

République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed BOUDIAF-M'sila



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Polycopie de Cours

Spécialité : Master

Energie renouvelable

Intitulé :

Systemes multi sources à énergies renouvelables

Par le Docteur : Riyadh ROUABHI

M'sila 2021

Auteur

Dr: ROUABHI Riyadh

riyadh.rouabhi@univ-msila.dz

riyadhrouabhi@gmail.com

riyadhrouabhi@yahoo.fr

Faculté/Institut : Faculté de Technologie

Département : Génie Electrique

Etablissement : Université Mohamed BOUDIAF de M'sila – Algérie

Intitulé de la matière : **Systèmes multi sources à énergies renouvelables**

Semestre : 5

Unité d'Enseignement Fondamentale Code: **UEf2.1.2**

Nombre d'heures d'enseignement Cours : **1,5** H TD : **1,5** H TP : ----

Nombre d'heures de travail personnel pour l'étudiant : **3,00**

Nombre de crédits : **4** Coefficient de la Matière : **2**

Description du cours

La consommation et le besoin d'énergie électrique sont en nette croissance dans le monde, l'épuisement progressif des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon...) caractérisées par des émissions du gaz carbonique produit lors de leurs combustions d'une part, et le risque des centrales nucléaires (les radiations d'uranium) avec une production de déchets radioactifs difficiles à traiter d'autre part, sont des problèmes bien réels qui ont poussés les chercheurs à développer d'autres sources d'énergies durables et plus respectueuses de l'environnement. Ces moyens de substitutions dont on parle, sont bien sûr les « énergies renouvelables(ER) ».

Plusieurs pays se tournent de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergies propres et renouvelables, non pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux énergies traditionnelles.

Les énergies renouvelables, en pleine expansion, sont l'un des éléments clés du développement soutenable d'aujourd'hui. Ils offrent la possibilité de produire de l'électricité propre. Parmi les énergies renouvelables, on compte principalement les énergies : hydraulique, solaire thermique, photovoltaïque, éolienne, ainsi que la biomasse et la géothermie.

Afin de résoudre le problème des sources d'énergie renouvelables (la puissance obtenue à partir de ces sources est variable, elle est tributaire aux conditions climatiques), un couplage entre les différentes sources d'approvisionnement pour former un système dit système d'énergie hybride.

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé. Par exemple, les sources d'ER, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante à cause de leurs natures aléatoires. Cependant l'association de ces dernières avec d'autres sources permet d'obtenir une production électrique continue.

Le but de l'enseignement de **Systèmes multi sources à énergies renouvelables** est l'étude d'une manière générale de différentes configurations et architectures de ces systèmes électriques et leurs sources d'énergie composites de ses systèmes. Ensuite, nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïque-éolien-pile à combustible-électrolyseur avec le système de stockage.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les sources d'énergie conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables) et les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies. En suite un état de l'art sur les systèmes d'énergie hybride autonome (systèmes multi sources) où nous présentons les définitions, des différentes architectures des systèmes électriques multi-sources autonomes.

Dans le deuxième chapitre nous donnons une étude descriptive des sources d'énergie qui composent les systèmes d'énergie hybride autonome. En suite connaître la méthode correcte pour le dimensionnement de ces sources et leurs convertisseurs pour reliés à un bus continu, et en fin présenter ses avantages et ses inconvénients.

Le troisième et le quatrième chapitre seront consacré à la modélisation qui décrit le comportement des différentes parties de notre système d'énergie hybride autonome, en suite présenter le système de supervision pour une gestion de l'énergie du système global. Nous terminons ce chapitre par les résultats de simulation du comportement de SEH, face aux variations climatiques et de la charge électrique. Les séries des travaux pratiques (TD ; TP) se trouvent à la fin de chaque chapitre.

Mot clés: énergie, Systèmes multi sources, systèmes d'énergie hybride, renouvelable, non renouvelable, modélisation, système de supervision.

Public Cible

Ce cours est destiné aux étudiants de la **2eme année master (Energie renouvelable)** de l'université Mohamed Boudiaf de M'sila– Algérie.

Objectifs de l'enseignement

Ce cours vise à doter les étudiants des connaissances et compétences requises pour les rendre capable de :

- Comprendre une idée générale sur les sources conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables) et les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies ;
- Connaître les principes de base de fonctionnement des centrales de production d'énergie électrique conventionnelles et non conventionnelles ;
- Présenter un rappel théorique sur les systèmes d'énergie hybride, leurs avantages et leurs inconvénients seront exposés et discutés ;
- Présenter l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable. En suite nous présentons d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre système hybride constitué par les éléments : photovoltaïques(PV) ; éolien ; Pile à Combustible (PàC) ; batterie ; électrolyseur ;
- Présenter la modélisation individuelle de chaque élément de l'architecture complète du système hybride à énergie renouvelable (système multi-sources autonomes)
- Présenter le système de supervision du système hybride à énergie renouvelable constitué par les algorithmes MPPT appliquée sur le générateur photovoltaïque et éolien et les différentes stratégies de gestion proposée de gestion d'énergie.
- Apprendre l'utilisation des logiciels de simulation à savoir : Homer ; Matlab ;

Mode d'évaluation : L'évaluation de l'étudiant se fait par :

1 / Examen de fin de semestre (60%): 2 heures et celui du rattrapage : 2 heures.

Travaux dirigés			Exposés		
Assiduité	Interro	Participation	Interro	Ecrit	oral
/04 pts	/04 pts	/12 pts	/10 pts	/10 pts	/10 pts

2 / Contrôles continus (40%).

CHAPITRE IV

**Dimensionnement et supervision
des systèmes multi sources intégrant
des ressources renouvelables.**

CHAPITRE IV : DIMENSIONNEMENT ET SUPERVISION DES SYSTEMES MULTI SOURCES INTEGRANT
DES RESSOURCES RENOUVELABLES).

IV.1 SYSTEME DE SUPERVISION DU SEH	59
IV.2 DESCRIPTION DES ALGORITHMES MPPT	59
IV.2. 1 CRITERES DE CHOIX DES ALGORITHMES MPPT	59
IV.2. 2 ALGORITHME MPPT POUR LE GENERATEUR EOLIEN	60
IV.2. 2.1 TECHNIQUE D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE (MPPT)	60
IV.2. 2.2 COMMANDE INDIRECTE DE LA VITESSE	61
IV.2. 3 ALGORITHMES MPPT POUR LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	62
IV.2. 3.1 TECHNIQUE D'EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE (MPPT)	62
IV.2. 3.2 LA COMMANDE 'PERTURBATION ET OBSERVATION' (P&O).....	63
IV.3 SYSTEME DE GESTION D'ENERGIE	64
IV.3. 1 STRATEGIES DE GESTION A BASE DE REGLES	64
IV.3. 1.1 REGLES DETERMINISTES	65
IV.3. 1.2 METHODES INTELLIGENTES	65
IV.3. 2 STRATEGIES BASEES SUR L'OPTIMISATION	65
IV.3. 2.1 OPTIMISATION GLOBALE.....	65
IV.3. 2.1 OPTIMISATION EN TEMPS REEL.....	65
IV.3. 3 SYNTHESE DES METHODES DE GESTION D'ENERGIE.....	66
IV.4 SERIE N° 04(EXERCICES SUR LOGICIELS DE SIMULATION : HOMER ; MATLAB)	XX

Objectifs de ce chapitre

L'objectif principal de ce chapitre est présenter le système de supervision du système hybride à énergie renouvelable constitué par les algorithmes **MPPT** appliquée sur les **générateur photovoltaïque et éolien** et les différentes stratégies de gestion proposée de gestion d'énergie, Afin d'atteindre l'objectif principal fixé, différents sous objectifs sont définis comme suit :

- ✓ Apprendre une étude théorique sur les critères de choix des algorithmes d'extraction de maximum de puissance (Maximum Power Point Tracking).
- ✓ Présenter et appliquer l'algorithme **MPPT** sur le générateur **éolien** pour maximiser la puissance captée lorsque la vitesse du vent est inférieure à celle nécessaire pour atteindre la puissance nominale de la turbine.
- ✓ Présenter et appliquer l'algorithme **MPPT** sur le générateur **photovoltaïque** afin d'extraire le maximum de la puissance du système PV.
- ✓ Connaitre la méthode la plus utilisée '**Perturbation et Observation**' (**P&O**) pour maximiser la puissance à la sortie du système PV.
- ✓ Comprendre une idée générale sur les différentes stratégies de gestion à base de règles et les différentes stratégies basées sur l'optimisation.
- ✓ Présenter la classification des différentes stratégies de gestion proposée dans la littérature. Ces différentes stratégies varient avec les différentes architectures de système multi-sources et surtout avec les objectifs recherchés par les utilisateurs.

IV.1 Système de supervision du SEH

L'objectif principal d'un système de production électrique est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, quel que soit les variations de l'énergie produite. Nous avons vu précédemment que les variations de la production sont causées par la nature aléatoire des ressources renouvelables, en plus les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément corrélées avec ces ressources. Nous ne pouvons pas contrôler les conditions climatiques et nous ne pouvons pas imposer au consommateur la quantité d'énergie qui doit être consommée. Par conséquent, une stratégie de contrôle est nécessaire pour gérer d'une manière optimale l'énergie électrique produite afin d'assurer la continuité de service. On peut distinguer deux types différents dans la stratégie de contrôle d'un système de production d'énergie hybride : le contrôle des sources d'ER (PV, éolien) par des contrôleurs MPPT et le système de gestion d'énergie du SEH.

IV.2 Description des algorithmes MPPT

À cause de la nature aléatoire des sources d'énergie renouvelable, en particulier le photovoltaïque et l'éolien, les chercheurs ont développé des stratégies pour extraire le plus d'énergie possible par des algorithmes MPPT quelles que soient les variations dans les conditions climatiques. En général la commande MPPT est une stratégie d'optimisation, elle consiste à la recherche du point de fonctionnement maximal du système et le faire fonctionner dans le voisinage de ce point, ce contrôleur nécessite un convertisseur de commutation afin de contrôler son rapport cyclique.

IV.2.1 Critères de choix des algorithmes MPPT

Actuellement, de nombreuses techniques MPPT sont disponibles dans la littérature. Cependant, il n'est pas évident de choisir le meilleur. Les travaux réalisés dans les références [Ang06] [Nab13] ont définis certains critères de propriété d'une commande MPPT devant être pris en compte afin d'effectuer un choix adéquat parmi les différentes techniques MPPT existantes :

❖ Implémentation

La facilité de mise en œuvre est un facteur important dans le choix des techniques MPPT. La commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important pour favoriser un coût raisonnable.

❖ **Efficacité**

L'efficacité de la technique MPPT est associée à :

- Rapidité de réponse : La commande MPPT doit avoir un bon comportement pour s'assurer que l'adaptation face aux changements des conditions climatiques soit faite le plus rapidement possible;
- Précision de suivi du MPP : Certaines méthodes MPPT oscillent autour du point MPP, par exemple comme dans la méthode perturbation et observation (P&O) d'un système PV, ce qui diminue l'efficacité de l'ensemble du système ;
- Stabilité et robustesse du système : Elle doit pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GPV soit le plus près possible du PPM dans n'importe quelle condition météorologique.

❖ **Coût**

Le coût des dispositifs MPPT dépend des caractéristiques du système, la complexité de l'implémentation et le nombre des capteurs utilisés.

IV.2. 2 Algorithme MPPT pour le générateur éolien

La technique MPPT est une méthode de contrôle de la puissance très fiable, robuste et simple à implanter. Elle consiste à déterminer et à maintenir la vitesse de la turbine à une certaine valeur qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Il existe deux façons pour appliquer cette technique selon le genre de la vitesse de référence qu'elle soit mesurée ou estimée.

Parmi les commandes utilisées, la commande en rapport de vitesse ainsi que la commande en puissance dites méthodes directes, ont besoin d'une vitesse de référence mesurée qui est un inconvénient vu la difficulté d'avoir une mesure exacte et instantanée du vent. Par contre, la commande de vitesse de référence estimée dite méthode indirecte qu'on va appliquer dans notre cas est une méthode adéquate qui n'exige pas une mesure exacte, mais une simple estimation.

IV.2. 2.1 Technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)

Dans cette zone, le but de la commande est de maximiser l'énergie captée du vent pour extraire le maximum de puissance. Pour cela, les deux variables : angle de calage β et la vitesse spécifique λ doivent être maintenues à leurs valeurs optimales β_{opt} et λ_{opt} afin d'assurer un coefficient de puissance maximale (C_{pmax}).

IV.2. 2.2 Commande indirecte de la vitesse

La mesure de la vitesse du vent est généralement faite par un anémomètre monté sur la nacelle. Cette mesure est peu précise car elle donne la vitesse du vent en un seul point de l'espace sachant que le diamètre de la surface balayée par les pales est important, ce qui donne une mesure erronée de la vitesse donc une diminution de la puissance captée. C'est pourquoi, la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse et une estimation de cette dernière est souvent utilisée pour contourner ce problème.

La vitesse du vent sera déduite de l'équation de la vitesse spécifique comme suit :

$$V = \frac{\Omega_T \cdot R_T}{\lambda_{opt}}$$

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

Le couple optimal est :

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^3 \cdot V^2 \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}}$$

En remplaçant la vitesse du vent dans l'équation, le couple optimal devient :

$$C_{Topt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \cdot \Omega_T^2$$

On constate que le couple aérodynamique optimal est proportionnel au carré de la vitesse du rotor :

$$C_{Topt} = k_{opt} \cdot \Omega_T^2 \quad (a) \quad \text{Tel que :} \quad k_{opt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_T^5 \cdot \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3}$$

En régime permanent, l'équation mécanique s'écrit sous la forme :

$$\frac{C_T}{G} - C_g - f \cdot \Omega_g = 0$$

En remplaçant (a) dans l'équation(b), l'équation mécanique devient :

$$\frac{k_{opt}}{G} \cdot \Omega_T^2 - f \cdot \Omega_g - C_g = 0 \quad (b)$$

Avec : $\Omega_g = G \cdot \Omega_T$

Si le couple électromagnétique C_g est commandé de manière à suivre le couple optimal, l'éolienne demeure autour de sa courbe de rendement optimal, le couple devient un couple optimal C_{gopt} .

$$C_{gopt} = \frac{k_{opt}}{G^3} \cdot \Omega_g^2 - f \cdot \Omega_g$$

Cette expression donne le couple qui doit être imposé à la génératrice pour assurer le fonctionnement optimale de l'éolienne. Le schéma bloc de cette structure de commande est donné par la figure ci-dessous [ROUA 15, ROU 15, ROU 14].

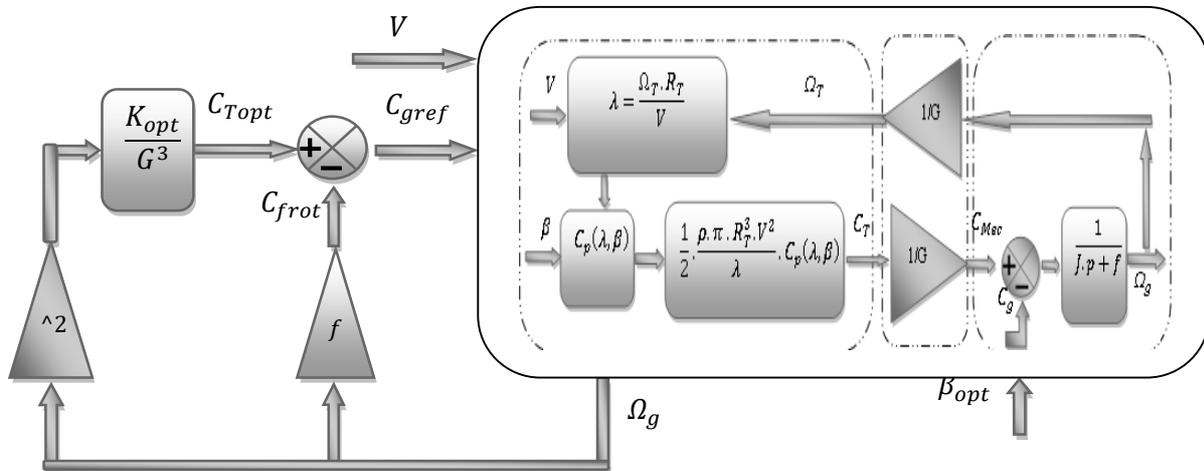


Figure IV-1 Commande indirecte de vitesse.

IV.2. 3 Algorithmes MPPT pour le générateur photovoltaïque

Pour maximiser la production de générateur photovoltaïque, nous devons appliquer un algorithme de suivi du point de puissance maximale, couramment nommé MPPT.

IV.2. 3.1 Technique d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)

Par définition, la commande MPPT est une stratégie d'optimisation, elle consiste à la recherche du point de fonctionnement maximal du système et le faire fonctionner dans le voisinage de ce point. Une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp} , I_{mpp}). L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure suivant :

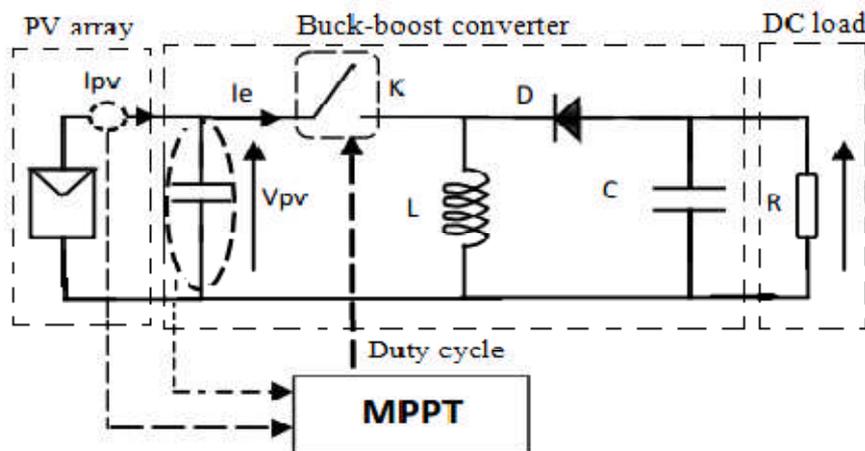


Figure IV-2 : Chaîne élémentaire de conversion PV avec commande MPPT.

IV.2. 3.2 La commande ‘‘Perturbation et Observation’’ (P&O)

L’algorithme Perturbation et Observation est le plus utilisé dans les systèmes PV, en raison de sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. Comme son nom l’indique, la méthode P&O est basée sur la perturbation du système à travers l’augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement de module PV avec un pas fixe où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis en observant son effet sur la puissance de sortie du module.

La figure IV-3 présente l’organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k - 1)$ alors nous gardons la même direction de perturbation précédente sinon nous inversons la perturbation du cycle précédent [Dja14] [Ben11] [Dah15].

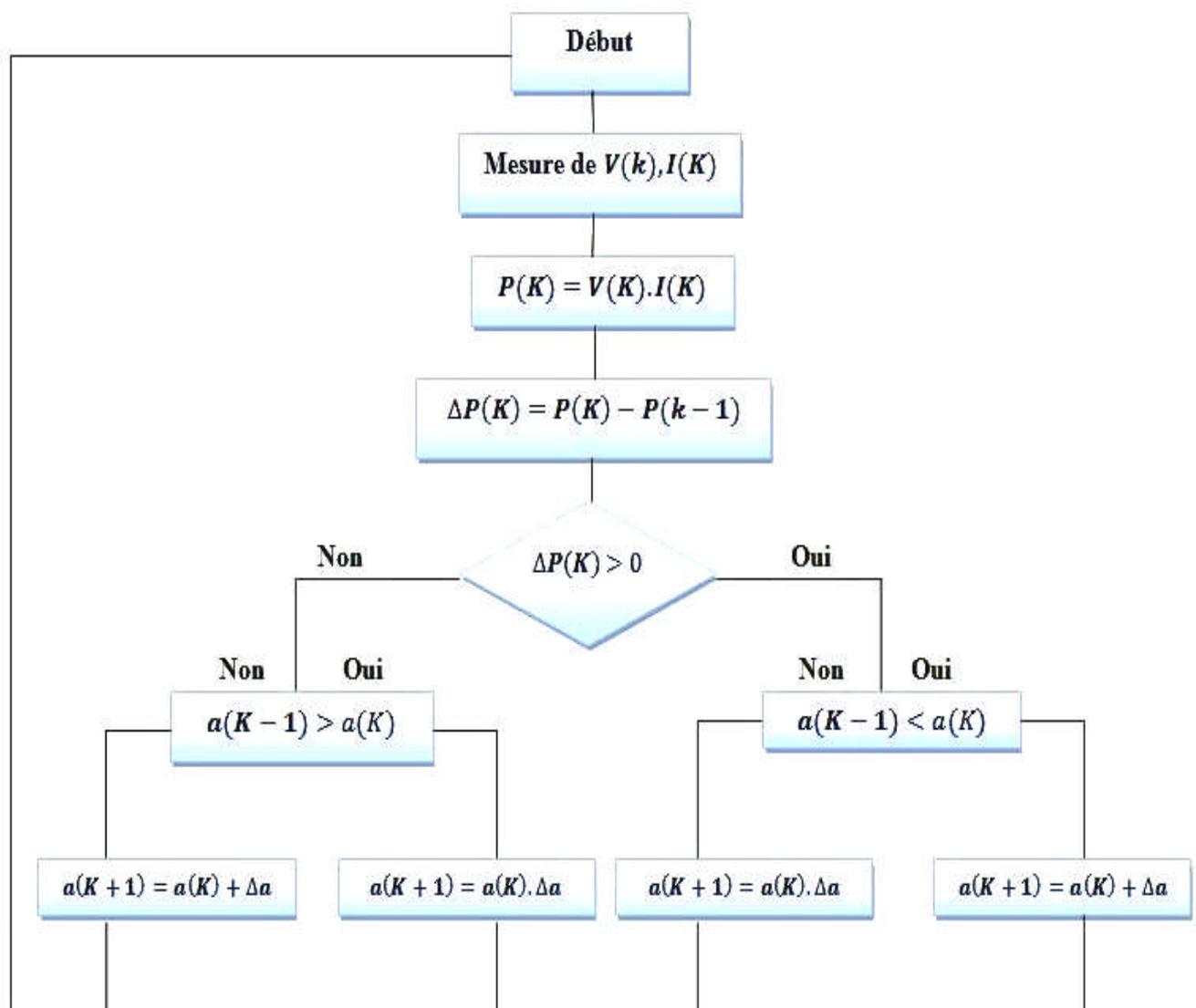


Figure IV-3 : Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O).

IV.3 Système de gestion d'énergie

Afin d'améliorer le rendement du système multi-sources, il faut assurer l'exigence de la charge sans interruption, protéger le système de stockage (l'élément clef dans les SEH) contre les surcharges et les charges profondes. Par conséquent, prolonger sa durée de vie et optimiser au mieux la répartition de la puissance entre les différents éléments qui constituent le SEH, tout en réduisant la consommation du carburant et le coût du système. Une stratégie de gestion de l'énergie est nécessaire. Les stratégies de gestion de l'énergie peuvent être classées en deux grandes familles :

- Stratégies à base de règles
- Stratégies basées sur l'optimisation

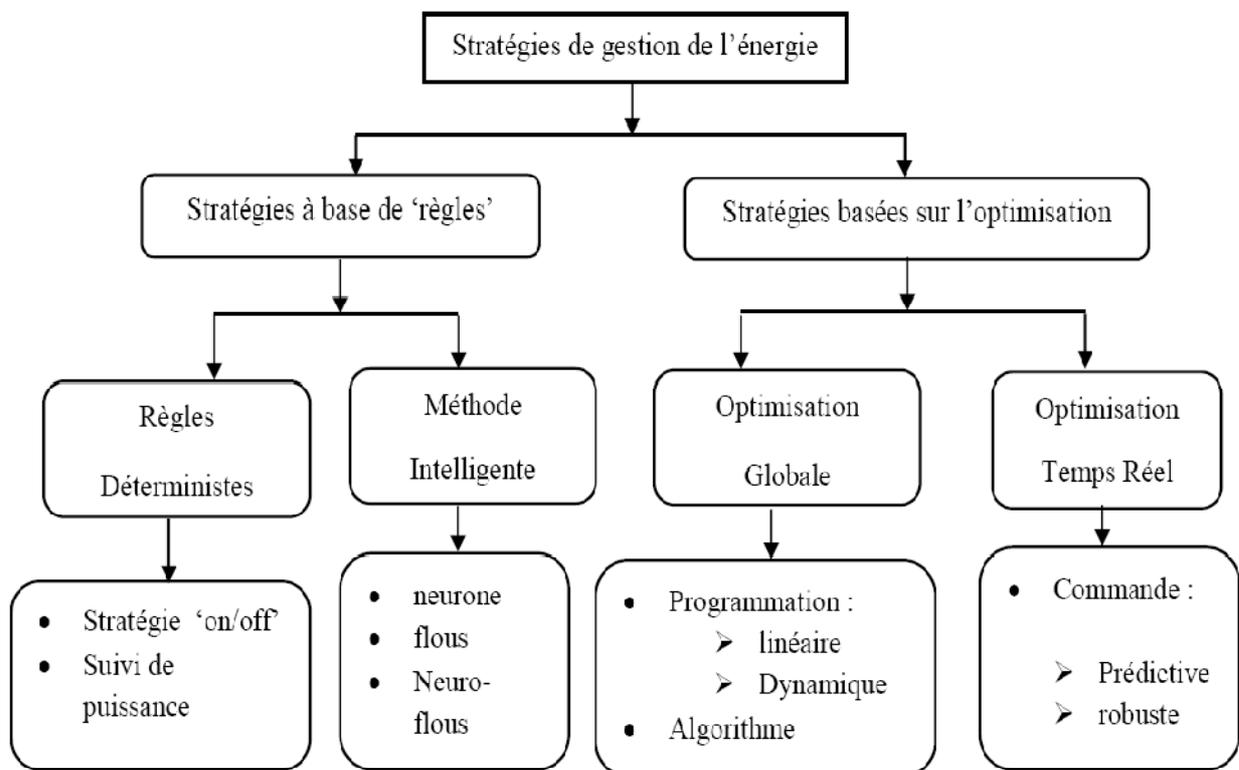


Figure IV-4 : Classification des stratégies de gestion d'énergie.

IV.3. 1 Stratégies de gestion à base de règles

Elles peuvent être facilement implémentées avec un contrôle de supervision en temps réel. Les lois de gestion d'énergie à base de règles ne disposant pas de connaissance à priori sur le besoin énergétique d'un consommateur ou sur les conditions climatiques, elles sont définies au préalable, sur la base d'une estimation ou sur l'analyse du comportement des composants du système. Elles peuvent être établies par des règles déterministes ou par des règles floues.

IV.3. 1.1 Règles déterministes

Les règles sont fixées en lien direct avec l'objectif. On peut citer dans cette catégorie la méthode de la stratégie "On/Off" qui est connue pour son efficacité, sa robustesse et son fonctionnement en temps réel.

IV.3. 1.2 Méthodes intelligentes

Il convient d'utiliser cette technique lorsque la modélisation du système est difficile ou lorsqu'il est très complexe à appréhender. On peut citer dans cette catégorie le contrôle par la logique floue, qui permet une meilleure compréhension de la gestion d'énergie. En effet, elles sont considérées comme une amélioration des règles déterministes. Le régulateur par logique floue ne traite pas de relations mathématiques, mais utilise plutôt des inférences avec plusieurs règles. Deux façons existent pour l'élaboration de ces règles:

- à base de l'expertise humaine et à la connaissance du profil.
- à base des données générées par l'algorithme génétique ou par l'utilisation des valeurs de la programmation dynamique.

IV.3. 2 Stratégies basées sur l'optimisation

Dans ce cas, le problème de la gestion d'énergie d'un SEH revient à trouver la meilleure manière de répartir, stocker et consommer l'énergie afin de satisfaire la demande. De telle sorte à minimiser le coût du système et optimiser la consommation de carburant. Dans ces stratégies, on distingue deux catégories :

IV.3. 2.1 Optimisation globale

L'utilisation des algorithmes d'optimisation globale ou hors ligne sont destinées à la résolution de problèmes d'optimisation difficiles et avec contraintes. Les stratégies de gestion d'énergie basées sur l'optimisation hors ligne nécessitent la connaissance à priori du profil de charge pour trouver la meilleure répartition de puissance entre les sources d'énergie. Cela rend l'implémentation de ces stratégies d'optimisation globale en temps réel irréalisable.

IV.3. 2.1 Optimisation en temps Réel

Afin de pallier les inconvénients des méthodes d'optimisation globale, les chercheurs proposent des stratégies d'optimisation en temps réel permettant d'obtenir une commande des flux énergétiques en temps réel et ne nécessitent pas la connaissance du profil de charge par avance.

IV.3.3 Synthèse des méthodes de gestion d'énergie

Comme nous l'avons déjà mentionné, il existe plusieurs stratégies de gestion d'énergie pour une SEH. Ces méthodes varient selon leur complexité, de différentes topologies et de mise en œuvre du matériel. Néanmoins, l'objectif de ces techniques de gestion d'énergie traite l'échange et la distribution du flux des puissances électriques entre les sources d'énergie et le consommateur tout en optimisant le système. En résumé, le Tableau IV.1 présente une synthèse des différentes familles de méthodes en fonction de différents critères.

Tableau IV.1 Synthèse des méthodes de gestion d'énergie.

Critère de comparaison		Simplicité	Temps de calcul	Robustesse	Profil inconnu
Stratégies à base de règles	Règles déterministes				
	Méthodes intelligentes				
Stratégies à base d'optimisation	Optimisation Globale				
	Optimisation Temps Réel				

Dans notre système, Nous nous sommes adaptés à la stratégie de gestion à base de règles déterministes floue.

IV.4 Série n° 04 (Exercices sur logiciels de simulation : Homer ; Matlab)