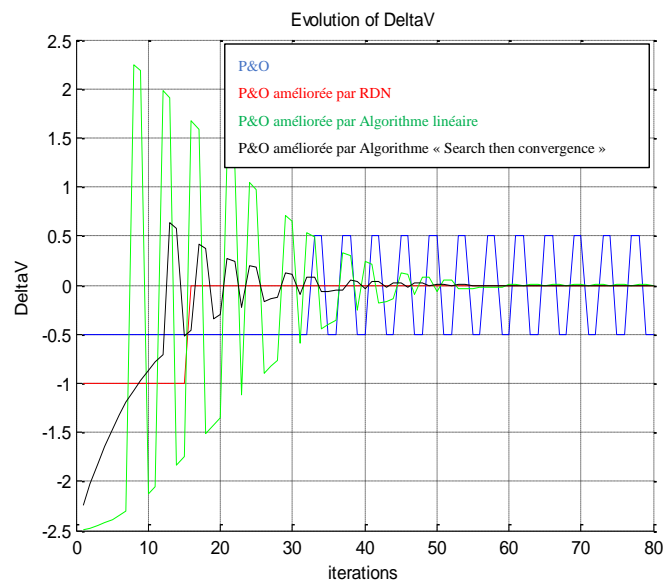


Figure 106- Evolution de la variable de perturbation de la tension  $\Delta V$  des 4 algorithmes P&O traitées dans cette étude

La commande MPPT proposée dans ce travail est aussi testée et validée sous des conditions de variation d'ensoleillement global. La commande proposée permet de trouver le nouveau point de puissance maximale à chaque variation de l'ensoleillement en assurant une convergence plus rapide et moins d'oscillations que la commande P&O classique (Figure 107).

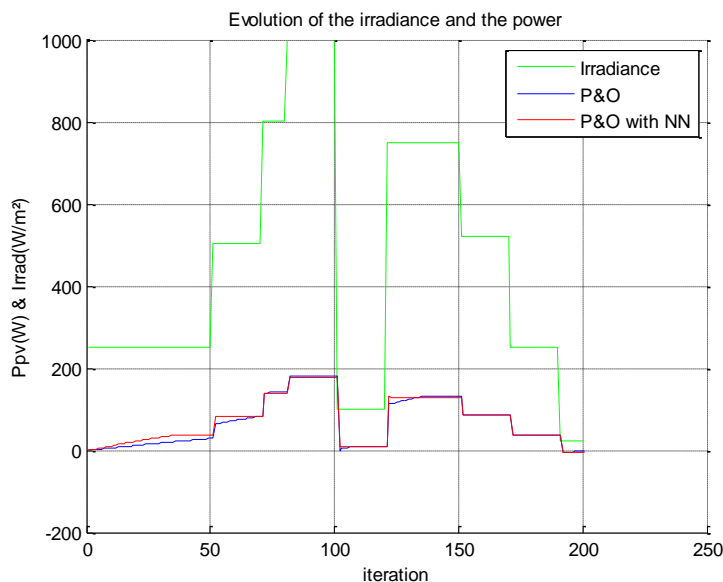


Figure 107- Evolution de l'ensoleillement global et de la puissance  $P_{pv}$  pour la commande P&O classique et la commande P&O améliorée avec un algorithme de réseau de neurones

Le nombre d'itérations de l'algorithme n'est pas très représentatif et ne permet pas de comparer les commandes en termes de rapidité. Le temps de réponse des différents algorithmes MPPT, qui est le temps que nécessite le système PV pour atteindre sa puissance maximale, suite à une variation de l'ensoleillement, doit donc être estimé sur la base du nombre d'instructions par itération et du nombre d'itérations pour un microcontrôleur donné. Le nombre d'instructions peut être traduit en temps d'exécution (seconde). Une telle estimation permet de comparer les différentes commandes et d'avoir un ordre de grandeur du temps de réponse.

Une estimation est proposée dans cette étude, sur la base d'une description à haut niveau et d'une décomposition en morceaux de chacun des algorithmes. Les étapes de calculs qui figurent dans les quatre algorithmes sont décrites comme suit:

- Acquisition des données analogiques : l'acquisition des deux entrées analogiques courant et tension du panneau photovoltaïque est nécessaire. Le temps de calcul considéré dans cette partie est le temps de la conversion analogique numérique.
- Calcul de puissance : Dans cette partie les deux puissances du panneau, avant et après perturbation, sont calculées et le signe de la comparaison est déterminé. Pour cette opération, le temps de calcul dépend de la taille des données numériques manipulées (en général, 8 ou 16 bits).
- Etape spécifique à chaque algorithme.

- Perturbation de la tension : Dans cette étape, la nouvelle tension est calculée à partir d'une incrémentation ou décrémentation par  $\Delta V$ .

Dans un second temps, le nombre d'instructions est traduit en temps de cycle sur la base d'une étude proposée dans (Learetta.A.B., 2006). La fréquence du microcontrôleur utilisé dans cette étude est de 20Mhz. Le temps d'exécution d'une instruction est donc estimé à 0.2 $\mu$ s. L'acquisition de la tension et du courant sont estimées à 62.6 $\mu$ s (124.4 $\mu$ s pour les 2) et la multiplication de deux mots de 16 bits est estimée à 5.6 $\mu$ s. Le Tableau 7 présente le nombre d'itérations et le temps de réponse de chacun des quatre algorithmes proposés.

Tableau 7 Estimation du temps de réponse des 4 algorithmes MPPT proposés dans cette étude

Algorithme	Nombre d'itérations	Durée maximum par itération	Temps de calcul
P&O	32	131.4 $\mu$ s	4.20 ms
P&O améliorée avec RDN	15	135.8 $\mu$ s	2.03 ms
P&O améliorée avec un algorithme linéaire	8	131.6 $\mu$ s	1.05 ms
P&O améliorée avec un algorithme « search then convergence »	12	131.6 $\mu$ s	1.58 ms

Les temps de calcul varient donc entre 1 et 4.2 ms, ce qui est nettement inférieur aux temps proposés par les algorithmes MPPT des onduleurs industriels actuels. Cette différence peut être justifiée par l'utilisation de microcontrôleurs moins performants dans les onduleurs industriels. De plus, en dehors de la recherche de la puissance maximale, les microcontrôleurs des onduleurs sont généralement chargés d'autres tâches telles que la gestion des erreurs et des alarmes, l'affichage en temps réel des données (puissance, énergie, ...), la transmission (liaison série) de données (courant, tension, puissances,...).

Il est à noter que l'évaluation du temps de calcul proposée ici ne comprend pas les constantes de temps physiques du module HCPV.

#### IV.4. Conclusion

L'objectif défini dans cette étude est de mettre en évidence que les algorithmes MPPT peuvent avoir des temps de réponse plus rapide que ceux proposés par les onduleurs industriels disponibles de nos jours pour les applications photovoltaïques. L'algorithme recherché doit permettre une convergence vers le PPM suffisamment rapide (quelques millisecondes) pour ne pas perturber la stratégie de génération de la trajectoire du tracker proposée dans le chapitre précédent. L'étude a été effectuée sur un module PV et a visé à la fois la rapidité, la précision et la simplicité de l'algorithme MPPT.

Afin de pouvoir évaluer les performances, notamment la rapidité, et comparer différents algorithmes MPPT, un modèle de simulation a été développé sous Matlab/Simulink®. Ce dernier est basé sur une modélisation d'un panneau photovoltaïque permettant de tracer la caractéristiques  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  pour une température et un ensoleillement global donnés. Le modèle a été validé expérimentalement.

Dans un second temps, un état de l'art sur les commandes MPPT a permis de constater que l'une des commandes les plus rapides et plus simples à implémenter est la commande dite perturb & observe (P&O). Néanmoins, cette commande présente une faible précision, en raison de fortes oscillations en lien avec le principe de la recherche du PPM. De cette analyse est née l'idée de conserver cette commande pour sa rapidité et de la coupler avec un algorithme destiné à en améliorer la précision. La commande MPPT P&O améliorée par un réseau de neurones proposée permet d'assurer un compromis entre précision et simplicité, tout en restant acceptable du point de vue temps de réponse. En effet l'algorithme de réseau de neurones a pu améliorer la précision de la commande P&O en éliminant les fortes oscillations, avec un niveau de complexité acceptable.

L'architecture du réseau de neurones proposée dans cette étude permet de réduire la complexité de l'algorithme par rapport à une structure plus classique de RDN tout en gardant la même précision de calcul. Cette réduction de la complexité de l'algorithme neuronale a permis à la commande de rester compétitive en termes de rapidité par rapport à des algorithmes très simples tels que l'algorithme « Search then convergence », l'algorithme linéaire ou encore l'algorithme de base de la commande P&O.

Quelle que soit la solution retenue, les temps de réponse estimés pour ces algorithmes varient entre 1 et 4.2 ms ce qui est satisfaisant vis-à-vis de la problématique de l'évaluation en temps réel du gradient de puissance (en fonction des positions d'azimut et d'élévation d'un tracker) évoquée au chapitre précédent. En effet, ces faibles temps de réponse laissent espérer une évaluation suffisamment rapide de la puissance, correspondant au PPM évoqué dans le présent chapitre, suite à chaque mouvement des axes du tracker pour que le gradient de puissance ainsi évalué soit entaché du moins d'erreur possible. Les performances de suivi du soleil, avec la stratégie de génération de trajectoire proposée, en dépendent, et par conséquent les performances de production électrique du tracker, également.



---

# Conclusions Générales et Perspectives

---

Dans ce mémoire de thèse une étude en simulation de la modélisation et de la commande d'un tracker photovoltaïque à haute concentration (HCPV) a été présentée. L'objectif était de proposer et de développer une stratégie de commande permettant d'améliorer les performances de la stratégie actuellement utilisée, dite de référence, et de réduire les coûts de conception et développement de la commande. Afin de valider et de tester les performances de cette stratégie de commande, un simulateur de tracker HCPV a été développé, validé et mis en œuvre.

## V.1. Synthèse des travaux réalisés

Dans un premier temps, nous avons présenté et expliqué le contexte énergétique et économique ainsi que les problématiques industrielles motivant ces travaux de recherche. Un état de l'art traitant les points les plus importants de ces problématiques a par la suite été présenté. Cette étude a visé la modélisation d'un module HCPV, les stratégies de commandes du tracker HCPV, ainsi que la modélisation complète des modules HCPV montés sur un tracker.

La synthèse bibliographique a montré certaines lacunes dans la modélisation dynamique de tracker HCPV et des modules HCPV. En effet, aucun modèle de module HCPV proposé ne tient compte de la performance de suivi du soleil pour prédire sa puissance, et aucune modélisation complète d'un tracker HCPV dans un objectif de test des stratégies de commande n'est proposée. Néanmoins, les modèles de module HCPV étudiés dans cette synthèse ont servi de base pour développer un modèle comportemental plus performant qui tienne compte à la fois des facteurs atmosphériques et de l'erreur du suivi du tracker HCPV. La deuxième conclusion tirée de cette étude est que les travaux de modélisation concernent plus les modules PV classiques montés sur tracker. Ce manque en matière de modélisation de modules HCPV montés sur tracker, tenant compte des performances du suivi du soleil, représente l'une des importantes problématiques scientifiques de cette thèse.

Concernant les stratégies de commande d'un tracker solaire, l'état de l'art a permis de mettre en évidence l'importance d'une commande hybride pour le tracker HCPV. La deuxième conclusion tirée de cette étude bibliographique concerne l'utilisation du capteur solaire très répandue dans le cas de commandes hybrides ou en boucle fermée. L'élimination du coût supplémentaire de ce capteur constitue donc un objectif supplémentaire dans ce travail de thèse.

La deuxième partie du présent rapport a été consacrée au développement d'un simulateur de tracker HCPV. Dans un premier temps, un cahier des charges et les objectifs



d'utilisation du simulateur ont été détaillés. Puis, une description de chaque bloc ou sous modèle constituant ce simulateur a été présentée. Un modèle de soleil a ensuite été proposé, permettant de générer, par calcul astronomique, la trajectoire théorique du soleil à viser par le tracker. Cette position théorique est également utilisée comme donnée d'entrée du modèle de module HCPV sur tracker, en tant que position réelle du soleil. Dans cette étude, le calcul astronomique réalisé est donc supposé exact. Le modèle permet aussi de générer les données d'ensoleillement et de température en fonction de la date, de l'heure et les coordonnées GPS du tracker considéré. Ces données sont issues de la base de données européenne de PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System).

Nous avons ensuite développé un modèle électromécanique asservi en position du tracker HCPV basé sur la modélisation d'une machine asynchrone contrôlée en boucle ouverte par un variateur de vitesse et sur un modèle rigide de la structure mécanique du tracker. Classiquement, cette modélisation dynamique est proposée dans le repère (diphase) de Park est associée, au travers d'une transformation de Park, à un modèle de variateur réalisant un contrôle scalaire.

La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à la modélisation de modules HCPV montés sur tracker, prenant en compte l'erreur du suivi du soleil, ainsi que les données d'ensoleillement et de température, dans l'estimation de la puissance maximale produite par le module HCPV associé à un onduleur réalisant la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Pour cette estimation, nous avons proposé plusieurs modèles comportementaux utilisant principalement les fonctions gaussiennes, cosinus et polynomiale ou une combinaison de ces fonctions. Les paramètres de chacun des modèles proposés ont été identifiés, à partir des données du constructeur du module HCPV. L'identification a été effectuée sur un seul axe du tracker, en faisant une hypothèse de comportement isotrope du module. La simulation de la caractéristique de puissance en fonction de l'erreur de chacun de ces modèles, sous Matlab, a permis de les évaluer et de les comparer. Cette comparaison, appuyée par une étude comparative des indicateurs d'erreurs (MSE, RMSE et Max), a montré que le modèle comportemental combiné de deux fonctions polynomiales à l'intérieur et en dehors d'un intervalle de l'angle d'acceptance du module, est le plus performant. Il a été donc retenu pour être implémenté dans le simulateur de tracker HCPV.

Dans un objectif d'identification des paramètres des modèles sur les deux axes (azimut et élévation) et d'étude de l'influence de l'ensoleillement sur la forme de la caractéristique de puissance, nous avons proposé un dispositif expérimental ainsi que des plans d'expériences. Dans l'impossibilité de réaliser l'expérimentation ainsi proposée, nous avons exploité des données partielles issues d'une expérimentation similaire. Ces premiers résultats ont permis de vérifier l'hypothèse d'isotropie du module HCPV.

Le troisième chapitre de ce mémoire a été consacré à la stratégie de génération de trajectoire du tracker HCPV. Dans un premier temps, nous avons décrit la stratégie de commande dite de référence et évalué ses performances sur le simulateur de tracker HCPV. Cette commande "hybride" est basée sur la combinaison d'un retour de l'erreur de position

obtenue par un viseur solaire et du calcul astronomique. Cette commande de référence conduit à un suivi du soleil similaire à un contrôle par mode glissant.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle approche de la génération de trajectoire du tracker, basée sur un algorithme d'optimisation du gradient. Cette approche a pour objectif de remplacer le retour d'erreur de position, fourni par le capteur solaire dans la stratégie de commande de référence, par une évaluation du gradient de puissance dans le plan (Azimut, élévation) exploitée pour une recherche en temps réel de la puissance maximale de l'ensemble module sur tracker. La puissance maximale recherchée en fonction de la position du tracker suppose que l'algorithme MPPT de l'onduleur du module, soit suffisamment rapide devant les constantes de temps associées aux mouvements du tracker. Cette nouvelle approche sans capteur solaire permet ainsi de réduire le coût du système de commande d'un tracker ainsi que les coûts de réglage et d'entretien qui y sont associés. Si cette réduction des coûts peut sembler marginale dans le contexte du développement d'un tracker multi-modules tel que celui pris comme exemple dans cette étude, cette solution paraît plus intéressante et plus rentable dans le cas de trackers de faibles dimensions, mono ou bi-modules, pour lesquels ces coûts (viseur, installation et entretien), comparés à la puissance installée par tracker, ne seraient plus négligeables. De plus, la masse des modules par tracker étant réduite dans le cas d'une solution mono ou bi-modules, la structure mécanique de ces « mini-trackers » peut être allégée tout en évitant d'éventuels problèmes de déformations qui imposent, sur les trackers de grandes dimensions (classiquement 8 ou 10 modules), un réglage compliqué de l'alignement de chaque module pour une position donnée du tracker. Ce réglage constitue un compromis permettant de maximiser la production à l'échelle d'une journée, ce qui représente un inconvénient supplémentaire des trackers classiques, multi-modules, comparés à un ensemble de « mini-trackers » qui permet de maximiser à chaque instant la puissance de chaque module. De plus, l'allègement des structures permet d'envisager une diminution supplémentaire des coûts de fabrication (et de démantèlement) d'ensemble, motorisation et fondations comprises.

Dans un objectif d'évaluation et de comparaison des performances de cette nouvelle approche par rapport à la stratégie de référence, nous avons proposé une série de simulations et de diagnostics de l'évaluation du gradient. Cette étude a mis en évidence les difficultés d'application de la méthode du gradient en temps réel. En effet, l'évaluation du gradient et la recherche de la position du maximum de puissance nécessitent des déplacements successifs des axes du tracker pendant lesquels la position du soleil continue d'évoluer, ce qui introduit un biais dans l'évaluation.

La version d'algorithme retenue pour la génération de la trajectoire par la méthode du gradient garantit des performances satisfaisantes, notamment en termes de rapidité et de précision, par rapport à la stratégie de référence.

Une des limites de la stratégie proposée est sa dépendance vis-à-vis du temps de réponse de l'algorithme MPPT de l'onduleur. En effet, les temps de réponse des algorithmes MPPT proposés par les onduleurs industriels les plus connus sont trop importants pour permettre l'utilisation de l'ensemble formé par le module et son onduleur MPPT comme capteur de

puissance en fonction de la position du tracker. L'étude proposée dans le dernier chapitre vise ainsi à montrer que ces algorithmes MPPT peuvent être améliorés et présenter des temps de réponse plus courts, rendant possible cette exploitation du module comme capteur.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés aux panneaux PV classiques car nous ne disposons alors pas de modules HCPV pour effectuer les tests. La première partie de ce chapitre a été consacrée à la modélisation d'un module PV dans le but de développer un modèle de simulation permettant de tester les commandes MPPT proposées. Un état de l'art sur les différentes commandes MPPT a été présenté par la suite. L'objectif étant d'assurer un compromis entre rapidité de réponse, précision et complexité de la commande, la synthèse bibliographique nous a conduits à utiliser la commande P&O, la plus simple et la plus rapide mais qui présente de fortes oscillations de la puissance en raison des perturbations introduites sur la tension pour la recherche du point de fonctionnement optimal. L'approche proposée est donc une commande P&O améliorée par un réseau de neurones artificiels (RDN) à complexité réduite. L'évaluation par simulation des performances de la commande MPPT proposée a montré que, par comparaison avec trois autres algorithmes de commande P&O, l'amélioration par RDN permet d'éliminer les oscillations et donc d'augmenter la précision tout en restant raisonnable en termes de complexité. Concernant la rapidité, une estimation du temps de réponse de chaque algorithme a montré que la commande proposée n'est pas la plus rapide. Néanmoins les quatre algorithmes présentés dans cette étude sont suffisamment rapides par rapport aux constantes de temps associées aux mouvements du tracker dans sa recherche de puissance maximale avec la méthode du gradient.

### **V.1. Perspectives**

Les activités de modélisation et de commande du tracker doivent être prolongées et validées sur une installation réelle en exploitation. Parmi les perspectives de ces travaux, la première concerne l'amélioration de la modélisation et le développement du simulateur du tracker HCPV. Notamment, une deuxième version du modèle du soleil pourrait inclure avantageusement un bloc d'estimation et de calcul de l'ensoleillement global et direct, tenant compte de la température de la cellule photovoltaïque et non plus seulement de la température ambiante de l'air. Ce modèle d'estimation de l'ensoleillement peut prendre la forme d'un calcul astronomique comme le suggère (Maatallah.T, 2011) ou d'un modèle à paramètres réduits basé sur les réseaux de neurones artificiels, suivant l'idée de (Notton.G, 2013). Par ailleurs, le contrôle des actionneurs doit être amélioré en remplaçant la commande scalaire par une commande vectorielle avec un asservissement de la position et de la vitesse de la machine asynchrone. De même, un modèle mécanique plus complet et précis permettrait de mettre en évidence les déformations mécaniques des trackers de grandes dimensions et leurs influences sur la production des modules. Concernant la modélisation comportementale du module HCPV l'objectif est de réaliser l'expérimentation proposée dans ce mémoire. Les essais proposés permettront d'étudier expérimentalement l'influence de l'ensoleillement global sur la forme de la caractéristique de puissance en fonction de l'erreur de position. Les hypothèses de travail sont actuellement de considérer que la forme de la caractéristique de puissance n'est pas influencée par l'ensoleillement global et que seule son amplitude varie en fonction de l'ensoleillement direct et global. Cette hypothèse est très fréquente dans la littérature mais n'a

cependant jamais été validée expérimentalement. Les essais permettront aussi d'affiner l'identification des paramètres des modèles proposés.

Une deuxième perspective intéressante concerne l'amélioration des stratégies de commande proposées et la proposition de nouvelles, plus performantes. Dans ce sens, il paraît nécessaire de préalablement valider nos travaux sur le démonstrateur de tracker HCPV dit "de référence", notamment la stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient. Il s'agirait ensuite d'en déduire le gain obtenu sur la production du module HCPV et de le comparer à l'éventuelle hausse de la consommation des actionneurs en relation avec cette stratégie. Enfin, comme évoqué dans le troisième chapitre, il serait intéressant de mettre en place la nouvelle stratégie proposée sur un démonstrateur de petites dimensions, avec un ou deux modules seulement. Cette étude devrait permettre de confirmer que la commande proposée est plus performante, plus rentable, sur une petite structure présentant moins de déformations, ceci avec une mise en œuvre plus simple. Une dernière possibilité serait d'exploiter les commandes à base de réseaux de neurones artificiels, qui ont apporté de bons résultats au problème de la maximisation de puissance par l'algorithme MPPT d'un onduleur, pour calculer la valeur d'anticipation et générer la trajectoire du tracker en fonction de l'ensoleillement global, de la puissance du module HCPV, de l'heure et de la date. Cette idée n'a pas pu être exploitée car ce type de commande nécessite un nombre important de mesures expérimentales et un dispositif expérimental spécifique qui n'est pas encore mis en place sur le démonstrateur de tracker HCPV de référence.

Malgré un contexte difficile lié à la chute des prix du silicium qui tend à avantager la technologie photovoltaïque classique face au photovoltaïque à concentration (HCPV), le contexte énergétique mondial ne peut qu'évoluer, à plus ou moins long terme, en faveur de la technologie HCPV. Des propositions telles que celles exposées dans ce travail de thèse, qui mettent en évidence une possible réduction des coûts d'installation, de maintenance et d'entretien des trackers HCPV et une amélioration de leurs performances énergétiques, sont autant d'éléments qui permettent d'envisager un retour prometteur de la technologie HCPV dans les prochaines années, de manière plus prononcée dans les pays présentant un fort ensoleillement direct.



---

# Références Bibliographiques

---

- (Abdallah.S,2004): Abdallah.S, Nijmeh.S. Two axes sun tracking system with PLC control [Journal] Energy Conversion and Management 45, 2004. - Vols. 1931–1939.
- (Alexandru.C,2013): Alexandru.C. Design and Optimization of a Monoaxial Tracking System for Photovoltaic Modules [Journal] Journal of Solar Energy, 2013. - 586302 : Vol. 6.
- (Alexandru.C, 2009): Alexandru.C Pozna.C The optimization of the tracking mechanism used for a group of PV panels [Conference] International Conference on Renewable Energies and Power Quality. - 2009.
- (Almonacid.F, 2013): Almonacid.F, Fernández, Eduardo.F, Rodrigo.P, Pérez-Higueras.P.J, Rus-Casas.C. Estimating the maximum power of a High Concentrator Photovoltaic (HCPV) module using an Artificial Neural Network [Journal] Energy, 2013. - 53.
- (AlRashidi.M, 2013): AlRashidi.M.R, El-Naggar.K.M, AlHajri.M.F. Parameters Estimation of Double Diode Solar Cell Model [Journal] World Academy of Science, Engineering and Technology, 2013. - Vol. 74.
- (Ansari.A): Ansari.A, Deshpande.D.M. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink [Journal] International Journal of Engineering Science and Technology. - 2010. - pp. 1260-1267.
- ASTME Standard test method for electrical performance of concentrator terrestrial photovoltaic modules and systems under natural sunlight [Report] American Society for Testing and Materials, 2009.
- (ASTME,2009): ASTME,Standard test method for electrical performance of concentrator terrestrial photovoltaic modules and systems under natural sunlight [Report] American Society for Testing and Materials, 2009.
- (Baig.H, 2013): Baig.H, Sarmah.N, Heasman.K.C, Mallick.T.K. Numerical modelling and experimental validation of a low concentrating photovoltaic system [Journal] Solar Energy Materials & Solar Cells, 2013. - 113.
- (Belkasmi.M,2015): Belkasmi.M. Improved dual-axis tracker and outdoor characterization of cpv system [Conference] CPV conference, 2015.
- (Bendib.T, 2008): Bendib.T, Barkat.B, Djeflal.F, Hamia.N, Nidhal.A. Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes à base d'un microcontrôleur PIC16F84A [Journal] Revue des Energies Renouvelables, 2008. - 4 : Vol. 11.
- (Bendib.T, 2013): Beriber.D, Talha.A. MPPT techniques for PV systems [Conference] Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013.
- (Bernard.C, 2009): Bernard.C, Sebrao.C, Laval.B, Vaudouer.C. Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue [Report]. - 2009.
- (Boitier.V, 2008): Boitier.V, Maussion.P, Cabal.C. Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques [Journal] revue 3E.I, 2008. - 54.
- (Cabal.C, 2008): Cabal.C. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. - Toulouse : Thèse de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.

- (Capomaccio, 2015): Capomaccio, Anne-Marie. Etats-Unis: à qui profite la baisse du prix du baril de pétrole ? [Online] RFI. - février 9 , 2015. - Avril 15, 2015. - <http://www.rfi.fr/emission/20150209-etats-unis-profite-baisse-prix-baril-petrole/>.
- (Caron.J-P, 1995): Caron.J-P, Hautier.J-P. Modélisation et commande de la machine asynchrone [Book] Paris : TECHNIP, 1995.
- (Cheikh, 2007): Cheikh, Aït.M.S, Larbes.C, Kebir.G.F, Tchoketch, Zerguerras.A. Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme [Journal] Revue des Energies renouvelables, 2007. - 3 : Vol. 10.
- (Chekireda.F, 2011): Chekireda.F, Larbesa.C, Rekiouab.D, Haddad.F. Implementation of a MPPT fuzzy controller for photovoltaic systems on FPGA circuit [Journal].Energy Procedia 6, 2011. - Vols. 541–549.
- (China.C.S, 2011): China.C.S, Babu.A, McBride.W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink [Journal] Renewable Energy, 2011. - 36.
- (Cichocki.A, 1993): Cichocki.A. Unbehauen.R Neural Networks for Optimization and Signal Processing [Book] John Wiley and Sons Ltd, 1993.
- (Cittolin.G, 2011): Cittolin.G, Mazuroski.G.F,Goncalev.J.V , Kroetz.R. C, Pece.M. G , Santosc.A.Z. Sensorless iterative solar tracking in multiple on-grid photovoltaic generators with improved tracking strategy [Conference] International Conference on Renewables Energies and Power Quality ICREPQ'11, 2011.
- (Cornuéjols A, 2013): Cornuéjols A. Introduction à la logique floue [Report] AgroParisTech, 2013.
- (Didier.V, 2007): Didier.V. Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances [Report] HEPSUL, 2007.
- (DIGIDRIVE-SK, 2008): DIGIDRIVE-SK. Variateur de vitesse pour moteurs asynchrones: Fonctions développées, LEROY-SOMER, 2008.
- (Dollet.A, 2011): Dollet.A. Conversion Photovoltaïque de l'Energie Solaire Concentrée [Conference] Séminaire Agrion – CPV. - 2011.
- (Energy, 2013): Energy, Green Rhino Concentrating Photovoltaics (CPV) [Online] Green Rhino Energy. - Green Rhino Energy Ltd., 2013. - mai 2013, [www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv\\_concentration.php](http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_concentration.php).
- (Enertech): Enertech. Diagrammes des trajectoires du soleil [Online] enertech. - [www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/50/trajectoires-soleil.pdf](http://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/50/trajectoires-soleil.pdf).
- (Exosun, 2007): Exosun Exotrack® CPV, high precision solar tracking [Online] Exosun. - 2007. - <http://www.exosun.net/>.
- (Femia.N, 2005): Femia.N, Petrone.G, Spagnuolo.G, Vitelli.M. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method [Journal] IEEE Transactions on power electronics, 2005. - 4 : Vol. 20.
- (Fernandez.E.F, 2013): Fernandez.E.F, Almonacid F, Rodrigo P, Perez-Higueras P. Model for the prediction of the maximum power of a high concentrator photovoltaic module [Journal] Solar Energy 97 . - 2013. - pp. 12–18.
- (Fernández.E.F, 2012): Fernández.E.F, Pérez-Higueras.P.J, Almonacid.F,García-Loureiro.A.J, Fernández.J.I, Rodrigo.P Quantifying the effect of air temperature in CPV modules under outdoor conditions [Conference] Proceedings of the 8 th international conference on concentrating photovoltaic systems , 2012. - Vol. 1477.
- (Foresi.J, 2015): Foresi.J. Characterization of Suncore's Utility-scale CPV PowerPlants [Conference] CPV Conference, 2015.

- (Fromer.N, 2009): Fromer.N, Johnson.R, Missirian.S, Bobruk.J. Soliant Energy concentrator module performance and comparison to silicon flat panel performance [Conference] SPIE , 2009.Vol. 7407.
- (Gerstmaier.T, 2015): Gerstmaier.T, Zech.T, Röttger.M, Braun.C ,Gombert.A. Results Large-Scale and Long-Term CPV Power Plant Field [Conference] CPV Conference, 2015.
- (Gómez-Gil.F.J, 2012): Gómez-Gil.F.J, Wang.X, Barnett.A. Analysis and Prediction of Energy Production in Concentrating Photovoltaic (CPV) Installations [Journal] Energies, 2012. - 5.
- (Gueymard.C, 2009): Gueymard.C. Simple model of the atmospheric radiative transfert of sunchine [Report] 2009.
- (Habibi.M, 2009): Habibi.M, Yazdizadeh.A. New MPPT Controller Design for PV Arrays Using Neural Networks [Conference] ISSN 2009 Proceedings of the 6th International Symposium on Neural Networks: Advances in Neural Networks. - 2009.
- (Hatti.M, 2008): Hatti.M. Contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum d'un système photovoltaïque [Conference] CG'08. - 2008.
- (Hchan.D.S, 1987): Hchan.D.S, Phang.J.C.H. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics [Journal] Electron Devices, IEEE Transactions on, 1987. - Vol. 34.
- (Hornung.T, 2010): Hornung.T, Bachmaier.A, Nitz.P, Gombert.A. Temperature Dependent Measurement And Simulation Of Fresnel Lenses For Concentrating Photovoltaics [Conference] 6th International Conference on concentrating Photovoltaic Systems, AIP Conference Proceedings, 2010. - Vol. 1277.
- (IEC 62108, 2007): IEC 62108, Concentrator photovoltaic (CPV )modules and assemblies—design qualification and type approval, Edition 1.0.Geneve, 2007.
- (IEC62817, 2014): IEC 62817, Photovoltaic systems – Design qualification of solar trackers. - 05 30, 2014.
- (IMCCE, 2014): IMCCE. Ephémérides générales de position des corps du système solaire [Online] // IMCCE. - 2014. - 2014. - <http://www.imcce.fr/>.
- (Junsangsri.P, 2010): Junsangsri.P, Lombardi.F. Double diode modeling of time/temperature induced degradation of solar cells [Journal] Circuits and Systems, 2010.
- (Kaito.T, 2004): Kaito.T, Koizumi.H, Goshima.N, Kawasaki.M, Kurokawa.K. inverter Development of MPPT algorithm for a digital controlled pv [Conference] International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-14), 2004.
- (Kassmi.K, 2007): Kassmi.K, Hamdaoui.M , Olivie.F. Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique [Journal] Revue des Energies Renouvelables, 2007. - 4 : Vol. 10.
- (Khezzar.R, 2010): Khezzar.R, M. Zereg, A. Khezzar. Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque [Journal] Revue des Energies Renouvelables, 2010. - 3 : Vol. 13.
- (Kinsey.G.S, 2010): Kinsey.G.S, Stone.K, Brown.J, Garboushian.V. Energy prediction of amonix cpv solar power plants [Conference] 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. - Valencia : Progress in Photovoltaics, 2010.
- (Ko.J.S, 2012): Ko.J.S, Chung.D.H. Control of a Novel PV Tracking System Considering the Shadow Influence [Journal] Journal of Electrical Engineering & Technology . - 2012. - p. 524~529.
- (Learetta.A.B, 2006): Learetta.A.B. Réalisation de commandes MPPT numériques [Report] LAAS, 2006.



- (Liu.F, 2008): Liu.F, Duan.S, Liu.B. A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems [Journal] *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2008. - 7 : Vol. 55.
- (Lokanadham.M, 2012): Lokanadham.M, Bhaskar.K,Vijaya Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System [Journal] *International Journal of Engineering Research and*, 2012. - Vol. 2.
- (Maatallah.T, 2011): Maatallah.T, Alimi.S , Nassrallah.S.B. Performance modeling and investigation of fixed, single and dual-axis tracking [Journal] *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15. - 2011. - pp. 4053–4066.
- (Meeus, 1991): Meeus Jean. *Astronomical Algorithms* [Book]. - 1991.
- (Meeus.J, 1998): Meeus.J. *Astronomical Algorithms* [Book]Virginia, USA : Willmann-Bell, Richmond, 1998.
- (Nishikawa.W, 2008): Nishikawa.W, Green.E, Crowley.S. Energy production of CPV power plants at ISFOC [Conference] *International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity*, CA , 2008.
- (Notton.G, 2010): Notton.G, Caluianu.I,Colda.I, Caluianu.S Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin [Journal] *Revue des Energies Renouvelables*, 2010. - 1 : Vol. 13.
- (Notton.G, 2013): Notton.G, Paoli.C,Diap.S. Estimation of tilted solar irradiation using Artificial Neural Networks [Journal] *Energy Procedia*, 2013. - Vol. 42.
- (OptimumTracker, 2012): OptimumTracker. *Entreprise et vision* [Online] Optimum Tracker. - 2012. - 2014. - <http://www.optimum-tracker.com/>.
- (Peharz.G, 2011): Peharz.G, Ferrer-Rodríguez.J.P,Siefer.G,Bett.A.W. A method for using CPV modules as temperature sensors and its application to rating procedures [Journal]*Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011. - Vol. 95.
- (Philipps.S.P, 2015): Philipps.S.P, Bett.A.W, Horowitz.K, Kurtz.S. Current status of concentrator photovoltaic (CPV) technology [Report] Fraunhofer ISE, NREL, 2015.
- (Prix-du-baril, 2015): Prix-du-baril Cours du baril de pétrole en euro dollar [Online] Prix du baril, 2015. - <http://prixdubaril.com/>.
- (Reda.I, 2008): Reda.I, Andreas.A. *Solar Position Algorithm forSolar Radiation Applications* [Report]. - 2008.
- (Riley.D, 2015): Riley.D. Mapping HCPV module or system response to solar incident angle[Conference] *CPV Conference*, 2015.
- (Rivera.A.J, 2013): Rivera.A.J, García-Domingo.B.M, delJesús, Aguilera.J. Characterization of concentrating photovoltaic modules by cooperative competitive radial basis function networks [Journal] *Expert Systems with Applications*, 2013. - Vol. 40.
- (Rodrigo.P, 2013): Rodrigo.P, Fernández.E.F , Almonacid.F , Pérez-Higueras.P.J. Models for the electrical characterization of high concentration photovoltaic cells and modules: A review [Journal]*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. - 26.
- (Rodrigues.E.M.G, 2011): Rodrigues.E.M.G, Melício.R, Mendes.V.M.F, Catalão.J.P.S. Simulation of a Solar Cell considering Single-Diode Equivalent Circuit Model [Conference] *International conference of renewable energies and power quality* . - 2011.
- (Romero-Ugalde.H.M, 2013): Romero-Ugalde.H.M, Carmona.J-C, MAlvarado.V, Reyes-Reyes.J. Neural network design and model reduction approach for black box nonlinear system identification with reduced number of parameters [Journal] *Neurocomputing*, 2013. - 101.

- (Roncero-Clemente.C, 2013): Roncero-Clemente.C, Romero-Cadava.E, Minambres.V.M,Guerrero-Martinez.M.A, Gallardo-Lozano.J. PV Array Emulator for Testing Commercial PV Inverters [Journal] ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, 2013. - 10 : Vol. 19.
- (Rubio.F.R, 2007): Rubio.F.R, Ortega.M.G, Gordillo.F, Lopez-Martinez.M. Application of new control strategy for sun tracking [Journal] Energy Conversion and Management, 2007. - Vol. 48.
- (Sahnoun.M.A, 2013): Sahnoun.M.A, Romero Ugaldea.H.M, Carmona.J-C, Gomand.J. Maximum power point tracking using P&O control optimized by a neural network approach: a good compromise between accuracy and complexity [Journal] Energy Procedia, 2013. - 42 : Vols. 650 – 659.
- (Sakurada.Y, 2011): Sakurada.Y, Ota.Y, Nishioka.K. Simulation of Temperature Characteristics of InGaP/InGaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell under Concentrated Light [Journal] Japanese Journal of Applied Physics, 2011. - Vol. 50.
- (Sandia, 1997): Sandia, King.D.L. Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions [Report] NREL/SNL Photovoltaics Program Review Meeting, 1997.
- (Segev.G, 2012): Segev.G, Mittelman.G, Kribus.A. Equivalent circuit models for triple-junction concentrator solar cells [Journal] Solar Energy Materials & Solar Cells, 2012. - 98.
- (Selvan.D, 2013): Selvan.D, Saravana. Modeling and Simulation of Incremental Conductance MPPT Algorithm for Photovoltaic Applications [Journal] International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2013. - 7 : Vol. 2.
- (Seme.S, 2011): Seme.S, Štumberger.G, Vorsic.J. The optimal tracking strategies for two-axis PV system [Journal] Przegląd elektrotechniczny , 2011. - 3 : Vol. 87.
- (SolarGIS, 2013): SolarGIS, GeoModel Solar [Online] SolarGIS. - 2013. - 09 2014.
- (Steiner.M, 2012): Steiner.M, Guter.W, Peharz.G, Simon.P. Philipps, Dimroth.F , A.W. Bett A. validated SPICE network simulation study on improving tunnel diodes by introducing lateral conduction layers [Journal] Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2012. - Vol. 20.
- (Steiner.M, 2012):Steiner.M, Siefe.G, Bosch.A, Hornung.T ,Bett.A.W Realistic Power Output Modeling Of CPV Modules [Conference] Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2012. - Vol. 1477.
- (STMicroelectronics, 2012): STMicroelectronics. High-performance, IEEE 802.15.4 wireless system-on-chip with upto 256 Kbytes of embedded Flash memory, STMicroelectronics , 2012.
- (Tatu.N, 2012): Tatu.N, Alexandru.C. Modeling and simulation of the tracking mechanism for a PV string, Automation Quality and Testing Robotics (AQTR) [Article] IEEE International Conference, 2012.
- (Timothy, 2004): Timothy, Ross.J. Fuzzy Logic with Engineering Applications [Book] second ed. John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- (Villalva.M.G, 2009): Villalva.M.G, Gazoli.J.R, Filho.E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays [Journal] IEEE Transactions on power electronics , 2009. - 5 : Vol. 24.
- (Wasynczuk.O, 1983): Wasynczuk.O. Dynamic behavior of a class oh photovoltaic power system [Journal] IEEE transactions on power apparatus and systems, 1983. - Vol. 102.
- (Xinhong.Z, 2007): Xinhong.Z, Zongxian.W, Zhengda.Y. Intelligent Solar Tracking Control System Implemented on an FPGA [Report]. - [s.l.] : Institute of Electrical Engineering, Yuan Ze University, 2007.
- (Yadav.P, 2013): Yadav.P, Tripathi.B, Lokhande.M, Kumar.M. Estimation of steady state and dynamic parameters of low concentration photovoltaic system [Journal] Solar EnergyMaterials&SolarCells, 2013. - 112.



---

# Annexe 1- Démonstrateur Tracker HCPV de référence

---

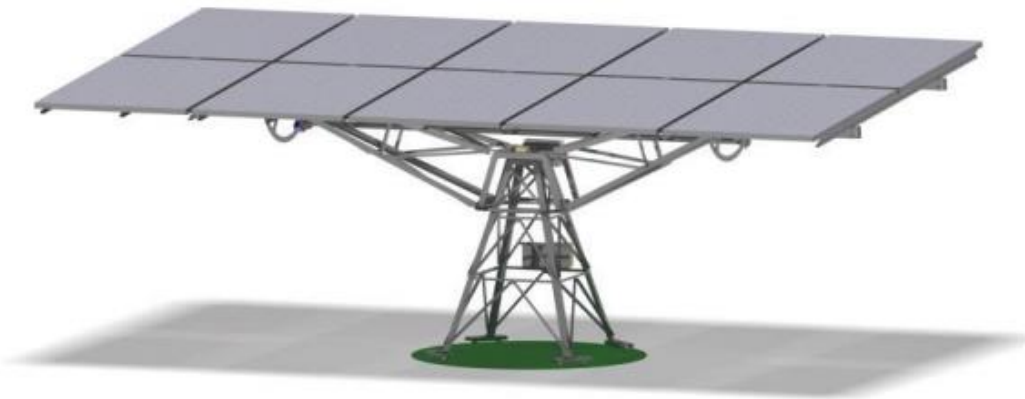


Figure 108- Tracker HCPV à deux axes : Démonstrateur de référence

## Caractéristiques Générales

Type de suivi	Deux axes	Précision de suivi	$> 0,1^\circ$
Type de modules	Tout module CPV		
Dimensions L x l x H	12,4m x 7,5m x 8,5m		
Angle d'azimut / Sud	De $+ 140^\circ$ à $-140^\circ$		
Angle d'élévation / Verticale	De $+ 5^\circ$ à $+113^\circ$		

---

## Caractéristiques Electromécaniques

---

Alimentation Tracker	230V AC
Motorisation	Moteur asynchrone
Contrôle-commande	Ordinateur embarqué



---

## Annexe 2- Détails du calcul astronomique

---

L'annexe suivant décrit le calcul astronomique utilisé pour calculer la position théorique du soleil en fonction de la date, de l'heure et des coordonnées géographiques du site.

### **Suivi du soleil :**

Le suivi du soleil est réalisé sur la base d'un calcul astronomique théorique de la position du soleil à partir des coordonnées GPS du Tracker et de l'heure UTC. Les formules du calcul astronomique sont issues de (Meeus.J, 1998).

### ***Calcul du jour julien***

Les calculs astronomiques sont réalisés à partir de dates converties en jour Julien comme décrit au chapitre 7 de l'ouvrage.

Si  $M = 1$  ou  $M = 2$  alors  $\begin{cases} Y = Y - 1 \\ M = M + 12 \end{cases}$

$$D = D + \frac{h + \frac{m + \frac{s}{60}}{60}}{24}$$

On pose  $A = \text{Tronque}\left(\frac{Y}{100}\right)$  et  $B = 2 - A + \text{Tronque}\left(\frac{A}{4}\right)$

Y, M, D, h, m, s sont respectivement l'année, le mois, le jour du calendrier Grégorien, l'heure UTC, la minute et la seconde.

Le jour julien est donc calculé comme suit :

$$JD = \text{Tronque}(365.25 * (Y + 4716)) + \text{Tronque}(30.6001 * (M + 1)) + D + B - 1524.5$$

### ***Calcul de la position apparente du soleil***

La position apparente du soleil est obtenue en coordonnées équatoriales  $\alpha$  (Ascension Droite) et  $\delta$  (Déclinaison) à partir des équations suivantes :

- Siècle Julien  $J_{2000}$

$$T = \frac{JD - 2451545.0}{36525}$$

- Longitude moyenne du Soleil

$$L_0 = 280.46645^\circ + 36000.76983^\circ * T + 0.0003032^\circ * T^2$$

- Anomalie moyenne du Soleil

$$M = 357.52910^\circ + 35999.05030^\circ * T - 0.0001559^\circ * T^2 - 0.00000048^\circ * T^3$$

- Equation du Centre du Soleil

$$C = (1.914600^\circ - 0.004817^\circ * T - 0.000014^\circ * T^2) * \sin M \\ + (0.019993^\circ - 0.000101^\circ * T) * \sin 2M + 0.000290^\circ * \sin 3M$$

- Longitude vraie du soleil

$$\theta = L_0 + C + \Delta\theta$$

- $\Delta\theta$  permet une amélioration du calcul de la longitude vraie du soleil en introduisant les corrections suivantes :

- Corrections dues à l'action de Venus

$$A = 153.23^\circ + 22518.7541^\circ * T$$

$$B = 216.57^\circ + 45037.5082^\circ * T$$

- Correction due à l'action de Jupiter

$$C = 312.69^\circ + 32964.3577^\circ * T$$

- Correction due à l'action de la Lune

$$D = 350.74^\circ + 445267.1142^\circ * T - 0.00144^\circ * T^2$$

- Inégalité de longue période

$$E = 231.19 + 20.20 * T$$

$$\Delta\theta = 0.00134^\circ * \cos(A) + 0.00154^\circ * \cos(B) + 0.00200^\circ * \cos(C) + 0.00179^\circ \\ * \sin(D) + 0.00178^\circ * \sin(E)$$

- Paramètre de nutation de la terre

$$\Omega = 125.04452^\circ - 1934.136261^\circ * T$$

- Longitude apparente du soleil

$$\lambda = \text{Revolution}(\theta - 0.00569^\circ - 0.00478^\circ * \sin \Omega)$$

- Obliquité moyenne de l'écliptique

$$\varepsilon_0 = \frac{84381.448'' - 46.8150'' * T - 0.00059'' * T^2 + 0.001813'' * T^3}{3600}$$

- Longitude moyenne du Soleil

$$L = 280.4665^\circ + 36000.7698^\circ * T$$

- Longitude moyenne de la Lune

$$L' = 218.3165^\circ + 481267.8813^\circ * T$$

- Longitude du nœud ascendant de la Lune

$$\Omega = 125.04452^\circ - 1934.136261^\circ * T + 0.0020708^\circ * T^2 + \frac{T^3}{450000^{\circ-1}}$$

- Nutation en obliquité

$$\Delta\varepsilon = 9.20'' * \cos \Omega + 0.57'' * \cos 2L + 0.10'' * \cos 2L' - 0.09'' * \cos 2\Omega$$

- Obliquité vraie de l'écliptique

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\Delta\varepsilon}{3600}$$

$\Delta\varepsilon$  et  $\varepsilon_0$  calculés ci-dessus sont exprimés en "

- Ascension droite et Déclinaison du Soleil

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{\cos \varepsilon * \sin \lambda}{\cos \lambda} \\ \sin \delta = \sin \varepsilon * \sin \lambda \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \alpha = \text{atan2}(\cos \lambda ; \cos \varepsilon * \sin \lambda) \\ \delta = \text{asin}(\sin \varepsilon * \sin \lambda) \end{cases}$$

### *Temps sidéral*

Afin de réaliser la transformation des coordonnées apparentes du soleil en coordonnées locales observables dans le repère horizontal, il est nécessaire de calculer le temps sidéral à Greenwich  $\theta_0$ , le calcul est décrit en détail dans (Meeus.J, 1998).

- Jour Julien à 0h UTC

$$JD_0 = \text{Tronque}(JD + 0.5) - 0.5$$

- Siècle Julien à 0h UTC

$$T_0 = \frac{JD_0 - 2451545.0}{36525}$$

- Temps sidéral à 0h UTC à Greenwich

$$\theta_0 = 100.46061837^\circ + 36000.770053608^\circ * T_0 + 0.000387933^\circ * T_0^2 - \frac{T_0^3}{387100000^{\circ-1}}$$

- Longitude du nœud ascendant de la Lune

$$\Omega = 125.04452^\circ - 1934.136261^\circ * T + 0.0020708^\circ * T^2 + \frac{T^3}{450000^{\circ-1}}$$

- Longitude moyenne du Soleil

$$L = 280.4665^\circ + 36000.7698^\circ * T$$

- Longitude moyenne de la Lune

$$L' = 218.3165^\circ + 481267.8813^\circ * T$$

- Nutation en longitude

$$\Delta\psi = -17.20'' * \sin \Omega - 1.32'' * \sin 2L - 0.23'' * \sin 2L' + 0.21'' * \sin 2\Omega$$

- Obliquité moyenne de l'écliptique

$$\varepsilon_0 = 84381.448'' - 46.8150'' * T - 0.00059'' * T^2 + 0.001813'' * T^3$$



- Nutation en obliquité

$$\Delta\varepsilon = 9.20'' * \cos \Omega + 0.57'' * \cos 2L + 0.10'' * \cos 2L' - 0.09'' * \cos 2\Omega$$

- Obliquité vraie de l'écliptique

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{\Delta\varepsilon}{3600}$$

- Temps sidéral à l'heure UTC à Greenwich

$$\theta_0 = \theta_0 + 360^\circ * 1.00273790935 * (JD - JD_0)$$

- Correction du temps sidéral à 0h UTC à Greenwich en tenant compte de la nutation

$$\theta_0 = \text{Revolution}(\theta_0) + \frac{\Delta\psi}{3600} * \cos \varepsilon$$

### ***Transformation de coordonnées***

La position apparente du soleil est donnée en coordonnées équatoriales, les coordonnées dans le repère horizontal sont obtenues grâce aux transformations décrites dans (Meeus.J, 1998). Les coordonnées du soleil dans le repère horizontal (Azimut A et Elévation h) sont obtenues à partir des coordonnées équatoriales (Ascension Droite  $\alpha$  et Déclinaison  $\delta$ ), des coordonnées GPS de l'observateur (Latitude  $\varphi$  et Longitude L) et du temps sidéral à Greenwich  $\theta$ .

- Angle Horaire Local

$$H = \theta_0 - L - \alpha$$

- Azimut

$$\tan A = \frac{\sin H}{\cos H * \sin \varphi - \tan \delta * \cos \varphi} \Leftrightarrow A = \text{atan2}(\cos H * \sin \varphi - \tan \delta * \cos \varphi, \sin H)$$

- Elévation

$$\sin h = \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos H \Leftrightarrow h = \text{asin}(\sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos H)$$

---

## Annexe 3- Validation du calcul astronomique

---

L'algorithme de calcul de la position théorique du soleil a été validé par comparaison avec les tables d'éphéméride données par l'IMCCE (Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides, [www.imcce.fr](http://www.imcce.fr)). Cette table est développée à l'aide d'un algorithme INPOP13c de calcul de la position du soleil. En effet, le protocole de validation des algorithmes comprend les 3 étapes suivantes :

- Générer une table de calcul « Matlab » :

Un algorithme de calcul de la position théorique du soleil est développé sous Matlab. Cet algorithme permet de générer une table avec les résultats intermédiaires du calcul (le jour julien, la position apparente : ascension droite  $\alpha_s$  et déclinaison  $\sigma_s$ , l'angle horaire local  $H$ , la position horizontale azimut  $A_s$  et élévation  $h_s$ ) dans un intervalle de temps donné. Les paramètres nécessaires pour le calcul tels que les coordonnées GPS du tracker, la date de début et la date de fin du calcul et le pas de calcul sont définis dans cet algorithme.

- Générer une table de calcul « IMCCE » :

La table de calcul « Matlab » est chargée par la suite, en tant que fichier de dates, sur le générateur d'éphémérides fourni par l'IMCCE (IMCCE, 2014). Sur la base de ces dates (en jour julien) et en définissant les coordonnées géographiques du lieu d'observation, la plateforme de l'IMCCE génère une table avec la position du soleil dans le repère horizontal ( $A_s$  et  $h_s$ ) ainsi que d'autres points de calcul intermédiaire ( $H$ ,  $\alpha_s$  et  $\sigma_s$ ).

- Comparer les deux tables :

Les résultats des calculs simulés sont comparés aux éphémérides de l'IMCCE à l'aide d'un tableur développé sous Excel. En se basant sur ce protocole de validation, les résultats de l'algorithme ont été comparés sur la période du 01/01/2010 au 01/01/2020 toutes les 10 minutes pour une première région et du 01/01/2015 au 01/01/2016 toutes les 10 minutes pour 2 autres zones géographiques. Le tableau ci-dessous présente les résultats et décrit le niveau de précision de l'algorithme du calcul astronomique.

Date de début	Date de fin	Pas de calcul	Ville	Coordonnées GPS	Erreur Max A	Erreur Max h
01/01/2010	01/01/2020	10 min	Perpignan	42°40'56.9"N 2°47'43.4"E	0.0470°	0.0159°
01/01/2015	01/01/2016	10 min	Stockholm	59°19'49.2"N 18°04'05.6"E	0.0178°	0.0109°
01/01/2015	01/01/2016	10 min	Sydney	33°51'51.3"S 151°12'36.6"E	0.0536°	0.0117°



# Annexe 4- Description du simulateur de tracker HCPV

Le simulateur du tracker HCPV a été développé sous Matlab/Simulink<sup>®</sup>. Il contient les blocs présentés dans le chapitre II. L'interface principale du simulateur ainsi que les différents blocs développés sont présentés, ci-après. Les premières simulations sont effectuées avec la stratégie de commande dite de référence, présentée dans le chapitre III.

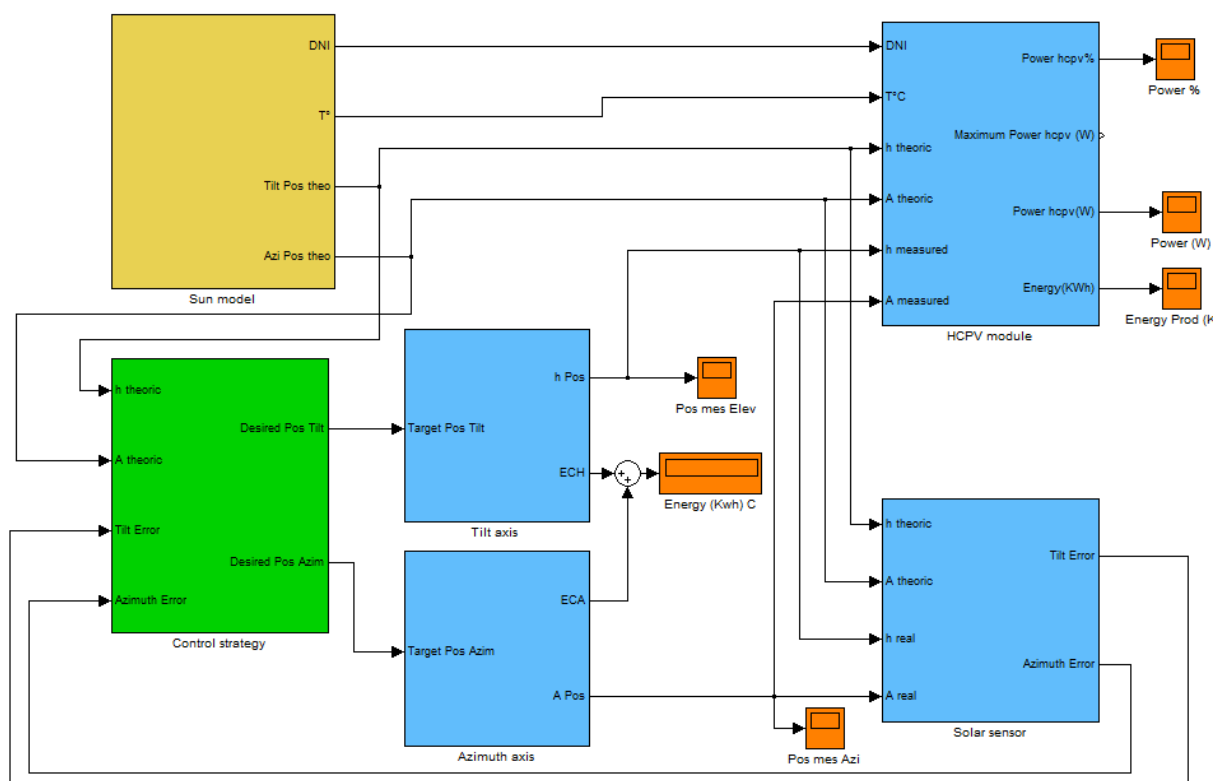


Figure 109- Simulateur de Tracker HCPV : Stratégie de commande de référence

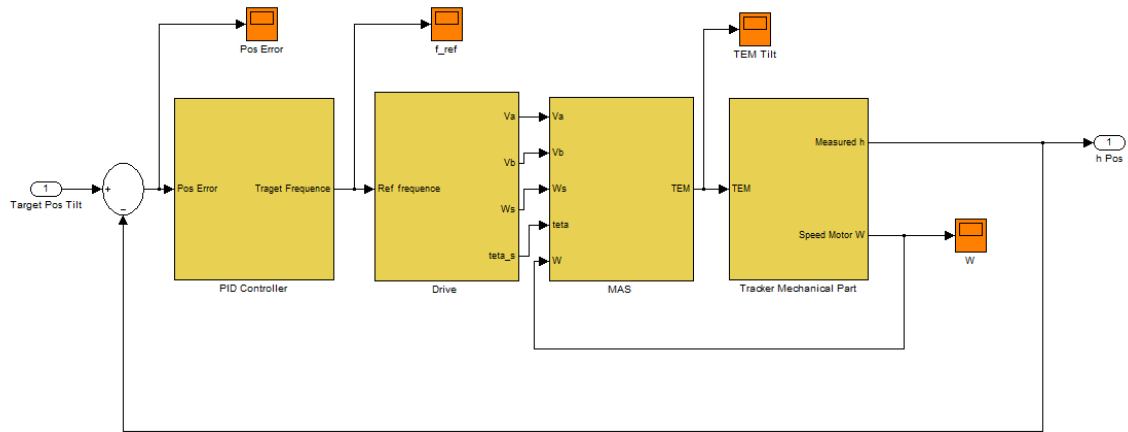


Figure 110- Bloc du modèle électromécanique asservi : Axe d'élévation

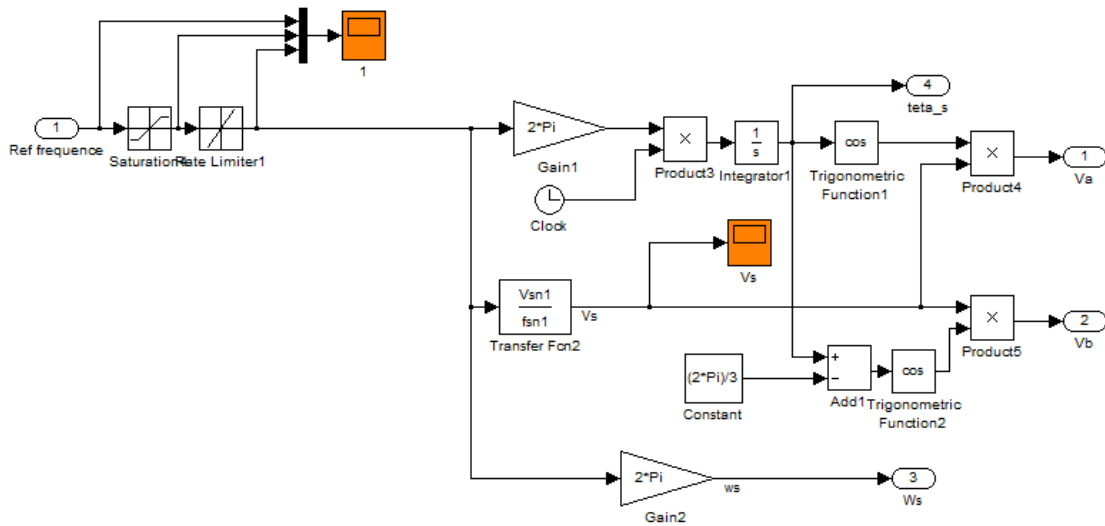


Figure 111- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle du variateur de vitesse et des transformations biphasées

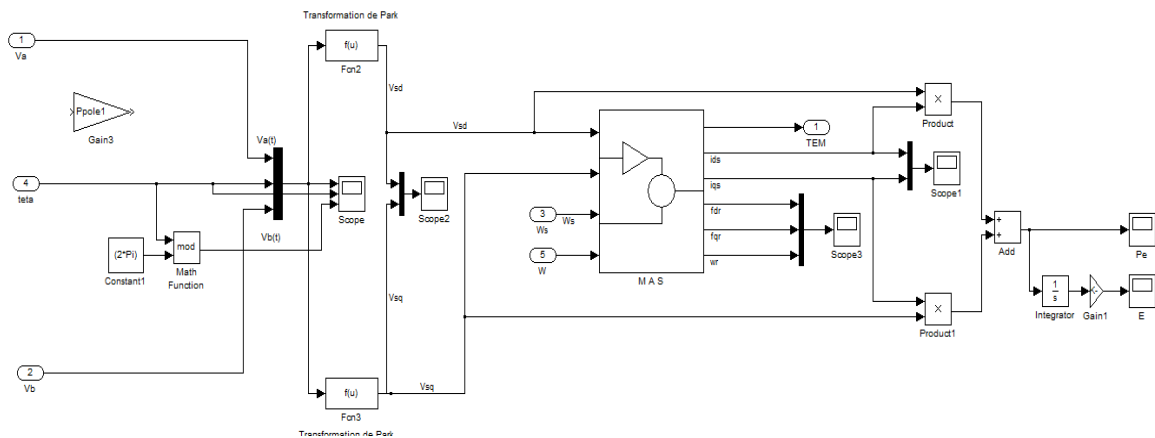


Figure 112- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle dynamique de la machine asynchrone et transformation de Park

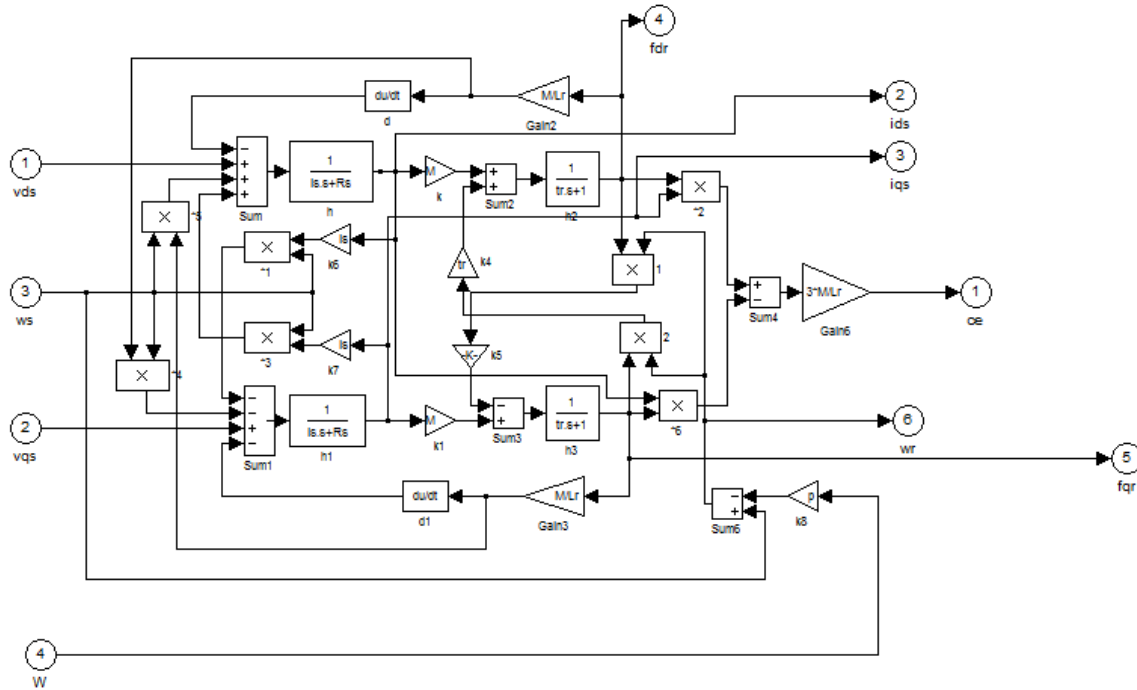


Figure 113- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle dynamique de la machine asynchrone (Calcul du couple électromécanique)

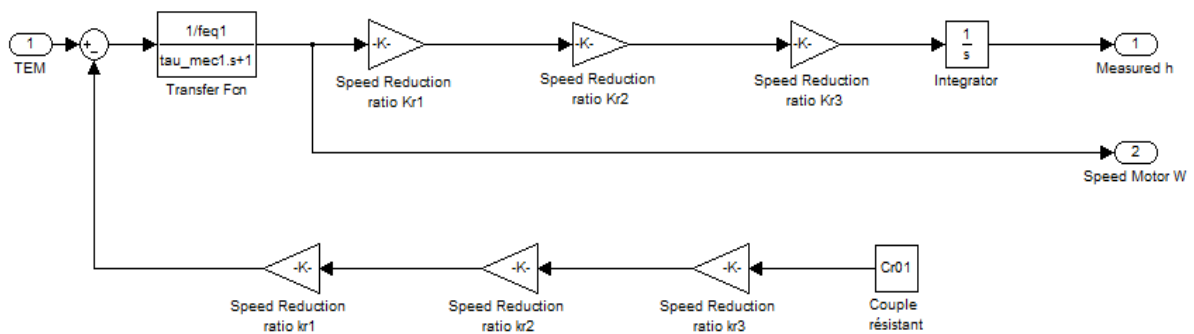


Figure 114- Bloc du modèle électromécanique asservi : Modèle rigide de la structure mécanique du tracker

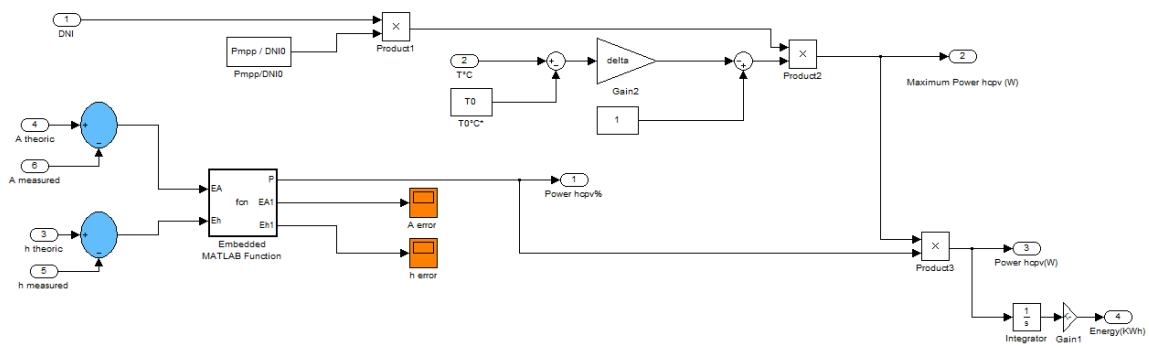


Figure 115- Bloc du modèle comportemental du module HCPV : Prédiction de la puissance maximale du module à partir de l'erreur de position, de l'ensoleillement et de la température

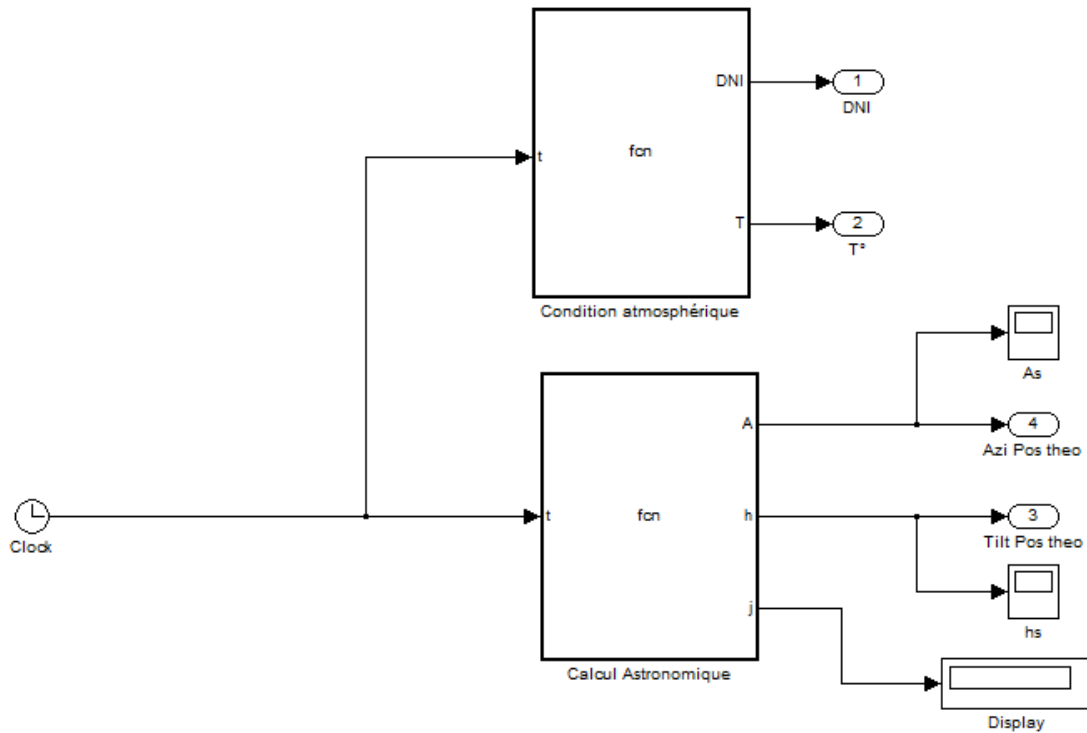


Figure 116- Bloc du modèle du soleil : Génération de la position théorique du soleil et des paramètres atmosphériques (Ensoleillement et température)

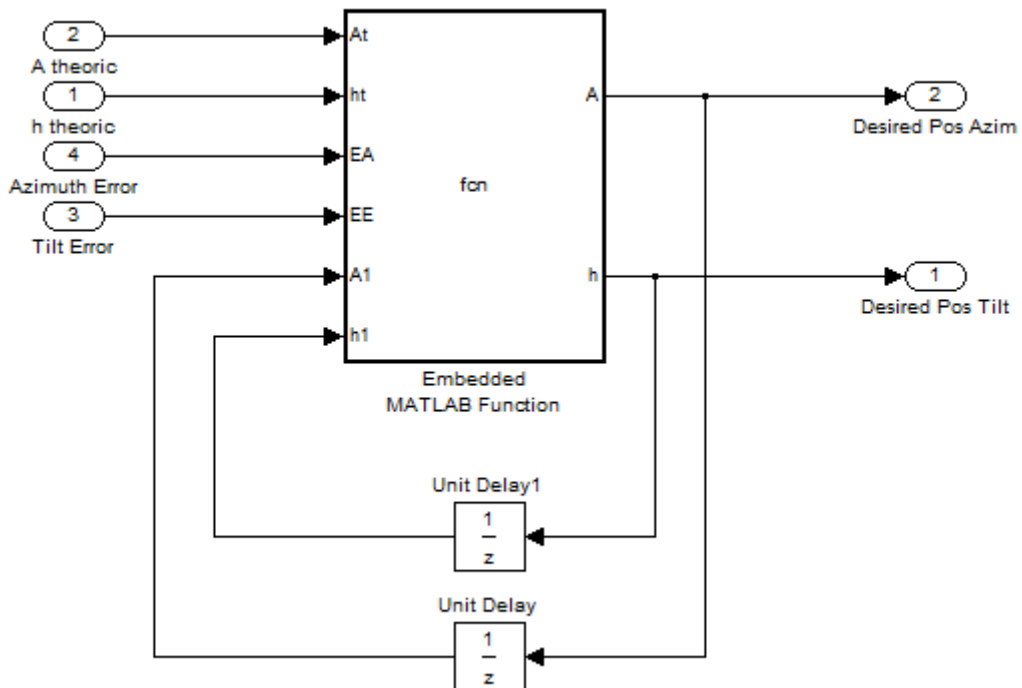


Figure 117- Bloc de stratégie de commande du tracker : Algorithme de la stratégie de commande de référence

# Annexe 5- Implémentation de la stratégie basée sur un algorithme du gradient sur le simulateur

## A- Implémentation de la stratégie de génération de trajectoire sur le simulateur de tracker HCPV:

Les deuxièmes simulations sont effectuées avec la stratégie de commande basée sur une méthode d'optimisation du gradient. A part le bloc de stratégie de commande nous avons gardé tous les autres modèles présentés ci-dessus.

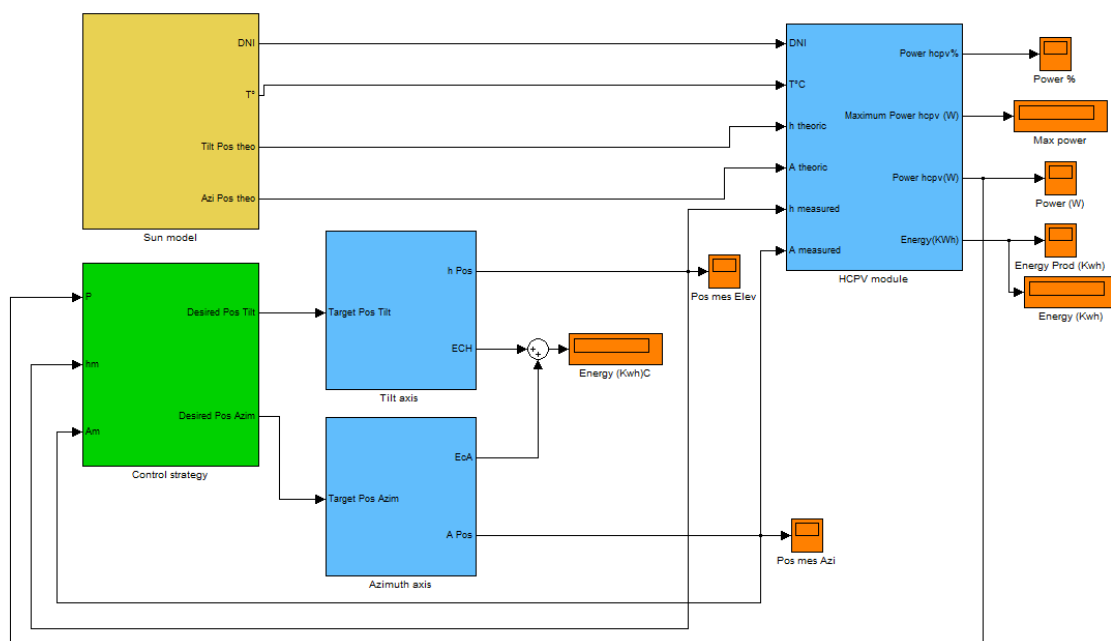


Figure 118- Simulateur de Tracker HCPV : Stratégie de commande basée sur la méthode d'optimisation du gradient

Le développement de la stratégie de commande sous Simulink est basé sur la machine d'état présentée ci-dessous. La première étape « x0 » est une étape d'initialisation et de mesure de la puissance initiale. La deuxième étape « x1 » correspondant au déplacement sur l'axe d'azimut afin de calculer la première composante du gradient. Cette étape est suivie d'un retour à la position initiale pour l'azimut. L'étape « x3 » et « x4 » correspondent au déplacement puis au retour à la position initiale de l'actionneur sur l'axe d'élévation. L'étape « 5 » est dédiée à l'évaluation du gradient qui permet de définir une première trajectoire de recherche de la puissance maximale selon le gradient évalué. Les étapes « 6 » et « 7 »



correspondent au déplacement des actionneurs en azimut et en élévation dans la direction du gradient évalué jusqu'à atteindre la puissance maximale ou la dépasser pour revenir à la case de départ afin de réévaluer le gradient.

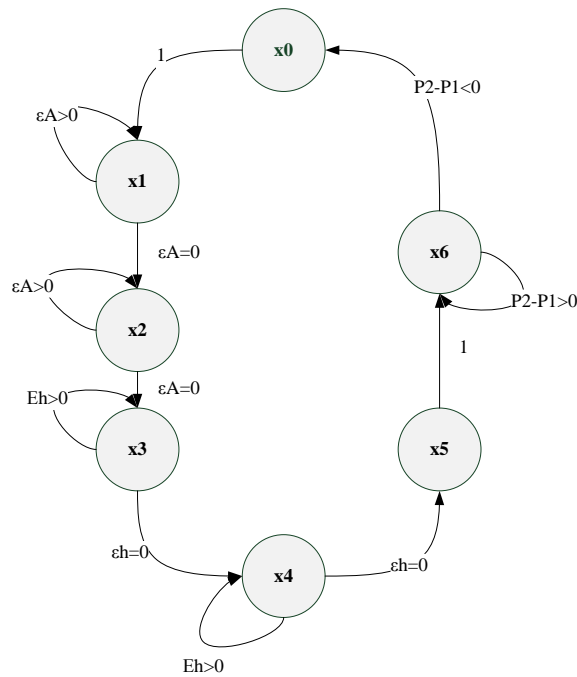


Figure 119- Machine d'état du développement de la première version de la stratégie de commande basée sur la méthode d'optimisation du gradient sous Simulink

Pour la deuxième version de l'algorithme un seul déplacement est effectué sur chaque axe du tracker pour évaluer le gradient. La suppression des deux étapes de retour à la position initiale de l'algorithme justifie bien le temps gagné pour le calcul du gradient.

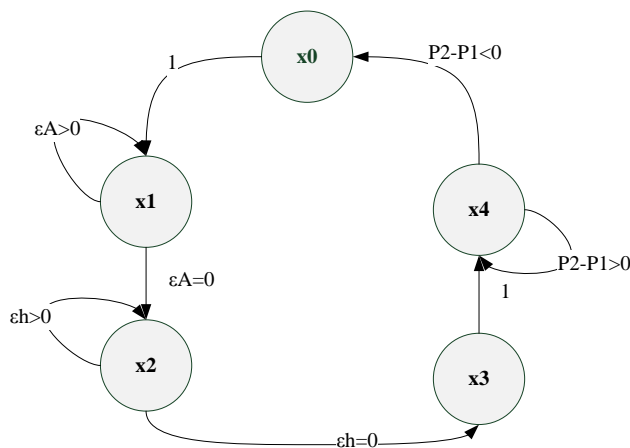


Figure 120- Machine d'état du développement de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur la méthode d'optimisation du gradient sous Simulink

**B- Résultats de simulation de la stratégie de commande basée sur un algorithme du gradient :**

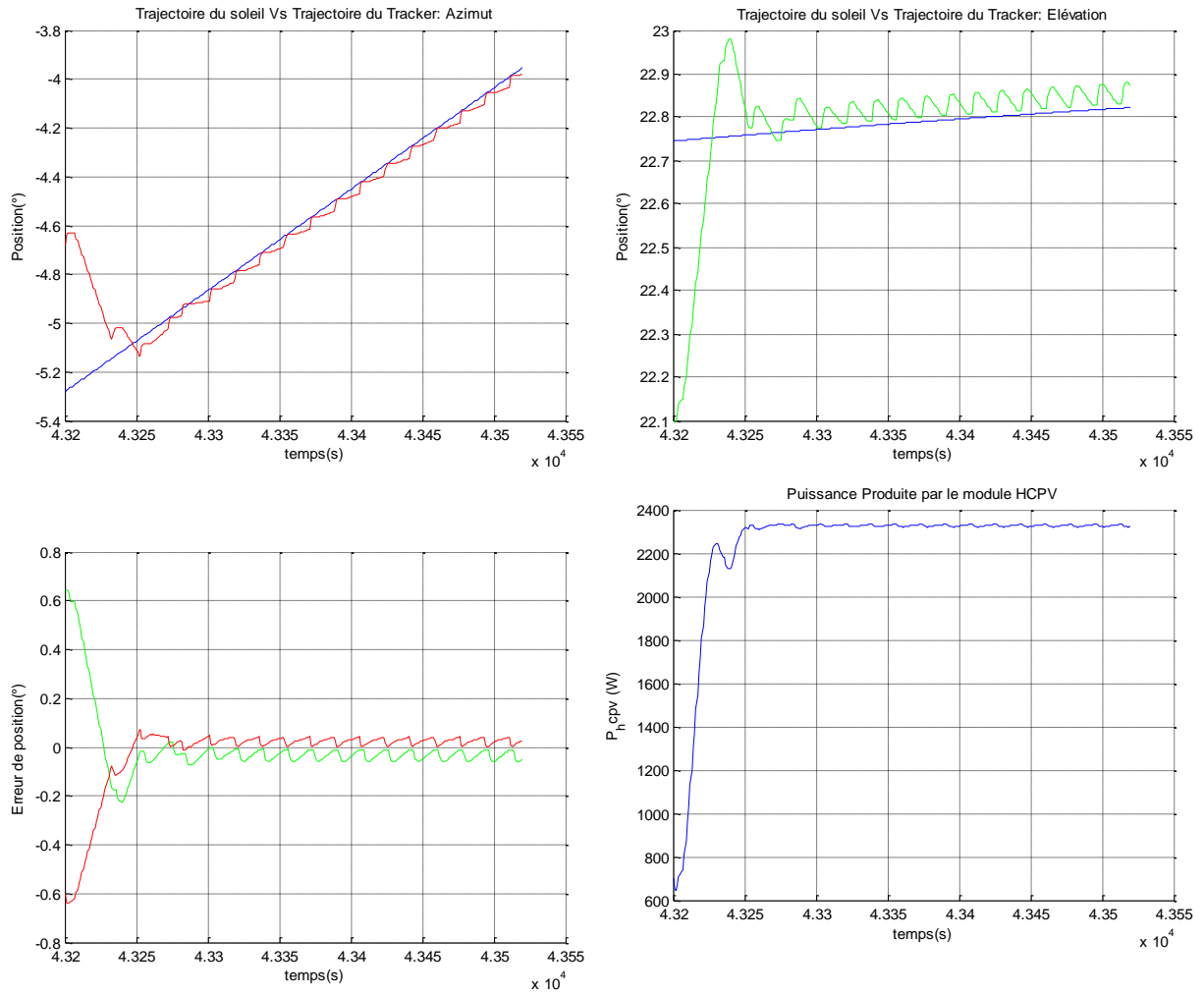


Figure 121- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ  $(A_0, h_0) = (-4.681, 22.1)$  en avance en azimut et en retard en élévation par rapport à la position initiale du soleil: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

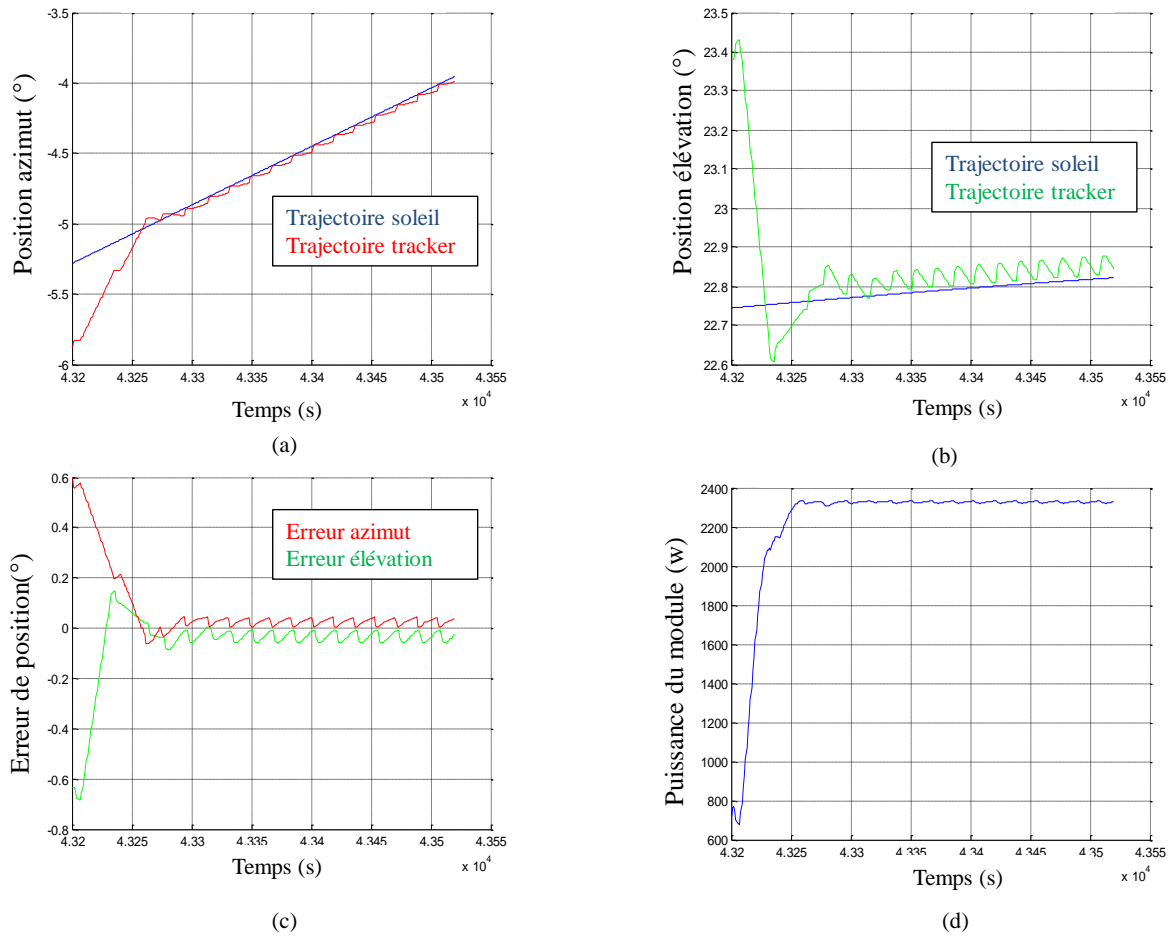


Figure 122- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ  $(A_0, h_0) = (-5.879, 23.38)$  en retard en azimuth et en avance en élévation par rapport à la position initiale du soleil: Trajectoire du tracker en azimuth (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimuth et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

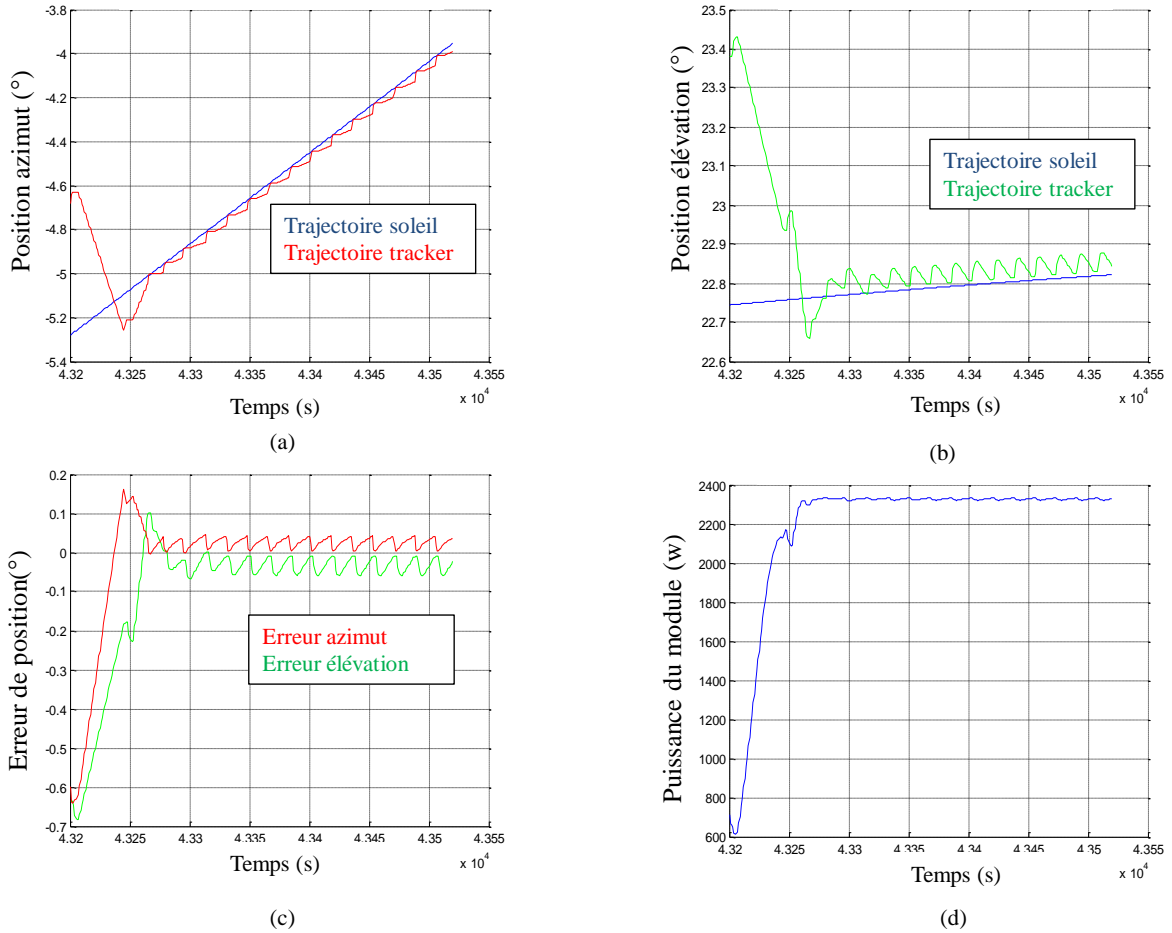


Figure 123- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ  $(A_0, h_0) = (-4.681, 23.38)$  en avance en azimuth et en avance en élévation par rapport à la position initiale du soleil: Trajectoire du tracker en azimuth (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimuth et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

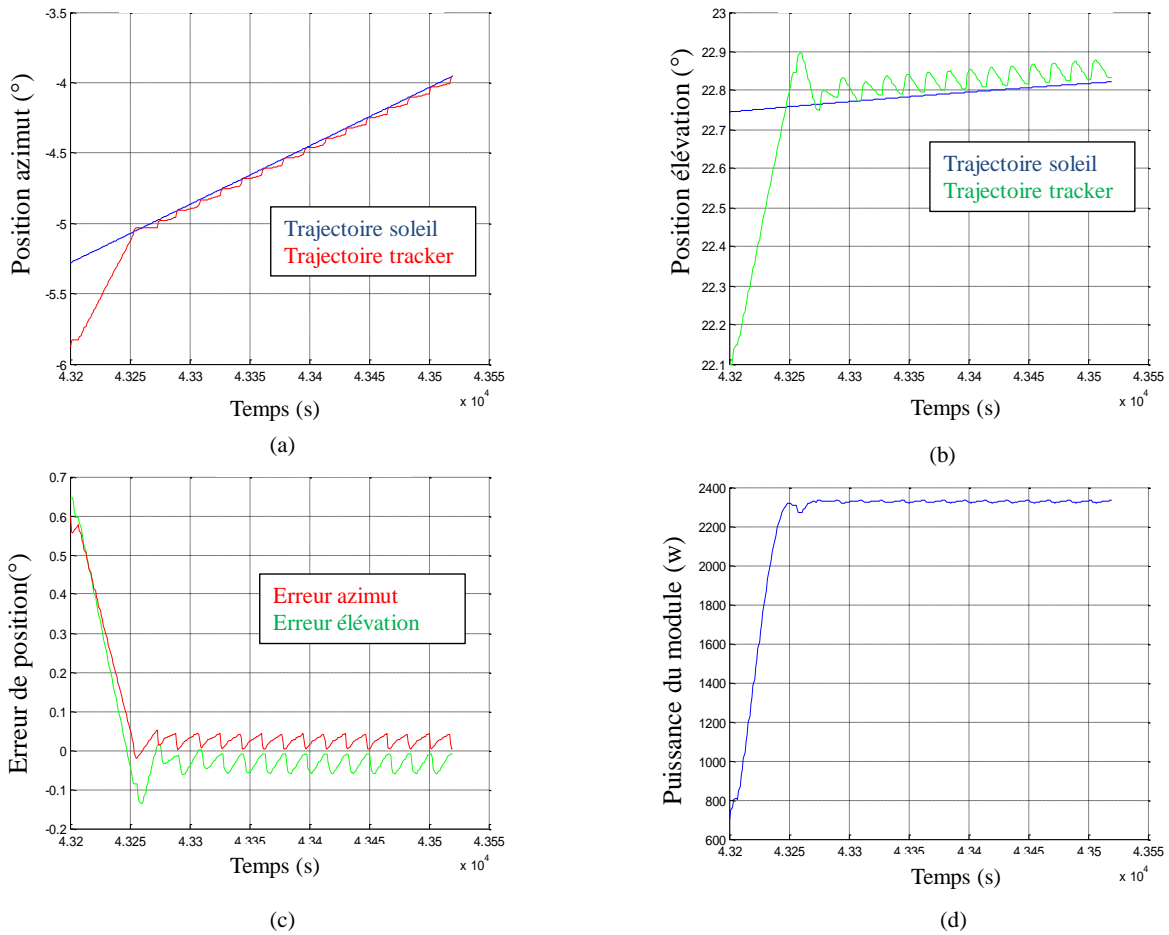


Figure 124- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ  $(A_0, h_0) = (-5.879, 22.1)$  en retard en azimut et en retard en élévation par rapport à la position initiale du soleil: Trajectoire du tracker en azimut (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimut et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)

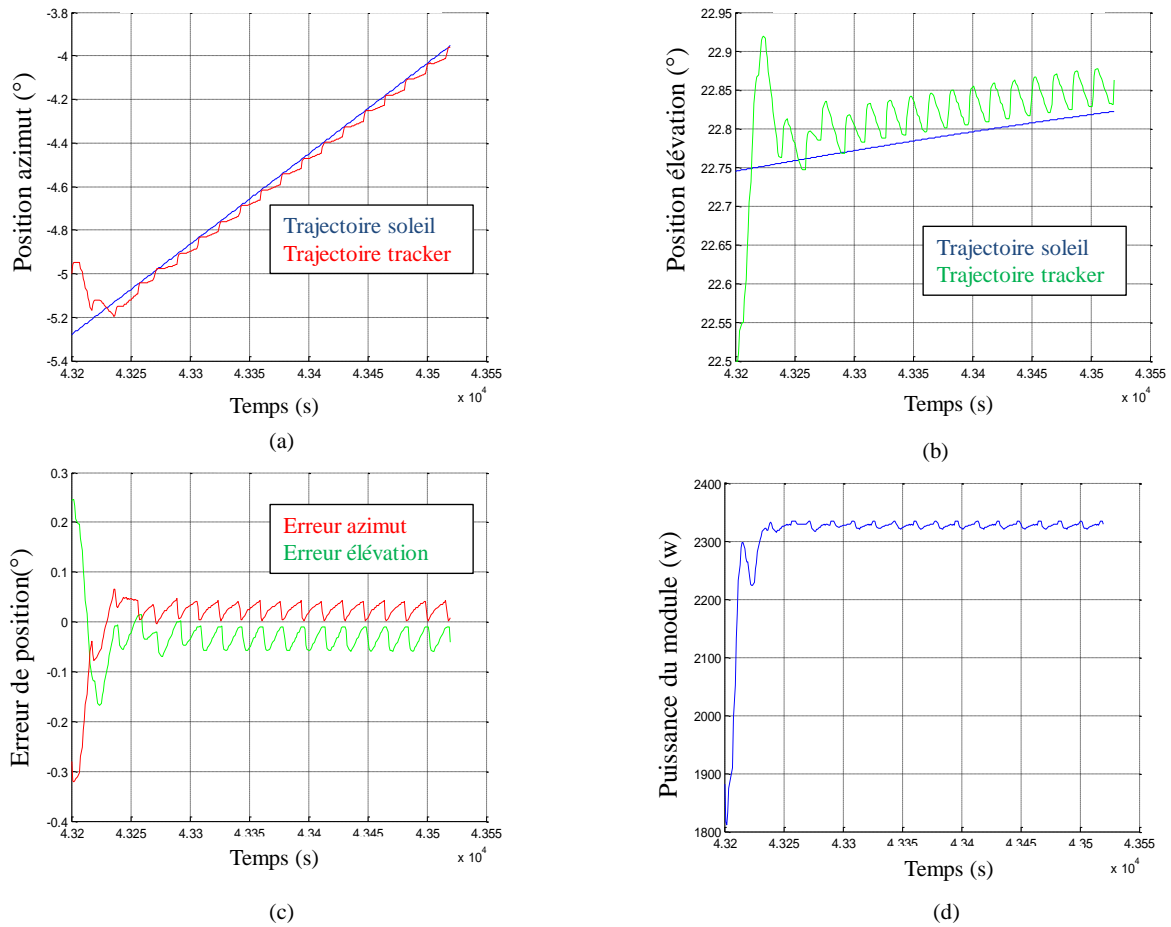


Figure 125- Résultats de simulation de la deuxième version de la stratégie de commande basée sur une méthode du gradient avec un point de départ  $(A_0, h_0) = (-5, 22.5)$  donnant une puissance  $(P_3)$  proche du 0: Trajectoire du tracker en azimuth (a) Trajectoire du tracker en élévation (b) Erreur de suivi en azimuth et en élévation (c) Puissance produite par le module HCPV (d)



---

## Annexe 6- Résultats de simulation des modèles comportementaux du module HCPV

---

Une étude comparative de plusieurs modèles combinés sur la base des fonctions cosinus et gaussienne est présentée dans cet annexe. Les caractéristiques de la puissance en fonction de l'erreur de suivi des six modèles présentés ci-dessous sont simulées sous Matlab et comparées aux points expérimentaux :

- Un modèle basé sur une fonction cosinus.
- Un modèle basé sur une fonction gaussienne.
- Un modèle basé sur une fonction polynomiale.
- Un modèle combiné de deux fonctions cosinus : la première à l'intérieur d'un intervalle  $[-0.3^\circ, +0.3^\circ]$  et une deuxième en dehors de cet intervalle.
- Un modèle combiné de deux fonctions gaussiennes : la première à l'intérieur de l'intervalle  $[-0.3^\circ, +0.3^\circ]$  et la deuxième en dehors de cet intervalle.
- Un modèle combiné d'une fonction cosinus à l'intérieur de l'intervalle  $[-0.3^\circ, +0.3^\circ]$  et d'une fonction gaussienne en dehors de cet intervalle.
- Un modèle combiné d'une fonction gaussienne à l'intérieur  $[-0.3^\circ, +0.3^\circ]$  et d'une fonction cosinus en dehors de cet intervalle.

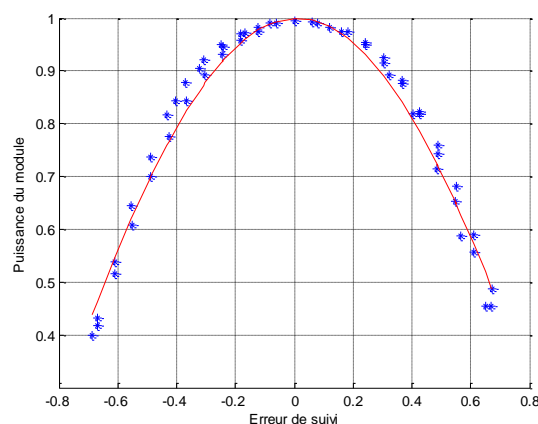


Figure 126- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle Cosinus comparées avec les points expérimentaux



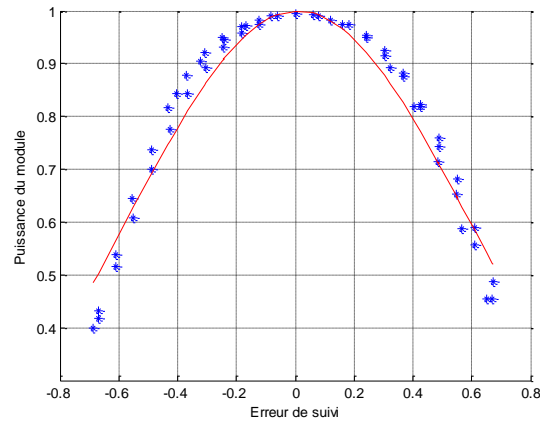


Figure 127- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle Gaussien comparée avec les points expérimentaux

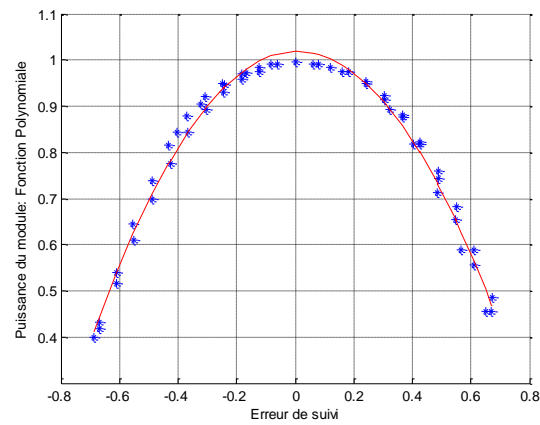


Figure 128- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle polynomial comparée avec les points expérimentaux

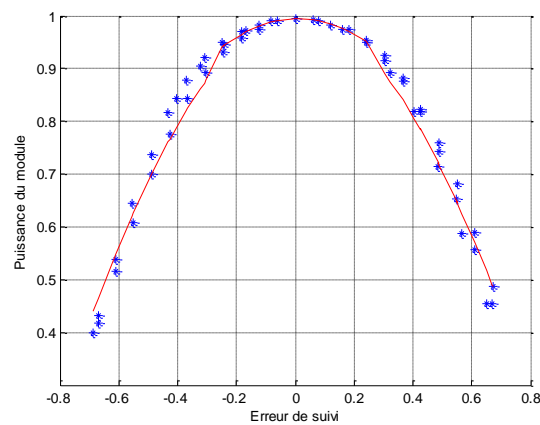


Figure 129- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné cosinus-cosinus comparée avec les points expérimentaux

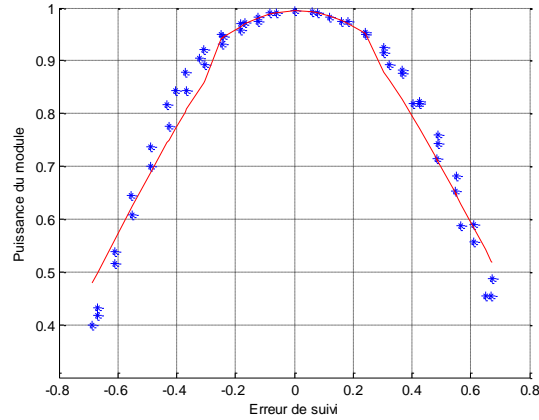


Figure 130- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné Gaussien-Gaussien comparée avec les points expérimentaux

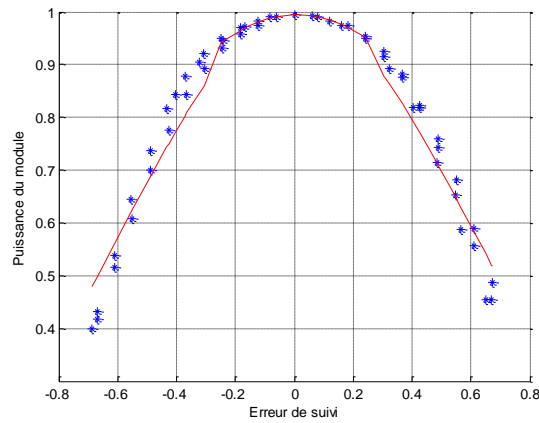


Figure 131- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné Cosinus-Gaussien comparée avec les points expérimentaux

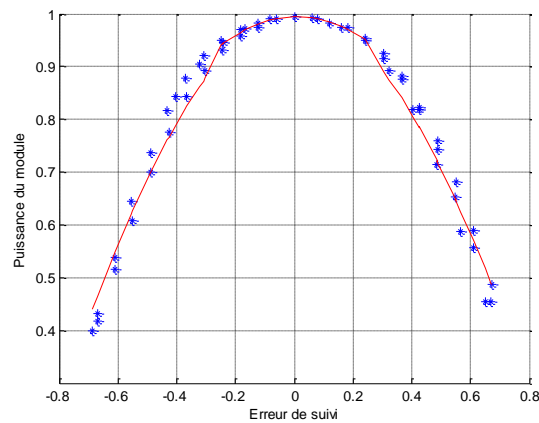


Figure 132- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour le modèle combiné Gaussien-Cosinus comparée avec les points expérimentaux

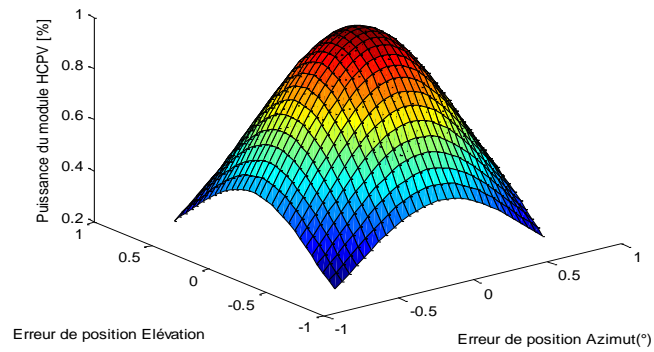


Figure 133- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Cosinus

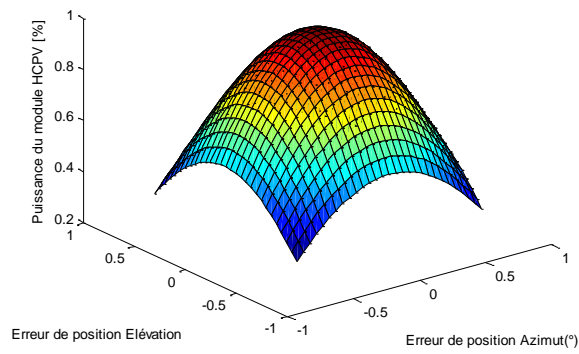


Figure 134- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Gaussien

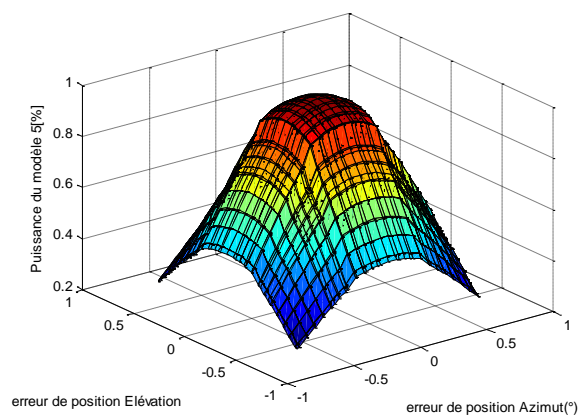


Figure 135- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Cosinus-Gaussien

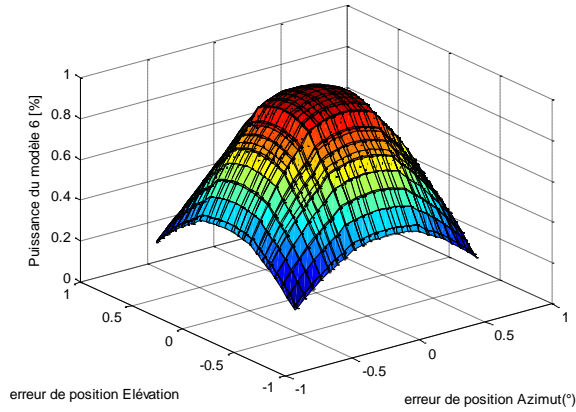


Figure 136- Caractéristique Puissance en fonction des erreurs de suivi azimut et élévation : Modèle Gaussien-Cosinus

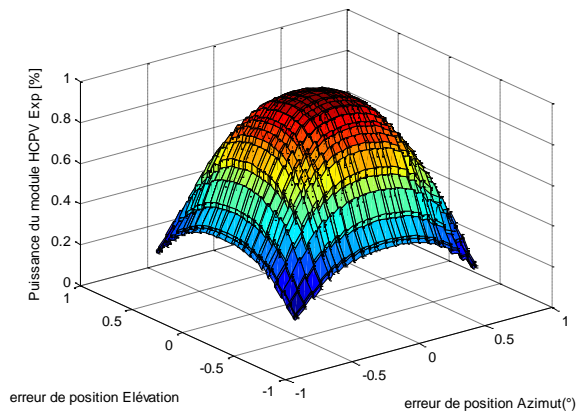


Figure 137- Caractéristique Puissance en fonction de l'erreur de suivi azimut et élévation : Mesures expérimentales

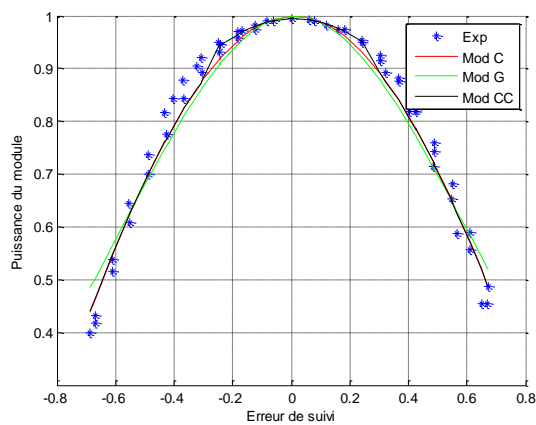


Figure 138- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles cosinus, gaussien et le modèle combiné cosinus gaussien comparées avec les points expérimentaux

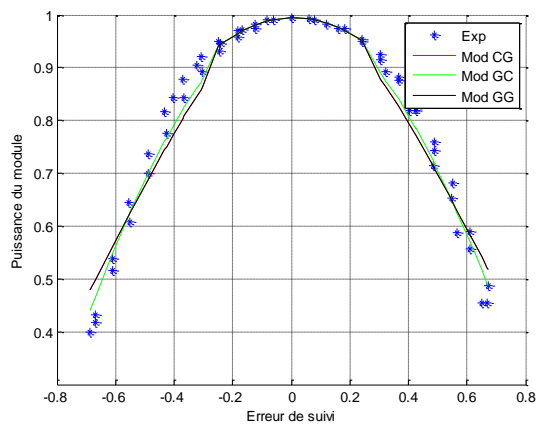
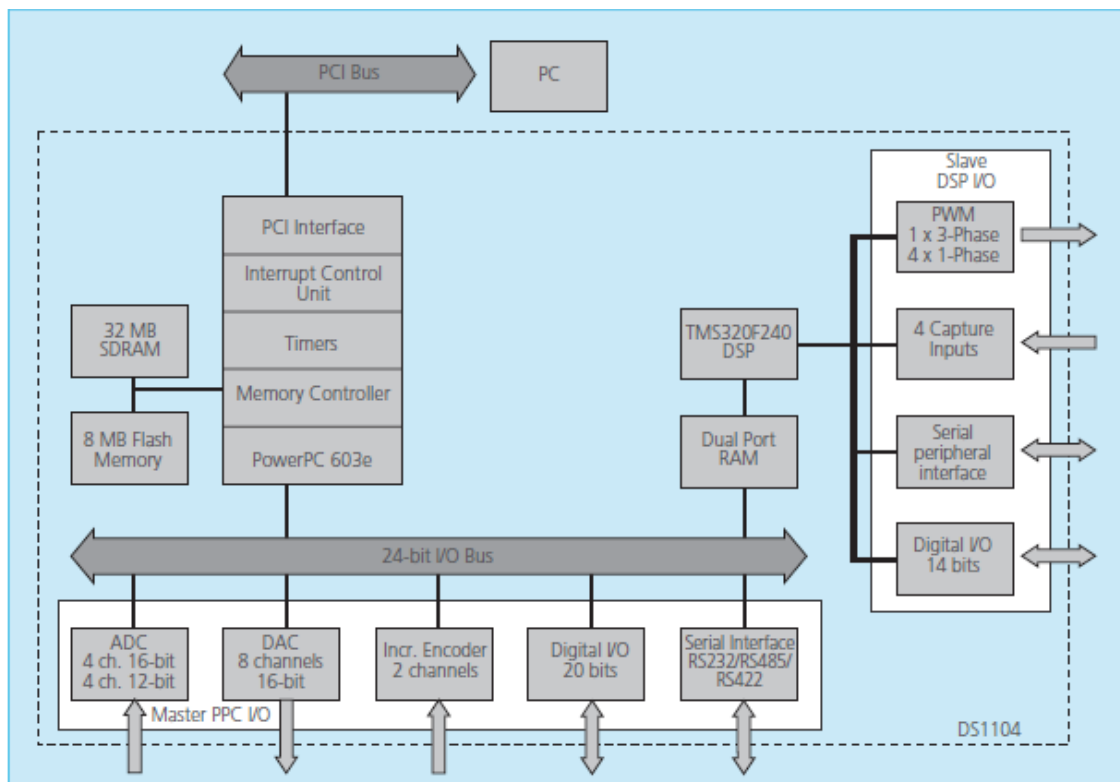


Figure 139- Caractéristique de production (%) en fonction de l'erreur de suivi pour les modèles combinés cosinus-cosinus, gaussien gaussien et cosinus-gaussien comparées avec les points expérimentaux

# Annexe 7- Architecture et caractéristiques de la carte dSpace 1104



## Caractéristiques techniques :

- MPC8240 processor with PPC 603e core and on-chip peripherals
- 64-bit floating-point processor CPU clock: 250 MHz
- 2 x 16 KB cache, on-chip
- On-chip PCI bridge (33 MHz)
- Global memory: 32 MB SDRAM
- Flash Memory: 8MB
- 5 A/D converter channels (1x16-bit and 4x12-bit) can be sampled simultaneously: +/- 10 V
- 2 digital incremental encoder interface
- 1 Serial interface: RS232/RS422/RS485 compatibility



## Annexe 8- Simulation du module PV

Le modèle de simulation du panneau photovoltaïque, développé sous Matlab/Simulink<sup>®</sup>, possède comme entrée l'ensoleillement global et la température du panneau et il génère la tension et le courant. Afin de tracer la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  le courant a été défini comme entrée du système et la tension comme sortie.

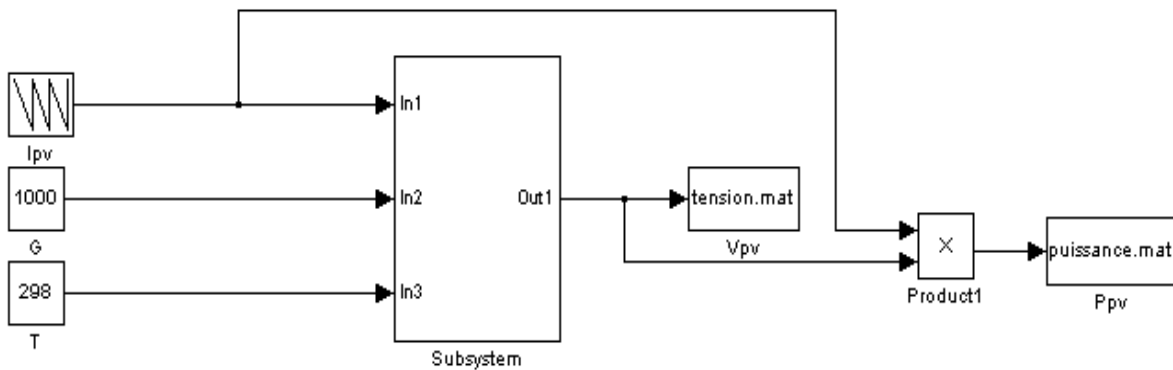


Figure 140- Modèle de simulation du panneau photovoltaïque

Sur la base de ce modèle de panneau photovoltaïque, une plateforme de simulation d'une commande MPPT a été développée. Cette plateforme comporte un modèle idéal du convertisseur DC/DC et un bloc de l'algorithme MPPT utilisé.

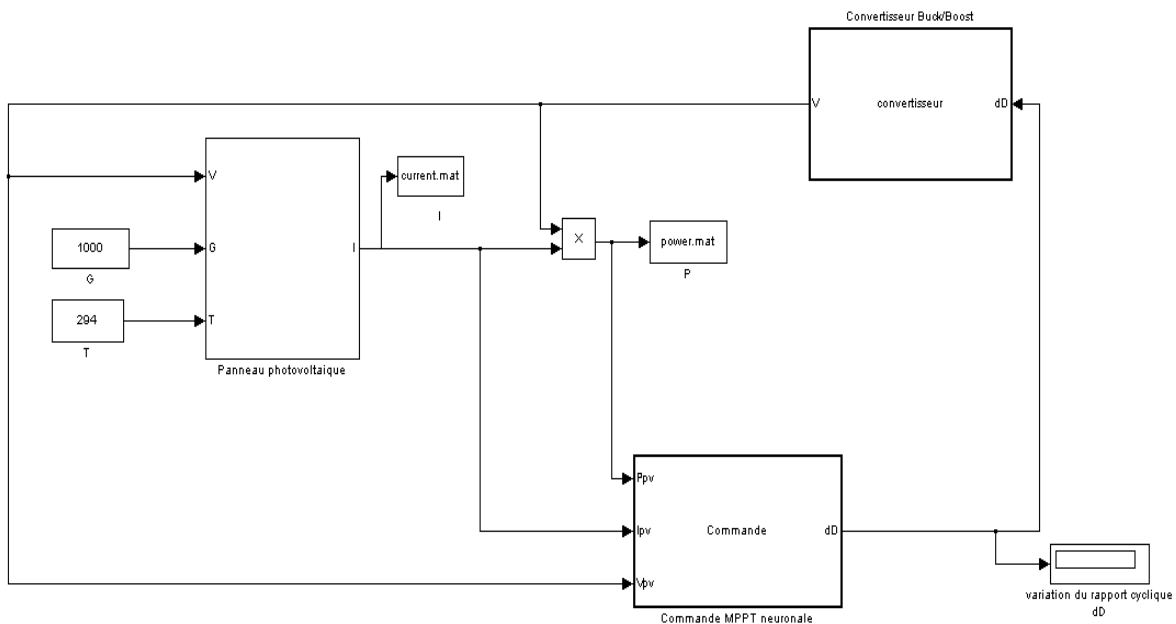


Figure 141- Plateforme de simulation de la commande P&O améliorée par un réseau de neurones





---

## Annexe 9- Validation expérimentale du modèle de panneau photovoltaïque

---

Le dispositif expérimental proposé pour cette validation (Figure 142) est constitué d'un panneau photovoltaïque Sharp série NU48 accompagné d'une carte d'acquisition de chez National Instruments, d'une sonde de température pour mesurer la température ambiante (Figure 144), d'un pyranomètre (Figure 143) pour mesurer l'ensoleillement global et d'une sonde de courant et tension pour mesurer respectivement  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$ .

Le traitement des données et l'affichage des résultats et des caractéristiques expérimentales  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  sont gérés par une interface graphique développée sous Labview. Cette interface permet aussi de générer un fichier Excel avec les points de mesures (Courant, tension, puissance, ensoleillement et température).

Les mesures de courant  $I_{pv}$  et de la tension  $V_{pv}$  ont été prises dans des conditions d'ensoleillement global et de température peu favorables :  $300 \text{ W/m}^2$  et  $21^\circ$ .

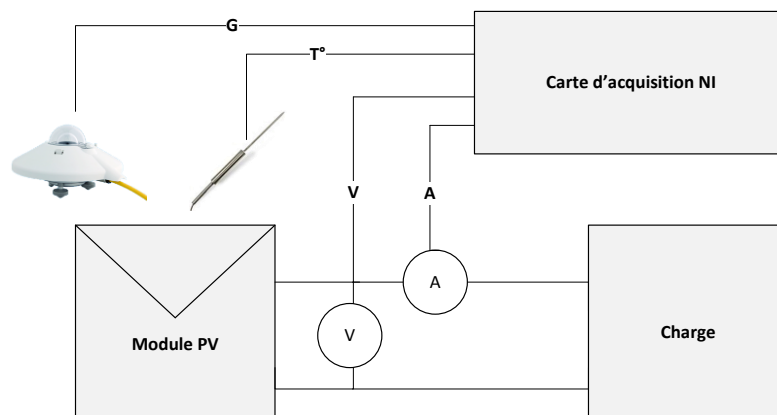


Figure 142- Dispositif expérimental de la validation du modèle de panneau photovoltaïque



Figure 143- Pyranomètre CMP 11 de chez Kipp & Zonen



Figure 144- Capteur de température pt100





## CONTRIBUTION A LA MODELISATION ET AU CONTROLE DE TRAJECTOIRE DE TRACKER PHOTOVOLTAIQUES A HAUTE CONCENTRATION (HCPV)

**RESUME :** Dans l'optique de maximisation de la production d'une part, et de réduction des coûts d'installation d'autre part, facilitant la maintenance et l'entretien des trackers solaires, équipés de modules photovoltaïques à haute concentration (HCPV), ces travaux de thèse se focalisent sur l'amélioration de la précision et la réduction du coût de la stratégie de génération de la trajectoire du tracker. Un simulateur de tracker HCPV est tout d'abord développé permettant une étude de l'influence de la performance du suivi du soleil sur la production des modules HCPV, ainsi que l'analyse et la comparaison des stratégies de génération de trajectoires. Ce simulateur est basé sur un modèle comportemental de module HCPV monté sur tracker permettant la prédiction de la puissance maximale du module HCPV en fonction de l'erreur de position du tracker face au soleil, de l'ensoleillement direct et de la température. Une première stratégie de commande dite de référence a été implémentée sur ce simulateur. C'est une commande hybride qui repose sur un viseur solaire pour corriger l'erreur de poursuite par un calcul astronomique. Ensuite, afin d'améliorer les performances et de réduire les coûts de mise en œuvre, une nouvelle approche sans capteur est développée s'appuyant sur une méthode d'optimisation du gradient de puissance pour la génération de la trajectoire du tracker. Dans la même optique, une étude est menée sur des algorithmes de recherche de la puissance maximale (MPPT) pouvant offrir des temps de réponse suffisamment rapides pour ne pas affecter la qualité de l'évaluation du gradient de puissance. Dans ce contexte, une commande MPPT P&O améliorée par un réseau de neurones à complexité réduite, est proposée, assurant un compromis entre précision, simplicité et rapidité.

**Mots clés :** Modules HCPV, Tracker HCPV à deux axes, Simulateur de tracker, Commande hybride, méthode du gradient, algorithme MPPT, réseau de neurones artificiels

## CONTRIBUTION TO THE MODELING AND CONTROL OF HIGH CONCENTRATED PHOTOVOLTAIC TRACKER (HCPV)

**ABSTRACT:** This work focuses on improving the accuracy and on reducing the cost of the tracker generating trajectory strategy, in order to maximize the production and to reduce the installation and the maintenance cost of a solar tracker orienting high concentrated photovoltaic modules (HCPV). Firstly, we propose a behavioral modeling of the HCPV module mounted on a dual axis tracker in order to study the influence of the tracking performance on the module power production. Then, this simulator is used to test different control strategies and to compare their performances. A classical control strategy is initially implemented in the simulator. It is based on a hybrid control operating an astronomical calculation to follow the sun path, and a sun sensor to correct the tracking error. Further, a sensorless strategy is proposed in order to reduce the cost of the HCPV tracker control. This strategy is based on a gradient optimization algorithm to generate the tracker trajectory and to catch the sun path. Tested on the simulator, this strategy presents the same accuracy as the classical strategy while being less costly. The last study proposed in this thesis work concerns maximum power point tracking (MPPT) algorithms, in order to answer to a given problem relating to the practical implementation of gradient algorithm. In this context, we propose an original optimization of the P&O MPPT control with a neural network algorithm leading to a significant reduction of the computational cost required to train it. This approach, ensuring a good compromise between accuracy and complexity is sufficiently fast not to affect the quality of the evaluation of the gradient.

**Keywords :** Dual axis tracker, HCPV module, HCPV tracker control, Hybrid control, Gradient optimization algorithm, Tracker simulator, MPPT algorithm, neural network