

---

# Etat de l'art de la gestion de puissance dans les systèmes hybrides

## Introduction

Pour faire face aux enjeux du changement climatique, à l'augmentation de la demande énergétique, à la raréfaction des combustibles fossiles ainsi qu'à leurs cours fluctuants, et leurs effets néfastes sur l'environnement, de nombreux pays à travers le monde ont changé leurs politiques énergétiques. La première stratégie est de faire des économies d'énergie. À titre d'exemple, l'union européenne vise à diminuer de 20 % la consommation d'énergie, en appliquant des programmes axés sur la réduction de la consommation et en privilégiant l'efficacité énergétique dans le secteur industriel et tertiaire [1], [2]). La seconde stratégie consiste à utiliser des sources d'énergie renouvelables, non seulement pour la production d'énergie à grande échelle, mais aussi pour les systèmes autonomes. Ces ressources sont connues pour être moins compétitives que les systèmes de production traditionnels, principalement en raison de leurs coûts relativement élevés. En outre, le caractère aléatoire et discontinu de ces énergies les rend difficiles à maîtriser et il est nécessaire de caractériser le plus précisément possible les variations de ces ressources. Toutefois, elles présentent plusieurs avantages, tels que la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et la réduction des émissions à effet de serre dans l'atmosphère. L'influence de leur nature aléatoire peut être diminuée avec le couplage de deux ou plusieurs sources d'énergie, renouvelables ou pas, connectées à un réseau électrique ou alimentant une charge isolée (système autonome), dans un Système Hybride à Sources d'Énergie Renouvelable (SHSER) .

## I. Contexte et objectifs de la thèse

Les réseaux électriques actuels sont inéluctablement destinés à connaître de profondes mutations dans les prochaines années. L'arrivée à maturité des diverses technologies de génération électrique va favoriser la mutation des réseaux électriques que ce soit à l'échelle nationale ou européenne. Ces mutations s'étendront parfois jusqu'aux clients finaux (secteur tertiaire ou résidentiel). La Figure 1-1 montre un réseau électrique intégrant de nouveaux modes de production. Plusieurs types d'acteurs sont amenés à interagir au sein d'un réseau électrique. Les producteurs assurent les générations de la

puissance électrique grâce à des centrales de production d'électricité. Lorsque ces centrales sont de type thermique ou nucléaire utilisant des énergies fossiles (fuel, charbon, gaz), elles constituent des sources de puissance non renouvelables dans le sens où la consommation de ces énergies est plus rapide que leur renouvellement naturel. A contrario, lorsque ces centrales sont de type hydroélectrique, solaire, éolien ou encore fondées sur la biomasse, ces sources sont considérées comme renouvelables.



Figure 1-1 Intégration de nouveaux modes de production dans les réseaux électriques (source : *Institute for Energy and Transport*)

L'électricité est très difficile à stocker. Il est nécessaire à tout instant d'équilibrer le réseau, en d'autres termes de s'assurer que la production (l'électricité injectée sur le réseau par les producteurs, c'est-à-dire l'offre d'électricité) est égale à la consommation (l'électricité soutirée sur le réseau par les consommateurs, c'est-à-dire la demande d'électricité). Si l'écart entre production et consommation augmente trop, le réseau subit des écarts de fréquence et de tension dommageables pour les équipements du réseau et ceux des consommateurs. Les conséquences peuvent aller jusqu'à la déconnexion de certaines branches du réseau (entraînant la coupure du courant chez certains consommateurs), voire l'incident généralisé (blackout). C'est ce type d'incident qui s'est produit le 4 novembre 2006, lorsque des problèmes survenus sur le réseau allemand ont provoqué une rupture de plusieurs heures de l'alimentation de 15 millions d'Européens.

Les évolutions que connaissent l'offre et la demande d'électricité ont rendu leur ajustement plus complexe. Fini le réseau traditionnel où il s'agissait d'ajuster la production centralisée à la demande ; il s'agit désormais de plus en plus d'ajuster la production centralisée, la production décentralisée, la production issue de moyens de stockage décentralisés et enfin les éventuelles importations et exportations à une demande rendue plus flexible et pilotable. Cet ajustement devient d'autant plus

difficile que l'offre d'énergies renouvelables ne concorde généralement pas avec la demande, ni sur une journée, ni sur une période temporelle. La Figure 1-2 illustre cette non-concordance de l'offre éolienne (en bleu) et de la demande (en rose) mesurées à un poste source.

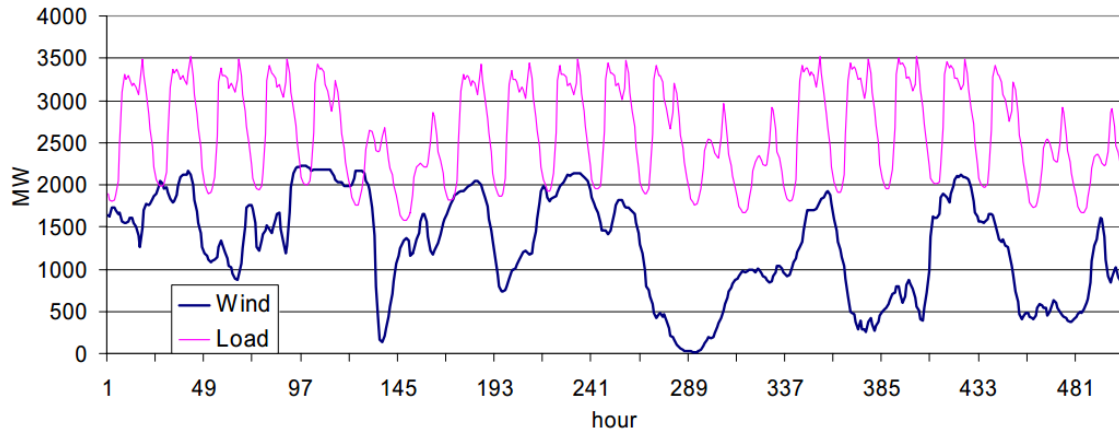


Figure 1-2 Comparaison de l'offre éolienne à la demande (source RTE)

Compte tenu du contexte décrit ci-dessus, l'insertion massive des énergies renouvelables dans les réseaux électriques n'est pas aisée. Afin de faciliter leur intégration, il est indispensable de disposer de sources flexibles capables de réduire l'écart entre l'offre et la demande. Ainsi, l'interconnexion de petites productions, indépendantes et de technologies très différentes présente un vaste champ de recherche : contrôle/commande, électronique de puissance, recherche de point optimal (*MPPT*: *Maximum Power Point Tracking*), tenue aux défauts, réglage de fréquence...etc. La problématique de la gestion de la puissance est l'une de ces thématiques de recherche et de développement qui peut se révéler déterminante pour favoriser techniquement et économiquement ces nouveaux modes de génération de la puissance. Parmi ces différentes technologies, on peut citer les éoliennes et les panneaux photovoltaïques. Compte tenu de la variabilité de ces ressources, voire de leurs non disponibilité, il est intéressant, pour améliorer la continuité de la fourniture en puissance, de les associer à des sources de stockage et/ou des sources classiques (diesel...etc.) ou émergentes (microturbine à gaz...etc.). La mise en place d'un superviseur qui coordonne toutes ces sources est nécessaire pour assurer un bon fonctionnement du système multisources. Afin d'étudier le comportement de ces systèmes de production, des modèles reposant sur les lois fondamentales de la physique doivent être développés. Il est alors intéressant d'utiliser ces modèles comme base pour l'optimisation de la gestion de la puissance. Cela permettra de prendre en compte la dynamique intrinsèque de chaque élément de la cellule multisources. En outre, une des problématiques qui entrave l'intégration massive des ressources renouvelables dans les réseaux est leurs caractères stochastiques et leurs prédictibilités limitées. Des

méthodologies innovantes de gestion qui considèrent tous ces aspects sont nécessaires. L'objectif principal de la thèse est de développer une méthodologie de supervision des cellules multisources avec une pénétration importante des ressources renouvelables associées à un élément de stockage de type batterie ainsi qu'une source contrôlable (Microturbine à gaz). De nombreux opérateurs considèrent encore les ressources renouvelables comme des charges négatives, explicitement la puissance d'origine renouvelable est considérée comme une perturbation qui s'ajoutera à la charge, ce qui est tout à fait acceptable dans le cas de faibles pénétrations de ces ressources renouvelables. Or, l'Union Européenne a pour ambition d'accélérer sensiblement la croissance de l'énergie renouvelable et propose d'intégrer dans sa palette énergétique une part de 20 % de sources d'énergie renouvelables d'ici 2020. A l'horizon 2050, le projet DESERTEC [3] vise à produire 15 % de la production d'électricité à partir de l'énergie solaire. En outre, les algorithmes actuels de gestion de la puissance sont basés sur des algorithmes d'optimisation déterministes, où la demande et la production sont supposées connues. Avec un taux de pénétration élevé des ressources renouvelables dans le réseau, leurs évolutions futures doivent être utilisées afin d'avoir une solution proche du cas optimal. L'optimisation déterministe doit servir uniquement comme référence pour évaluer la performance d'une stratégie par rapport à une autre. Il est donc important de tenir compte de ces futures variations lors de la formulation du problème d'optimisation, surtout lorsque les prévisions s'affinent. En outre, la complexité des systèmes multisources ne permet pas d'envisager une optimisation globale du fonctionnement (approche déterministe) et il est nécessaire de définir des approches modulaires pour assurer l'efficacité.

Classiquement, les fonctions coût sont choisies pour minimiser uniquement le coût de l'énergie, or dans un contexte de système multisources, la fonction coût doit non seulement tenir compte des performances de coût et de performance mais aussi des considérations liées aux éléments du système multisources (vieillessement, émissions polluantes, rendement ...etc.). Tous ces aspects (prévisions à court terme, modèles dynamiques, fonction coût adaptée au système multisources, contraintes .....) peuvent être pris en compte par une approche de type commande prédictive. L'objectif est donc de mettre en œuvre un superviseur qui utilise les modèles dynamiques de chaque élément de la cellule multisources dans une architecture de commande prédictive et qui permettra de gérer l'installation pour des dynamiques allant de la seconde à plusieurs centaines de secondes en fonction de la pertinence des prévisions.

## II. De l'intérêt de l'hybridation des sources

### II.1. Constitution d'une centrale multi-source

L'époque des centrales de plus en plus grandes semble parvenue à son terme. Les réseaux de transport et de distribution commencent à s'ouvrir à des producteurs indépendants mettant en œuvre des centrales généralement hybrides, moins coûteuses et plus efficaces. La production de l'électricité semble ainsi effectuer un retour en arrière, lorsque l'essentiel de l'énergie électrique était générée localement par de petits systèmes isolés en vue de son utilisation directe. Un système hybride regroupe l'ensemble des alimentations électriques assurées par le couplage de deux sources (ou plus) de natures différentes. L'hybridation de sources permet de rationaliser l'utilisation de la source principale ou de fournir un complément de puissance lorsque cette dernière atteint sa puissance de saturation et de stocker le surplus de la puissance, et surtout d'introduire un degré de liberté supplémentaire afin de mieux gérer la puissance en améliorant le rendement global du système. Compte-tenu des progrès obtenus dans l'augmentation des densités d'énergies et en cyclabilité des supercapacités et des batteries ([4]), ces deux éléments facilitent le développement de cette hybridation mais leur conception n'est pas aisée et leur durée de vie est faible, notamment pour les batteries. L'hybridation permet ainsi :

- de lisser la puissance ,
- d'augmenter la fiabilité,
- réduire la taille du stockage,
- réduire les coûts de production.

Ce sont les raisons pour lesquelles les systèmes électriques sont de plus en plus ou souvent alimentés par une source d'énergie principale (panneaux photovoltaïques, groupes électrogènes.... ) hybridée par une ou plusieurs sources auxiliaires ([5] [6] [7] [8]). Cela est tout particulièrement le cas des systèmes en partie ou totalement autonomes vis-à-vis du réseau de distribution. On parle alors d'un **système multi-sources**. Par contre les principaux inconvénients d'un tel système est la complexité, le choix difficile de ses sous-systèmes et la difficulté à gérer le niveau de la puissance.

Afin d'atténuer le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné (vent, solaire...) une combinaison hybride de deux ou plusieurs technologies différentes avec un système de stockage ou des unités de générations classiques peut améliorer la performance du système. Par exemple, les panneaux photovoltaïques et les éoliennes sont complémentaires pour une zone donnée (site venté l'hiver, et ensoleillé l'été). En général, les systèmes multi-sources transforment toutes les sources primaires (fuel, vent, rayonnement solaire...) en une seule forme d'énergie (électrique) et/ou stockent cette énergie sous une autre forme (chimique, air comprimé, volant d'inertie ...etc.). Afin d'accroître la

fiabilité des systèmes multi-sources, le choix de la technologie et le dimensionnement sont deux facteurs essentiels qui permettent d'améliorer les performances globales [9].

Ainsi, leur dimensionnement doit permettre de maximiser les performances, tout en limitant le nombre d'éléments, mais leur gestion doit intégrer une surveillance de leur état de fonctionnement interne comme l'état de charge pour veiller à ne pas dégrader leur durée de vie et éviter tout accident. On se retrouve alors dans un cas précis où la gestion de la puissance et le dimensionnement sont étroitement liés et doivent être traités conjointement.

D'un point de vue économique, l'hybridation des sources permet de satisfaire une charge locale sans être contraint à construire de nouvelles lignes de transport d'électricité [10]. Les éléments du système hybride peuvent être installés en un délai très court, dans n'importe quelle localisation. Cependant, certaines sources renouvelables qui peuvent faire partie du système hybride telles que les panneaux solaires et les éoliennes peuvent requérir certaines conditions (site bien venté,...etc.). Dans les systèmes autonomes éloignés, les systèmes hybrides peuvent être plus économiques. Hybrider les sources peut avoir un impact positif sur la durée de vie des éléments qui le constituent et réduire la consommation de fuel ou de tout autre combustible. D'un point de vue opérationnel, plusieurs travaux ont montré les effets bénéfiques des systèmes multisources sur le profil de la tension et les problèmes de la qualité de puissance [11].

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, la nécessité de protéger l'environnement et de réduire la dépendance aux énergies fossiles a poussé de nombreux pays à changer leur politique concernant la production d'électricité. L'arrivée à maturation de plusieurs nouvelles technologies va favoriser cette mutation. Ces technologies comprennent, la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables, comme le vent, le photovoltaïque, les centrales hydrauliques, la biomasse, la géothermie, les vagues océaniques et les marées, ainsi que les sources « propres », c'est-à-dire dont la répercussion est moindre sur l'environnement comparativement aux sources de production classiques. On peut citer les microturbines à gaz et les piles à combustible. Elles peuvent être considérées comme renouvelables si le combustible lui-même utilisé est renouvelable (cas de la microturbine) où l'hydrogène est produit à partir d'une source renouvelable (cas de la pile à combustible). Bien qu'elles soient polluantes, les génératrices Diesel sont encore couramment utilisées, même pour des gammes de puissance relativement élevées, en particulier dans les régions éloignées et les systèmes autonomes. Les génératrices Diesel sont bon marché et ont un rendement relativement bon et peuvent avoir un impact moins nocif sur l'environnement si elles sont alimentées par un bio-carburant.

La Figure 1-3 montre une liste non exhaustive des éléments qui peuvent être intégrés dans un micro réseau. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux cellules qui comportent à la fois des

technologies émergentes et volatiles, des générateurs traditionnels et une unité de stockage de l'énergie. Dans ce qui suit, on décrira succinctement quelques-unes de ces technologies.

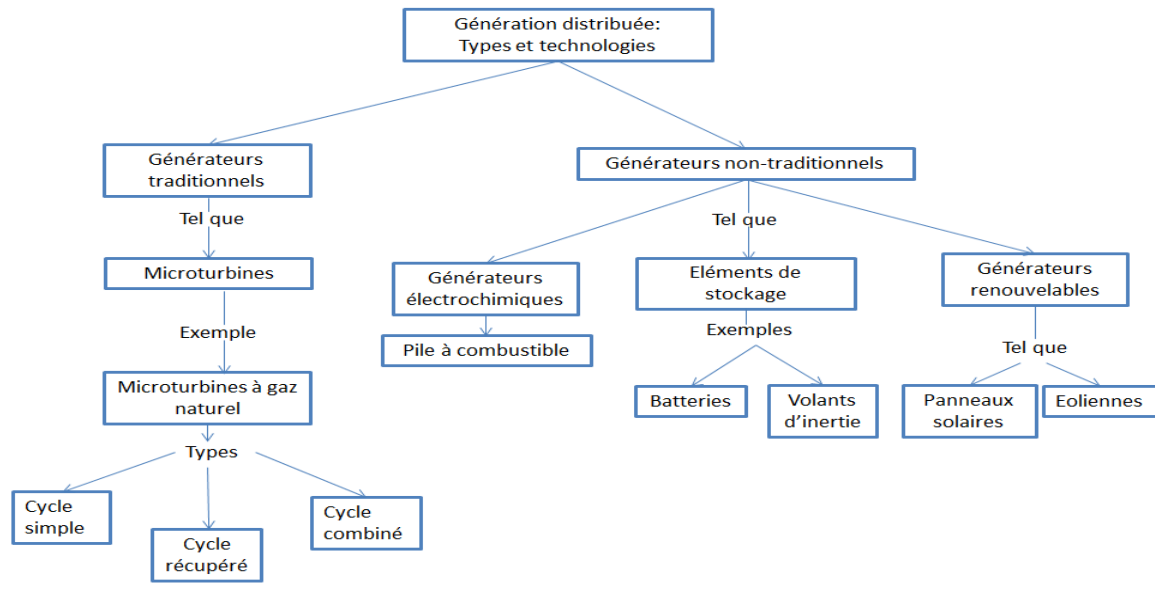


Figure 1-3 Exemple des éléments constituant un système hybride

## II.2. Quelques éléments d'une centrale multi-source

### a- Générateurs à combustion traditionnels (Microturbine )

Les microturbines sont des turbines de petite taille qui peuvent fonctionner au gaz naturel, au propane ou au fuel. Elles sont constituées d'un compresseur, d'une chambre à combustion, d'une turbine et d'un générateur. Le générateur et la turbine sont souvent montés sur le même axe. Contrairement aux turbines traditionnelles, les microturbines fonctionnent à des températures et pressions moins élevées et tournent à des vitesses très élevées (100.000 tours/minute). Elles peuvent être installées facilement, ont un bon rendement global (80%), et de très faibles émissions polluantes, notamment en oxyde d'azote  $NO_x$ . En outre, les microturbines sont connues pour leur dynamique rapide et ont de très bonnes performances concernant la poursuite de la charge. La chaleur produite peut être utilisée pour satisfaire les besoins en chauffage [12]. La figure I.4 montre les principaux avantages d'une microturbine. Les microturbines à gaz sont des turbines à combustion qui produisent des gaz de très haute température et pression. Ce gaz est utilisé pour faire tourner l'axe de la microturbine qui entraîne le compresseur et l'alternateur. Nous allons aborder en détail le principe de fonctionnement de la microturbine au cours du chapitre II.

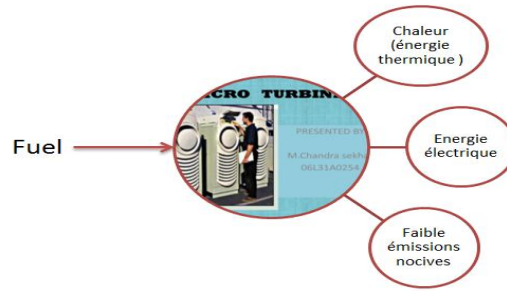


Figure 1-4 Avantages de l'utilisation des microturbines

### **b- Eléments de stockage (batterie, super capacité, volant d'inertie....)**

Parmi tous les éléments de stockage on peut citer les batteries et les supercapacités. Elles sont généralement chargées lorsque la demande en puissance est faible et déchargées quand la demande est importante, et sont combinées avec d'autres types de systèmes de production d'énergie. Les batteries sont dotées d'un contrôleur de charge qui permet de les protéger contre les surcharges et les décharges excessives. La taille de ces batteries détermine la durée de la période de décharge. Dans le chapitre II, on détaillera le fonctionnement de la batterie, leurs différentes classes...etc.

### **c- Technologies renouvelables (panneaux photovoltaïques, éolienne,...)**

L'épuisement inéluctable des ressources fossiles, associée à une volonté de réduction du taux de  $CO_2$ , conduit naturellement à introduire une diversification de la production électrique reposant sur des générateurs à base d'énergie renouvelable, au côté des groupes électrogènes diesel jusqu'à présent uniquement utilisés dans les micro réseaux. Comparés aux unités de production centralisée (centrale nucléaire, ...), les générateurs à base d'énergie renouvelable sont de très petites puissances en raison du dimensionnement du système de conversion primaire (surface des panneaux photovoltaïques (PV), longueur des pales, ...). Par contre, ce dimensionnement favorise les installations sur un réseau de distribution chez les particuliers et donc en très grand nombre. La croissance de ces filières renouvelables devrait rester très soutenue et ainsi continuer d'augmenter leur part dans la production d'électricité mondiale. En premier lieu, ces technologies ont fait énormément de progrès, que ce soit sur le plan de la fiabilité, ou sur le plan de leur capacité à réduire leurs coûts de production. Ces progrès ont attiré de nouveaux investisseurs intéressés par les perspectives de développement. Ceux-ci ont permis d'augmenter la taille des projets d'énergies renouvelables et donc d'accroître très rapidement le productible de ces filières.



### **III. De la gestion de la puissance dans les systèmes hybrides**

À cause de leur caractère aléatoire et intermittent, les énergies renouvelables posent des difficultés de gestion aux opérateurs de systèmes électriques. Le problème s'aggrave d'autant plus lorsque le niveau de pénétration des énergies renouvelables est important sur le réseau électrique. Comme tout moyen de production, les unités de production d'énergie renouvelable doivent respecter un certain nombre de contraintes techniques liées au fonctionnement des systèmes électriques pour être connectées au réseau. Certaines contraintes vont être redéfinies en tenant compte des spécificités liées à la production renouvelable (les capacités de réglage de la fréquence par exemple ne sont pas encore exigées au niveau des unités de production). Pour cela, une solution est d'utiliser en parallèle d'autres moyens de production d'énergie (hors énergies renouvelables) avec comme principal enjeu la gestion optimale de l'énergie. Dans un futur proche, le gestionnaire de réseau devra disposer d'outils de prédiction des productions éoliennes et photovoltaïques. A terme, la prédiction de la production électrique pourra être un outil décisionnel pour les producteurs et le gestionnaire de réseau, que ce soit dans le cas des systèmes insulaires ou dans le cas général des marchés de gros électriques). Pour les petits réseaux insulaires, la prédiction de production intermittente sera couplée avec des systèmes de stockage [13]. De plus, une réduction de l'intermittence et de la variabilité de la production pourra être assurée par une multiplication de sources éloignées, procédé appelé foisonnement géographique. Ainsi, le stockage, le foisonnement et la prédiction des énergies intermittentes devraient permettre une meilleure intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques. Leur prédiction permettra de prévoir les réserves énergétiques qui prendront le relais pour préserver la sécurité du système.

#### **III.1. Supervision multiniveaux des centrales multi-sources**

La subdivision de la supervision en plusieurs niveaux est due principalement à trois éléments : l'existence de fortes incertitudes, les caractéristiques des moyens de production et les contraintes du fonctionnement du réseau. Un contrôle au plus près du temps réel est nécessaire, car les prévisions sont moins incertaines. En outre, les contraintes techniques des centrales de productions ne permettent pas de répondre rapidement à la demande, d'où la nécessité de prédire les variables, avec un horizon plus ou moins long, en fonction de la dynamique de la centrale de production. Ces caractéristiques des moyens de productions (centrale nucléaire, thermique...), obligent les acteurs du réseau à résoudre des calculs d'optimisations, sur une période assez longue afin de pouvoir prendre en considération les dynamiques nécessaires. Enfin, les contraintes imposées par le gestionnaire du réseau doivent être respectées en temps réel. Le problème majeur de l'ensemble des acteurs du système électrique et plus particulièrement de l'exploitant est de maintenir l'équilibre entre l'offre disponible et la demande. Pour satisfaire cet

objectif, quatre types d'actions sont réalisés à différents horizons : Niveau 3 (années), Niveau 2 (1 jour à plusieurs jours), Niveau 1 (10 à 15 minutes), Niveau 0 (très près du temps réel). Bien que ces niveaux soient interdépendants, leur séparation est principalement faite afin de réduire les efforts de calcul du problème. Une part des algorithmes de conduite d'un grand réseau électrique concerne en effet l'optimisation économique du fonctionnement. Ce sont essentiellement les problèmes suivants, classés de l'horizon le plus long au contrôle près du temps réel: Unit Commitment (UC), dispatching économique (Economic Dispatch : ED), et le contrôle dynamique, correspondant aux niveaux précités [14]. Les points communs des algorithmes cités sont :

- Formulation sous forme d'un problème d'optimisation sous contraintes ;
- la nature des contraintes d'égalité de type lois de Kirchhoff, bilans d'énergie ;
- la nature des contraintes d'inégalité correspondant à un domaine de fonctionnement admissible (limitation des ressources, sécurité).

D'autre part, les fonctions objectifs peuvent être de différents types : critères économiques (coût total de production), déviation minimale par rapport au point courant, qualité du plan de tension, etc. La 1.5 montre les algorithmes associés à chaque niveau temporel.

**Remarque :**

Le problème de la coordination optimale des moyens de réglage d'un réseau pour assurer un critère de qualité en régime permanent est souvent appelé Répartition des Flux de Puissance Optimale ou Optimal Power Flow (OPF) dans la littérature anglo-saxonne [15]. Il s'agit d'un processus d'optimisation, centré autour d'une fonction objectif à minimiser. *L'Optimal Power Flow* s'appuie sur un calcul de répartition des charges, ou *Load Flow* en anglais, pour connaître l'état électrique du réseau. Ce terme OPF avait été choisi dans les années 1970 pour désigner les optimisations à buts économiques (Unit Commitment, Economic Dispatch,...) pour le dispatching (répartition des consignes de production), c'est-à-dire l'équilibre production-consommation aux pertes près et à moindre coût. De nos jours, on désigne par le terme OPF, tout processus d'optimisation lié à la gestion des réseaux (reconfiguration, diminution des pertes, dispatching économique entre autres).

La Figure 1-5 montre les opérations ayant lieu en fonction de l'horizon de prédiction. Les détails des opérations réalisées dans chaque niveau sont décrits dans la suite.

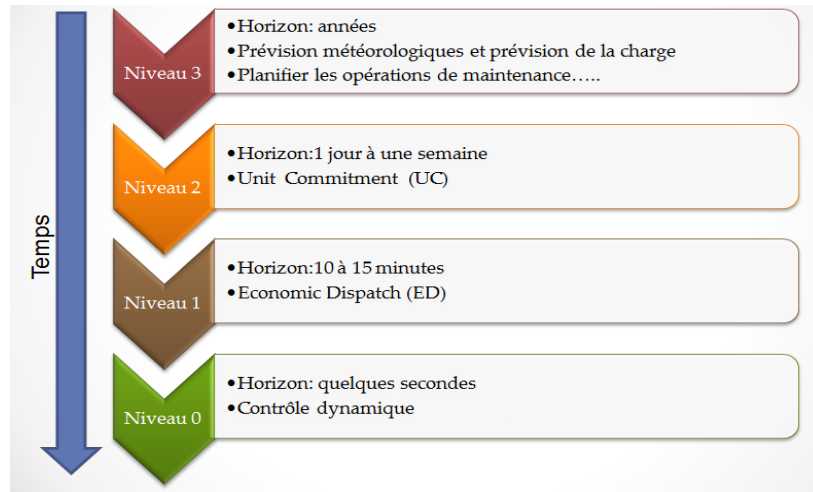


Figure 1-5 Gestion de l'énergie d'un système hybride, sur plusieurs niveaux selon l'échelle de temps

### III.2. Supervision à moyen terme et long terme

#### *Niveau 3 (horizon : une année à plusieurs années)*

Ce niveau concerne les horizons longs terme voire très long terme. Les prévisions à très long terme permettent de connaître les investissements à réaliser au niveau des moyens de production et de transport. Il s'agit donc de planifier dans le but de mettre en évidence les besoins en investissement du système électrique production-transport. Dans le cas d'une cellule multisources, la supervision pluriannuelle prévoit la production de chaque élément en fonction des cycles annuels de demande et des programmes de maintenance [16].

#### *Niveau 2 (horizon : 1 jours à une semaine)*

A un horizon proche, de la veille du jour donné par exemple, il s'agit de prévoir tout d'abord les dates de mise en service des ouvrages, puis les besoins en combustibles, les consignations des ouvrages pour maintenance et le plan de charge pour les groupes. Toutes ces opérations reposent sur des prévisions de consommation et éventuellement de la production renouvelable, affinées au fur et à mesure qu'on se rapproche du jour donné. La prédiction à la période  $j+1$  est importante pour le gestionnaire car elle a une application industrielle immédiate. Par exemple, dans le cadre de l'interconnexion SACOI (liaison à courant continu Italie-Corse-Sardaigne), il faut être capable d'organiser la gestion des stocks fossiles. En fait, la mise en œuvre des moyens de production thermique EDF dure environ 30 min, il faut donc être capable de prédire les baisses d'énergie intermittentes au moins 1 heure à l'avance. Le système de pilotage, visant à l'optimisation du fonctionnement du microréseau du point de vue technique, économique ou écologique, s'exerce au

niveau supérieur, sur la base des informations disponibles (état du réseau, disponibilité des générateurs, prévisions de consommation, tarifs en vigueur, etc.) et détermine le programme de génération des prochaines heures. Le nom usuellement utilisé pour désigner cette problématique est *l'Unit Commitment Problem* ou problème d'engagement des unités. Le problème d'engagement des unités consiste à choisir les unités de production qui seront opérationnelles sur une échelle de temps discrétisée, de manière à minimiser le coût de production total [17]. Il sert aussi à déterminer les unités de production à démarrer ou arrêter ainsi que les niveaux de production prévisionnels pour chaque sous-période de l'horizon de programmation, tout en maximisant le profit du parc de production. Programmer les unités pour un horizon de temps dans le futur sous la présence d'incertitudes signifie que des prévisions devront être faites sur certains paramètres qui ne sont pas connus de manière certaine au moment de la programmation. Par exemple, la production des éoliennes est entachée d'incertitudes. Les unités doivent satisfaire la charge ainsi que la réserve tournante, c'est-à-dire une réserve de puissance permettant d'assurer la stabilité du réseau ou des services (réglage de fréquence). De plus, chaque unité possède ses propres limites de production. Il s'agit donc d'un problème d'optimisation linéaire mixte (discret / continu), sous contraintes (*MILP : Mixed Integer Linear Programming Problem*). Les méthodes de résolution de ce problème seront détaillées dans le paragraphe V.

Pour résumer, il faut définir à moindre coût :

- l'ordonnancement d'allumage/extinction de chaque centrale sur toute la période considérée
- la production de chaque centrale pour toute date où elle fonctionne de façon à satisfaire un ensemble de contraintes.

L'UC peut être formulé comme suit [18] :

$$\min \sum_{H=1}^{24} \sum_{i=1}^I C_i(X_{i,H-1}, P_{G_i}(H), u_{iH}) \quad (1)$$

sous les  
contraintes :

$$\sum_{i=1}^I P_{G_i}(H) = \sum_{z=1}^Z \widehat{L}_z(H)$$

$$\sum_{i=1}^I S_i(x_i, P_{G_i}) \geq \widehat{L}_z(H) + Re(H) \quad (2)$$

$$X_{i,H} = A_{iH}(X_{i,H-1}, u_{iH})$$

$$|F(H)| \leq F^{max}$$

avec :

- $S_i(x_i, P_{G_i})$  : réserve de puissance (services)
- $Re(H)$  : réserve de puissance obligatoire (stabilité)
- $X_{i,H}$  : variable d'état pour la source  $i$  à l'heure  $H$ .
- $u_{iH}$  : on/off pour la source  $i$  à l'heure  $H$
- $A_{iH}$  : fonction de la ressource  $i$  à l'heure  $H$
- $Z$  : ensemble des charges
- $I$  : ensemble des générateurs
- $F$  : vecteur des flux de puissance échangés dans le réseau
- $F^{max}$  : vecteur des puissances maximales

Le problème de l'UC, à l'origine est résolu par la méthode de relaxation lagrangienne ou la méthode de relaxation lagrangienne augmentée [18], [19]. L'idée consiste à *relaxer* (supprimer) une partie des contraintes (en principe celles qui rendent le problème compliqué) qui sont introduites dans la fonction objectif sous la forme d'une pénalité qui combine linéairement les contraintes relaxées. Le problème de l'*Unit Commitment* possède deux types de contraintes : contraintes séparables et contraintes couplantes. Les contraintes séparables sont par exemple les capacités des unités et les temps minimaux d'arrêt et les temps minimaux de redémarrage, ces contraintes sont intrinsèques à chaque unité. D'autre part, les contraintes couplantes, couplent les unités entre elles, c'est-à-dire que le changement dans une unité affecte les autres unités ; comme exemple, on peut citer la contrainte de l'équilibre entre la demande et la production. Aux États-Unis, l'opération de la résolution de ce problème s'effectue en deux étapes. La première étape consiste à résoudre le problème sans considérer les contraintes. La seconde étape est de vérifier si le résultat respecte le flux de puissance ainsi que les contraintes. Sinon l'opérateur (*Independent System Operator*) va intervenir pour modifier le résultat pour des raisons de sécurité.

### III.3. Supervision à court terme

#### Niveau 1 (Horizon : 10 à 15 minutes)

Lorsque l'on s'approche du temps réel, les prévisions des charges et des ressources sont mises à jour et la supervision moyen-terme (niveau 2) permettra de fournir les puissances de référence aux éléments constituant le système multisources, tout en maximisant et en diminuant la fluctuation de la puissance fournie au réseau. A ce niveau, les moyens de production à dynamique rapide (exemples : batterie, volant d'inertie ...) sont utilisés car ils sont très rapidement exploitables. Le nom usuellement donné à ce problème est : ***Economic Dispatch Problem*** (*ED Problem*) ou problème de dispatching économique. L'objectif de base d'un dispatching économique (ED) est la génération et l'exploitation à

coût minimal de l'énergie électrique dans un réseau en satisfaisant toute la demande avec les contraintes d'égalité et d'inégalité du système. Une des limitations du dispatching économique est l'aspect statique du problème. En effet, quand on résout un dispatching économique, on le fait pour une demande à un instant précis. Lorsque le problème prend une dimension dynamique, c'est-à-dire lorsque la demande évolue dans un intervalle de temps donné (une journée par exemple), il faut alors tenir compte des états des centrales ainsi que des changements d'état qui occasionnent des coûts supplémentaires. Le problème de l'ED est formulé comme suit [20]:

$$\min_{P_{Gi}} \sum_i (C_i(P_{Gi}(k))) \quad i \in G, \quad (3)$$

sous

contraintes :

$$\begin{aligned} \sum_i P_{Gi}(k) &= \sum_z \widehat{L}_z(k), \quad i \in G, z \in Z, \\ P_{Gi}^{min} &\leq P_{Gi}(k) \leq P_{Gi}^{max}, \quad i \in G, \\ |F(k)| &\leq F^{max}, \\ \sum_i R_{e_i} &\geq R_e^T, \end{aligned} \quad (4)$$

avec :

- $G$  : nombre de générateurs
- $Z$  : ensemble des charges
- $\widehat{L}_z(k)$  : charge prédite à l'instant  $k$  ou  $k$  est la période de prédiction (par exemple 10 minutes)
- $C_i(P_{Gi})$  : coût de l'exploitation du générateur  $i$
- $P_{Gi}^{min}$  et  $P_{Gi}^{max}$  : respectivement puissance minimale et maximale du générateur  $i$
- $F$  : vecteur des flux de puissance échangés dans le réseau
- $R_e^T$  : réserve obligatoire

D'après la formulation de l'ED, on remarque que les réponses dynamiques de chaque générateur ne sont pas prises explicitement en compte lors de la formulation. Les générateurs dont le temps de réponse est élevé, comme les centrales nucléaires et les centrales à charbon ne sont pas considérés. Bien que l'UC et l'ED soient interdépendants, la séparation de l'UC et de l'ED a pour but principal de réduire les efforts de calcul du problème d'optimisation mixte (discret/continu).

### **Niveau 0 (très près du temps réel)**

La commande de niveau inférieur (niveau 0) est le contrôle local de tension et courant de chaque générateur (via un convertisseur de puissance, ou non). Ces contrôleurs réalisent en

tout instant la régulation, afin de générer les puissances active et réactive souhaitées. Ces contrôleurs locaux permettent de fournir la puissance de référence avec une certaine dynamique.

**Remarque :** Il existe une autre problématique de gestion de la puissance dans les réseaux électrique qui concerne la déviation de la fréquence. Ce qui n'est pas l'objet de nos travaux. En d'autres termes, la cellule multisources est connectée à un réseau assez puissant pour imposer sa fréquence (50 Hz). Le réseau peut ainsi compenser les décalages entre la puissance demandée et la puissance produite dans le cas où la cellule n'est pas capable de satisfaire totalement la charge.

La déviation de la fréquence indique qu'il y a un déséquilibre entre la puissance générée et la puissance demandée par la charge. Afin de maintenir la fréquence dans une plage de variation acceptable, la génération doit être ajustée en temps réel pour répondre aux écarts entre les valeurs actuelles et valeurs prédites. Dans des conditions de fonctionnement normales, la fréquence est étroitement maintenue dans une bande étroite autour de la fréquence nominale. Dans le cas d'une perte de ligne par exemple suite à un défaut, la fréquence doit être maintenue au-dessus d'un seuil de fréquence prédéterminé. Si cette valeur seuil est dépassée, le système de protection va déconnecter une grande partie de la génération et le consommateur est affecté.

Il existe deux types de régulation de fréquence dans les réseaux électriques : un *contrôle primaire* individuel de chaque unité de production et un *contrôle secondaire* qui consiste à contrôler les zones de production [21]. Un contrôle primaire de la fréquence est très rapide et il est destiné à compenser les déséquilibres entre la génération et la charge. Il est implémenté en utilisant des régulateurs de vitesse dans les centrales de production conventionnelles (thermique, hydraulique..). Ces contrôleurs permettent d'ajuster la sortie en puissance des générateurs, en réponse à une déviation de la fréquence. Le délai pour un contrôle primaire de fréquence est entre quelques secondes à une minute. Le contrôle secondaire (LFC : *load-frequency control* ou AGC : *automatic generation control*), est réalisé par un régulateur centralisé situé au centre de conduite de la zone de réglage et dont le rôle est de modifier automatiquement le programme de production des centrales jusqu'à annuler l'écart de réglage de la zone.

### **III.4. Supervision dynamique d'une centrale multi-sources**

On rappelle qu'une centrale multi-sources est constituée de plusieurs éléments contrôlables ou non (en particulier non totalement contrôlables pour un certain nombre de sources d'énergie renouvelables), et de caractéristiques dynamiques souvent très différentes, et que ces sources doivent contribuer à un niveau de puissance spécifié, par exemple dans les niveaux 1 et 2. Les parties précédentes montrent qu'il existe un vide entre le niveau 1, qui répartit les puissances de manière statique (Economic Dispatch) sans tenir compte des variations non maîtrisables du niveau de puissance de certaines sources,

ni des dynamiques respectives de ces sources, et d'autre part des commandes locales de chacun des éléments contrôlables (Niveau 0). La supervision dynamique que nous allons prendre en charge tout au long de ce mémoire s'inscrit donc comme une génération de trajectoires de référence pour chacun des contrôleurs locaux, tenant compte d'une part des ordres donnés aux niveaux 2 ou 1, et d'autre part de la dynamique en boucle fermée de chacun des éléments de la centrale. Notre étage de supervision peut être inséré entre le niveau 1 et 0. Cela est justifié par le fait que les prédictions de 10 à 15 minutes sont peu précises, notamment en ce qui concerne la production de la puissance solaire dont les dynamiques de variation sont très rapides pendant les journées marquées par des passages très fréquents de nuages.

A ce titre, le problème de pilotage optimal de système multi-sources se rapprocherait d'un problème classique de calcul de plan de production optimal des centrales d'un réseau (*Unit Commitment*), ramené à une très petite échelle. On peut en effet négliger l'influence du réseau, les pertes étant ramenées en rendement de production des générateurs, et le superviseur devant décider des plans d'arrêt et de démarrage sur la période des générateurs commandables. Cependant, suivre cette approche comme un problème d'engagement des unités (*Unit Commitment*) nécessiterait une masse d'informations exhaustive en termes de courbe de coûts, de puissance appelée, de taux de disponibilité, etc. En outre, les prévisions sur 24 heures des charges et des ressources renouvelables sont généralement très grossières. Les algorithmes de conduite existant tels que l'engagement des unités (*Unit Commitment*) et le dispatching économique (*Economique Dispatch*) ne sont donc pas adaptables à notre problématique et ne permettent pas d'intégrer les dynamiques des éléments de la cellule multisources et de tenir compte efficacement des prédictions. Notons qu'un contrôle de fréquence (*Load Follow*) n'est pas nécessaire dans le cas d'un système multisources connecté au réseau, ce qui sera le cas dans le reste de l'étude. En d'autres termes, le réseau peut échanger de la puissance avec le système hybride et compenser les décalages éventuels. Chaque élément de la cellule multisources possède son propre contrôleur (contrôleur MPPT, régulateur PI ...etc) et les sources sont parfaitement contrôlées (Niveau 0).

Dans le cadre de la thèse, on ne s'intéressera qu'aux fonctions de supervision d'une cellule multi-sources de petite taille, c'est-à-dire un maximum d'une dizaine de sources ou moyens de stockage, évidemment, comme le nombre de degrés de liberté devient important, il se pose le problème d'un pilotage optimal de la cellule, qui fait tout l'objet de la thèse. Il faudra donc définir ce que l'on entend par l'« optimalité » du pilotage. Dans ce qui suit, on dressera un état de l'art des méthodes de supervision.



## **IV. Etat de l'art des technique de supervision des systèmes multi-sources**

La gestion énergétique fait l'objet depuis quelques années de nombreuses publications, notamment dans le domaine des systèmes multisources. Son objectif est de générer les références des différentes boucles de commande de manière à respecter les objectifs du cahier des charges et en vérifier toutes les contraintes. Afin de trouver une solution optimale, la connaissance préalable du profil de la charge et éventuellement des ressources renouvelables est exigée. Les contraintes imposées par le dimensionnement des éléments du système doivent être respectées et une attention supplémentaire doit être portée sur l'état de charge et la sollicitation des éléments de stockage, s'ils font partie du système hybride. Le défi majeur de cet objectif est notamment le fait que la puissance demandée par la charge et les ressources renouvelables ne peuvent pas être connues à l'avance. Donc le superviseur doit ainsi répondre à une sollicitation instantanée de puissance sans connaissance préalable du futur profil de la demande en puissance. Pour les systèmes hybrides relativement complexes et dont les profils de charges sont évolutifs dans le temps, de nombreuses méthodes issues de l'automatique sont appliquées pour optimiser la performance d'un système multisources en respectant un certain nombre de contraintes, mais à l'heure actuelle aucune ne semble avoir démontré sa supériorité et ne s'est imposée par rapport aux autres. Dans ce qui suit on va dresser une liste non exhaustive des méthodes de supervision classées selon deux critères :

- méthodes de supervisions nécessitant ou non un modèle du système,
- méthode de supervision selon l'approche utilisée (optimisation, séquentiel,.....etc. ).

On notera que de nombreux travaux au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP) de Lille traitent des problématiques des niveaux de contrôle local, analysées en simulation off line et validées en temps réel à l'aide d'outils temps réel et temps réel hybrides, notamment les travaux de Tao Zhou sur les commande d'un générateur hybride actif éolien incluant un système de stockage [22] et les travaux d'Arnaud Davigny concernant la participation aux services systèmes des fermes éoliennes [23]. Les travaux de Vincent Courtecuisse concernent la supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectés au réseau. La logique floue a été utilisée comme outil afin de concevoir le superviseur, et le niveau concerné est le moyen terme. Parmi les travaux contemporains aux nôtres, on peut citer les travaux de Ye Wang concernant la participation active des éoliennes au réglage de fréquence et la thèse de Firas Alkhalil qui concerne la supervision à moyen terme (Niveau 2) d'un système hybride en résolvant le problème d'engagement des unités (*Unit Commitment Problem*) de façon à satisfaire une demande globale d'électricité prévisionnelle sur

24 heures. Nos travaux s'inscrivent ainsi dans une continuité et viennent compléter des travaux sur la supervision d'une centrale multisources, leur originalité étant de prendre en compte les prévisions des sources d'énergie non contrôlées et de proposer une solution modulaire, reconfigurable et optimale.

#### **IV.1. Méthodes de supervision avec ou sans modèle**

Les fonctions de contrôle d'un système hybride peuvent être divisées en deux catégories, à savoir les contrôleurs locaux et le système de supervision, comme indiqué sur la Figure 1-6. Les contrôleurs locaux permettent au système global de fonctionner correctement en respectant les consignes. Ils peuvent être subdivisés en deux sous-catégories :

- contrôle séquentiel type on/off (exemple : connecter ou déconnecter un élément),
- régulateur PID ou autre, qui permettra d'assurer le contrôle des grandeurs asservies, qui peuvent être, par exemple, l'optimisation de la puissance extraite du dispositif (dispositif MPPT : *Maximum Power Point Tracking*), le contrôle des grandeurs électriques (consignes puissance active-réactive ou fréquence-tension, par exemple), de grandeurs mécaniques, etc.

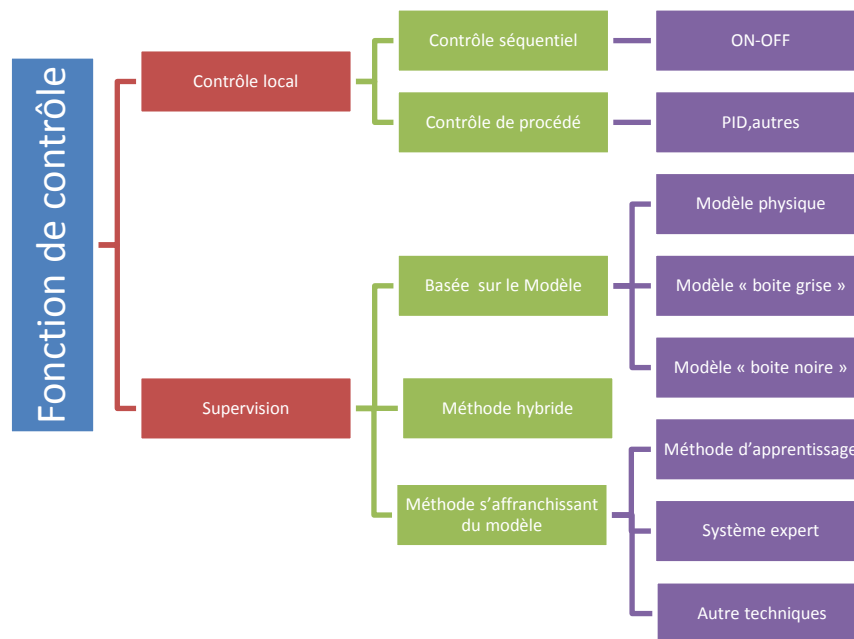


Figure 1-6 Schéma de classification des fonctions de contrôles dans les systèmes hybrides

Le système de supervision vise principalement à satisfaire la charge, en tenant compte de plusieurs paramètres du système hybride. Contrairement à la commande locale, le système de supervision ne doit être conçu qu'après une compréhension des caractéristiques du système global, les interactions éventuelles entre les sous-systèmes et leurs variables associées. La connaissance de ces caractéristiques

peut être utilisée pour minimiser une fonction « objectif », ce qui va conduire à l'amélioration de la performance du système. Comme indiqué sur la Figure 1-6, les stratégies de supervision peuvent être classées en trois groupes : méthodes basées sur un modèle dynamique, méthodes s'affranchissant du modèle et les méthodes hybrides.

### **Méthode « sans » modèle**

Ce type de méthodes ne nécessite pas la connaissance du modèle du système ciblé. Les systèmes experts et les méthodes d'apprentissage peuvent être utilisés pour concevoir ce type de superviseur. Un système expert peut imiter le raisonnement humain pour prendre des décisions pour un point de fonctionnement donné en se basant sur une base de connaissance. Il a également la possibilité de déduire des solutions raisonnables même lorsque les données sont incomplètes. Un système expert peut être facilement implémenté, toutefois il est affecté par la richesse de sa base de données et en dehors de son domaine d'expertise, il peut induire des erreurs significatives. Les méthodes d'apprentissage ne nécessitent pas non plus la connaissance du modèle mathématique du système. Elles décrivent un paradigme d'apprentissage dans lequel le système tente d'améliorer son comportement par rapport à des actions précédentes. Ces méthodes peuvent trouver une solution optimale ou quasi-optimale. Cependant, elles demandent un temps considérable pour « apprendre » au contrôleur. Ces méthodes sont très sensibles aux paramètres d'apprentissage, c'est la raison pour laquelle il est difficile de les implémenter en pratique.

### **Méthodes à base de modèles**

La connaissance du modèle permet de prédire la réponse du système afin d'adapter les paramètres du contrôle. Le rôle principal de l'optimisation consiste à minimiser l'énergie à l'entrée du système tout en ayant des performances acceptables. A chaque pas d'échantillonnage, une technique d'optimisation est appliquée au système afin de minimiser une fonction coût et d'évaluer les variables de commande. Les commandes réagissent rapidement au changement des conditions externes au système. Selon le modèle utilisé, la méthode de supervision à base de modèle peut être divisée en trois sous catégories : méthode de supervision basée sur un modèle physique, modèle boîte « grise » et modèle boîte « noire ».

- **Modèles physiques**

Ils sont construits à partir d'une analyse physique, chimique, ..., en appliquant les lois générales, fondées sur des principes (lois de mécanique, électromagnétisme, bilan des flux, ...) qui régissent la dynamique au sein des processus étudiés. Ces modèles ne comportent pas généralement de paramètres

ajustables, ou des paramètres ajustables en très petit nombre. En pratique, il est toujours souhaitable d'établir un modèle de connaissance des processus que l'on étudie. Néanmoins, il arrive fréquemment que le processus soit trop complexe, ou que les phénomènes qui le régissent soient très mal connus, pour qu'il soit possible d'établir un modèle de connaissance suffisamment précis pour l'application considérée. On est alors amené à concevoir des modèles purement empiriques, fondés exclusivement sur les résultats de mesures effectuées sur le processus. En général, ces modèles détaillés ou simplifiés ont des performances relativement élevées concernant les prédictions de leurs comportements futurs. Néanmoins, un modèle très détaillé peut entraver son application temps réel.

- **Modèles «boite grise »**

Lorsque des connaissances exprimables sous forme d'équations, sont disponibles mais insuffisantes pour concevoir un modèle de connaissance satisfaisant, on peut avoir recours à une modélisation « boite grise » (ou modélisation semi physique) qui prend en considération à la fois les connaissances et les mesures. Un tel modèle peut concilier les avantages de l'intelligibilité d'un modèle de connaissance avec la souplesse d'un modèle comportant des paramètres ajustables.

- **Modèles « boîte noire »**

Les modèles «boite noire » sont construits essentiellement sur la base de mesures effectuées sur les entrées et les sorties du processus à modéliser. La modélisation consiste alors à utiliser, pour représenter les relations entre les entrées et les sorties, des équations (algébriques, différentielles....) paramétrées, et à estimer les paramètres à partir des mesures disponibles, de manière à obtenir la meilleure précision possible avec le plus petit nombre possible de paramètres ajustables. Ils sont développés sur la base des comportements empiriques du système. Les paramètres du modèle n'ont pas généralement de signification physique. Par exemple, un modèle « boîte noire », peut être représenté par des réseaux de neurones artificiels (ANN). En règle générale, ces modèles ne nécessitent pas la connaissance détaillée du système, cependant ils ne sont précis que sur un intervalle bien déterminé. En dehors de cette plage, les extrapolations peuvent induire des erreurs significatives.

### **Méthode hybride**

Différents types de méthodes peuvent être utilisés simultanément pour concevoir un superviseur. Par exemple, certaines méthodes hybrides peuvent utiliser l'approche basée sur le modèle, et l'approche sans modèle. Le superviseur ainsi formulé peut avoir des performances élevées. Les systèmes neuro-flous sont les plus courants. Ils sont basés sur les modèles (Tagaki, Sugeno, Kang) et Mamdani, combinés avec des algorithmes d'apprentissage neuronal. Cependant, l'implantation de telles structures dépend fortement des connaissances a priori sur le système et des données empiriques.

#### **IV.1. Méthodes de supervision classées selon l'approche**

Suivant que la supervision se fasse en ligne ou hors ligne (pour obtenir un dimensionnement préalable par exemple), les outils de gestion énergétique peuvent se différencier en deux catégories, soit en suivant des règles (à partir d'éléments déterministes ou de logique floue), soit à l'aide d'outils d'optimisation. Cette différenciation est représentée sur la Figure 1-7.

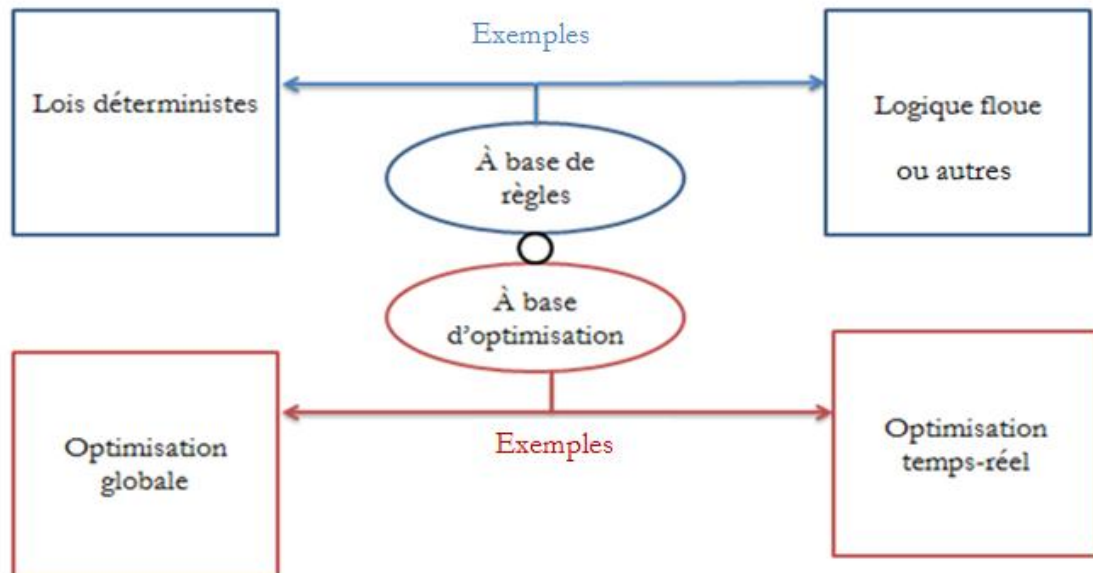


Figure 1-7 Classification de stratégies de supervision des systèmes multisources

##### **a- Stratégies de supervision basées sur des règles**

La façon la plus commune de mettre en œuvre un superviseur pour les systèmes multisources consiste à introduire un ensemble de règles, qui tient compte de certains paramètres significatifs et décide de la répartition de la puissance entre les différents éléments de la cellule. Contrairement aux techniques basées sur les méthodes d'optimisation, la supervision basée sur des règles ([24], [25], [26]) n'utilise pas une description formelle du problème. Ces règles proviennent de l'intuition de l'ingénieur : l'objectif qualitatif est d'extraire le maximum de puissance d'origine renouvelable, faire en sorte que les éléments fonctionnent à leur rendement maximal ...etc.

Les paramètres du contrôleur à base de règles (par exemple les valeurs des seuils qui décident quand passer d'un mode à un autre) sont généralement obtenus par l'étalonnage basé sur la modélisation et la simulation de la chaîne de puissance, éventuellement en utilisant des techniques d'optimisation. Le principal avantage de contrôle fondé sur des règles est sa simplicité et la facilité de mise en œuvre sur les

systèmes hybrides. Par exemple, si l'état de charge d'une batterie passe en dessous d'une certaine valeur, la source principale devra fournir une puissance supplémentaire pour la recharger. Les règles peuvent être complexes et détaillées en fonction des performances désirées. Les principaux inconvénients sont l'absence de preuve de l'optimalité, et le fait qu'il n'y a pas de méthode standard pour la synthèse des règles (par exemple, les règles sont décidées au cas par cas, mais il n'est pas possible de déterminer a priori qu'un ensemble de règles donné soit approprié pour une application précise). En outre, la présence de seuils et de paramètres, rend le calibrage (qui pourra permettre d'avoir une large plage de conduite), assez difficile. Néanmoins, cette stratégie est largement utilisée dans les systèmes hybrides et éventuellement en conjonction avec d'autres algorithmes basés sur l'optimisation. La Figure 1-8 présente un algorithme de supervision simple type *if-then-else*.

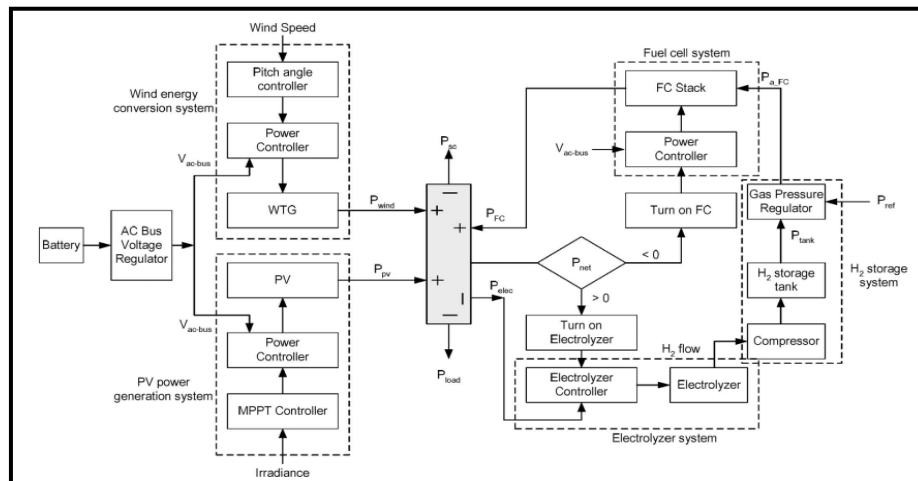


Figure 1-8 Exemple d'un contrôle basé sur des règles définies a priori [27]

Un autre moyen de concevoir un superviseur est la logique floue. Elle permet d'étendre la notion de logique classique, associée aux variables booléennes ne prenant que deux valeurs 0 et 1. Il est alors possible d'associer à des variables des coefficients d'appartenance à des sous-ensembles flous prenant des valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$  et quantifiant une possibilité. Citons par exemple la méthode de pilotage flou d'un système hybride photovoltaïque/éolien, avec batteries de puissance limitée, proposée dans [28]. Le système de gestion d'énergie pilote la puissance de sortie du générateur hybride éolien / photovoltaïque et l'état de charge des batteries, qui sont comparés à la puissance demandée et floutés pour appliquer les règles d'inférence floue. Chaque éolienne peut être alors déconnectée en cas de dépassement de la production par rapport à la charge, sans possibilité de stockage, et, de même, pour chaque module PV, ce qui assure un suivi de charge grossier. Contrairement aux techniques basées sur les méthodes d'optimisation, la supervision basée sur des règles n'utilise pas une description

mathématique du processus. En outre, ce type de superviseur nécessite une phase de réglage de ses paramètres basée sur l'expertise d'une part mais aussi sur des essais-erreurs d'autre part. L'application des stratégies de supervision des systèmes hybrides à base de logique floue est un sujet de grand intérêt dans les recherches actuelles académiques ou industrielles. Des stratégies floues conventionnelles [29] aux stratégies floues adaptatives [30], les objectifs visés ainsi que les organes contrôlés aussi bien que les variables de commande utilisées diffèrent d'une stratégie à l'autre. Ce type de superviseur rencontre un grand succès dans la littérature en raison de sa capacité à reproduire le comportement d'un expert humain, mais nécessite des temps de calcul plus importants lorsque le système devient complexe et fortement contraint. Une méthode de supervision à base de logique floue, n'est pas modulaire, en d'autres termes, l'adaptation est difficile lors de l'ajout d'un élément au système hybride par exemple, et à l'heure actuelle aucune méthode formelle d'ajustement n'est disponible.

### **b- Techniques globales d'optimisation**

Les techniques d'optimisation globales telles que traitées dans la littérature, se placent généralement dans la perspective de dimensionnement d'une installation en tenant compte :

- d'un scénario sur le long terme ,
- d'une stratégie de supervision donnée (basée sur les règles, optimisations,...),
- de coûts d'investissement,
- d'un profil de charge et éventuellement d'un profil de la production d'une source renouvelable.

La résolution d'un tel problème permet de déterminer la répartition idéale des types de sources (éoliennes, panneaux solaires, batteries, génératrice diesel ...), qui minimise le retour sur investissement. Compte tenu du manque de connaissances et des incertitudes de plusieurs paramètres, tels que l'évolution des prix du fuel, les conditions tarifaires de l'énergie en France, et cela sur plusieurs années, cette approche ne peut conduire qu'à des résultats triviaux, puisqu'on suppose que tous les paramètres sont connus.

La supervision des systèmes hybrides est un domaine de recherche fécond et constitue un des grands défis dans le domaine des systèmes hybrides et des microréseaux. Bien qu'il existe de nombreuses stratégies efficaces pour la supervision des systèmes multisources, l'épuisement des ressources fossiles et leurs prix élevés, ont poussé les acteurs du réseau électrique à accorder plus d'attention au contrôle optimal et à la supervision robuste. Comme le montre l'évolution, de la production des articles scientifiques durant les 20 dernières années Figure1-9, des efforts ont été entrepris pour élaborer des stratégies de supervision optimale pour les systèmes multisources.

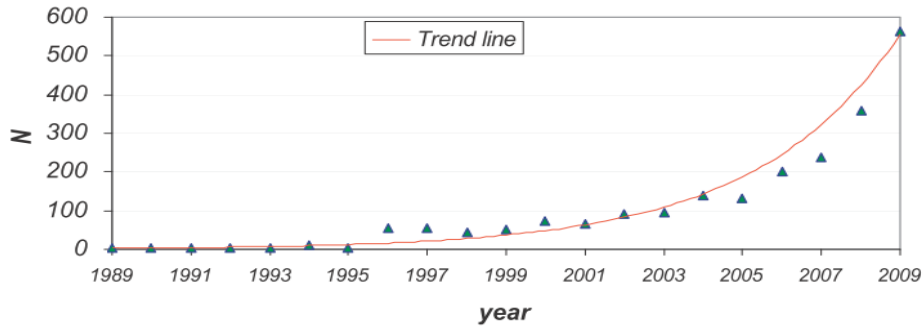


Figure 1-9 Nombre d'articles publiés utilisant les techniques d'optimisations appliquées aux énergies renouvelables [31]

Les algorithmes de supervision à base d'optimisation globale, auxquels on soumet une fonction objectif et des contraintes peuvent être totalement différents. Le choix de l'algorithme intègre la connaissance de la grandeur à optimiser et des grandeurs de commande qui influent sur les grandeurs à optimiser. La fonction objectif et les grandeurs de commandes peuvent être continues ou discrètes. Elles peuvent avoir des degrés de non linéarité plus ou moins élevés (linéaire, quadratique..) et le système peut être contraint ou non contraint. Dans le cas où l'on connaît préalablement le profil de puissance de la charge et des ressources renouvelables, une approche globale d'optimisation peut être entreprise en se fondant sur la théorie générale de la commande optimale [32]. Si la proportion de la pénétration des énergies renouvelables est importante, les incertitudes sur le niveau de puissance non maîtrisé peuvent prendre une ampleur qui peut toutefois être rédhibitoire pour l'application de ce type de méthodes. Ces approches sont incomplètes et ne permettent pas de proposer une réponse applicable telle quelle en temps réel. Cette étape sert ainsi le plus souvent de référence, pour évaluer la performance de la stratégie réellement employée, qui doit nécessairement couvrir tous les aspects : anticipatif et optimisé. Ainsi, l'exploitation des prédictions court terme devrait permettre d'avoir un gain appréciable par rapport à une technique dans laquelle les paramètres exogènes sont parfaitement connus, car les prédictions à court terme sont plus précises. Dans ce qui suit on détaillera les apports d'une telle approche.

### **c- Commande prédictive**

La commande prédictive fait partie de la classe des *commandes optimales*. La théorie moderne du contrôle optimal a commencé dans la deuxième moitié du XXe siècle. La commande prédictive est largement utilisée dans le domaine industriel pour contrôler le comportement de processus complexes. Ce type de méthode s'appuie sur le modèle du processus pour déterminer par anticipation, en utilisant la connaissance de l'évolution future de la consigne, la valeur optimale des entrées de commande à appliquer, au sens d'un critère de performance préalablement défini qui caractérise le but que l'on



souhaite atteindre (régulation, poursuite, ou tout autre critère de qualité). L'un des avantages de la commande prédictive est la prise en compte des contraintes imposées au système dès la phase de conception. En outre, le système peut prendre en compte les variations futures de la consigne et des perturbations, si celles-ci sont mesurées ou prédites. Ce type de commande est donc particulièrement adapté aux systèmes multisources dont la consigne future peut être programmée ou prédite (évolution de la charge, du rayonnement solaire dans le cas des panneaux photovoltaïques ...etc.).

La commande MPC (Model Predictive Control) est appliquée dans les systèmes de puissance [33], mais aussi dans les systèmes à énergies renouvelables. Par exemple, les auteurs dans [34] et dans [35] ont proposé une commande MPC afin de contrôler dynamiquement une éolienne. Dans [36], une stratégie de contrôle d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation à base de la commande prédictive a été étudiée. L'objectif est de réduire la fatigue du système de transmission tout en maximisant la puissance extraite. Les résultats obtenus sont meilleurs comparativement au cas d'un régulateur classique.

La commande prédictive peut être utilisée comme contrôleur local mais aussi comme un superviseur [37]. Elle est appliquée dans plusieurs types de système de gestion d'énergie comme une commande pilotant des systèmes en boucle fermée :

➤ **Pilotage optimal des systèmes de chauffage dans le secteur du bâtiment**

Dans [38], les auteurs proposent une commande prédictive afin de superviser la gestion d'énergie dans un bâtiment résidentiel. Le système peut produire simultanément de la puissance et de la chaleur (*Combined Heat Power Unit : CHPU*). La fonction coût a été conçue afin de minimiser le coût de l'énergie. Elle tient compte de la consommation du fuel, et du prix d'achat et de vente de l'énergie au réseau. L'objectif principal de la commande des systèmes thermiques dans le bâtiment, s'exprime sous forme d'un problème d'optimisation : minimiser la consommation (ou le coût) tout en garantissant le niveau de confort (thermique) désiré. Cet objectif semble l'argument suffisant pour l'utilisation de la commande prédictive dans ce cas. Pourtant, le coût élevé de la technologie nécessaire à l'implantation et surtout la difficulté d'obtention d'un modèle mathématique satisfaisant ont longtemps pénalisé l'utilisation des commandes optimales (prédictives) dans la gestion énergétique des bâtiments. Récemment, les auteurs dans [39] [40] ont utilisé la commande MPC pour le chauffage d'un bâtiment et pour la minimisation d'un système de réfrigération. Notons que ces systèmes sont caractérisés par des dynamiques lentes.

➤ **Gestion de la puissance dans les véhicules hybrides**

Les auteurs dans [41] examinent la possibilité d'appliquer la commande prédictive à un véhicule électrique *parallèle* hybride. La vitesse du véhicule est supposée constante et un *GPS* est utilisé afin d'estimer la pente de la route durant l'horizon de prédiction. Ainsi le couple des roues requis durant l'horizon de prédiction est estimé et la séquence de commande optimale est obtenue en minimisant une fonction coût qui inclut la consommation de fuel durant l'horizon de prédiction. Une approche similaire a été proposée dans [42]. La demande en puissance future est supposée parfaitement connue sur un horizon long, ce qui n'est pas réaliste. Les auteurs dans [43] présentent une application de supervision par commande prédictive pour contrôler un véhicule hybride. L'algorithme utilise le modèle de la pile à combustible pour prédire sa réponse dynamique et ainsi envoyer la référence de puissance nécessaire à la batterie afin de satisfaire la demande avec une dynamique satisfaisante. Les objectifs affichés sont la minimisation de l'utilisation de l'hydrogène et le maintien de l'état de charge de la batterie autour d'une valeur nominale. La fonction coût est la somme de trois termes : le coût d'utilisation de l'hydrogène, l'écart entre l'état de charge et la référence, ainsi que la différence entre la puissance fournie et la puissance de référence.

➤ **Systèmes multisources de production d'électricité à énergies renouvelables**

Les contraintes de l'utilisation de la commande MPC dans les systèmes multisources sont très différentes, par rapport au cas de la gestion d'énergie dans les bâtiments ou dans le véhicule hybride. Par exemple, la gestion du chauffage dans le secteur tertiaire est caractérisée par des dynamiques très lentes à cause de l'inertie du bâtiment, et les constantes de temps atteignant plusieurs dizaines de minutes. Dans le cas des véhicules hybrides, la charge doit être satisfaite à chaque instant (pas de plage d'erreur possible) et la structure n'est pas très compliquée (au plus trois sources différentes). C'est la caractéristique principale des systèmes hybrides dédiés aux applications portables. Une caractéristique commune réside dans l'influence importante et la variabilité des conditions extérieures (température, parcours du véhicule, ou ensoleillement...etc.).

Dans le cas des systèmes multisources dédiés à la production d'électricité, les contraintes environnementales et économiques obligent les producteurs à intégrer de plus en plus d'énergies renouvelables dans leur parc de production. Cependant, pour favoriser leur intégration, il est indispensable de disposer d'installations flexibles capables d'ajuster la production à la demande provenant du réseau. Cela passe par une optimisation du procédé mais également du contrôle commande. Parmi les technologies privilégiées, on peut citer les panneaux photovoltaïques et les éoliennes. Compte tenu de leurs caractères aléatoires et intermittents, les contraintes de pilotage d'une

cellule sont plus importantes. Actuellement, le pilotage d'une cellule contenant de telles sources ne prend en compte que la puissance fournie instantanée. Aujourd'hui, plusieurs opérateurs modélisent encore les systèmes PV (Panneaux Photovoltaïques) et la production éolienne comme des charges négatives qu'ils intègrent donc comme des perturbations dans l'algorithme de pilotage de la cellule hybride.

Afin d'améliorer la disponibilité et la manœuvrabilité d'une installation comprenant plusieurs sources renouvelables il est intéressant d'y associer des systèmes de stockage ou/et des sources de productions utilisant des sources fossiles. En revanche, l'insertion des éléments de stockage et des sources de production à base de combustible (gaz) complique la gestion du flux dans les systèmes multisources (gestion de l'état de charge, vieillissement, rendement ...etc.). Des méthodologies innovantes de gestion des systèmes multisources qui considèrent tous ces facteurs sont nécessaires.

Cependant, l'environnement des centrales multisources étant très variant (ensoleillement, vent, besoin de production, ...) il est important de prendre en compte une estimation de ces variations. Une approche de type commande prédictive permet de prendre en compte explicitement les variations futures des variables exogènes. En réalité, chacun des éléments possède déjà un contrôleur local qui est souvent standard et pré-réglé. La commande prédictive va donc être comme un superviseur, c'est-à-dire qu'elle va fournir les références de puissance de chaque élément. Ce niveau de supervision va calculer ces références par la résolution d'un problème d'optimisation à horizon glissant.

L'objectif principal est de fournir une puissance requise par le gestionnaire de réseau. Comme la cellule est constituée de plusieurs éléments, il existe un nombre important de degrés de liberté, qui peuvent servir à satisfaire des services à moindre coût. La fonction objectif de la commande prédictive doit inclure non seulement des considérations de coût et de performance, mais aussi des considérations liées à la durée de vie des éléments de stockage.

Comme travaux contemporains aux nôtres, on peut citer [44], où une telle approche a été implémentée avec succès. Un superviseur à base de commande prédictive a été développé afin de gérer la puissance dans un système hybride. Il est constitué de panneaux solaires, d'une éolienne ainsi qu'une batterie. Le système alimente un système de dessalement d'eau par osmose inverse. Les objectifs affichés sont la réduction des surintensités et la poursuite de la référence. La demande en eau est connue d'avance et le système de supervision permet de tenir compte des dynamiques du système de dessalement. Les énergies renouvelables ne sont pas entièrement exploitées, c'est-à-dire que le superviseur génère aussi les références à envoyer à l'éolienne et aux panneaux photovoltaïques. Cet aspect est clairement sous-optimal, le contrôle des panneaux photovoltaïques et des éoliennes devant être conçu dans le but d'extraire le maximum de puissance (*MPPT : Maximum Power Point Tracking*). En d'autres termes, les ressources renouvelables sont sous exploitées et leurs prédictions négligées. Le

Le système hybride est ensuite connecté au réseau de distribution. Les prix d'achat et de vente au réseau ont été intégrés dans la conception du superviseur. Par contre, la commande prédictive fait appel à des paramètres réglés de manière empirique, semblables aux matrices de pondération que l'on trouve dans une commande optimale. Ce qui ne permet pas d'accorder à la conception de la commande un caractère modulaire et générique. Les profils de vente et d'achat sont connus une journée à l'avance, ainsi que les ressources renouvelables qui fonctionnent toujours sous leurs points optimaux (au dessous de la courbe de puissance maximale). La commande prédictive semble donc être un outil adapté au pilotage d'une cellule multisources, mais il faut trouver une architecture et un réglage qui puisse permettre de proposer un superviseur facilement reconfigurable et réglable.

Afin de tenir compte des incertitudes une erreur de 10 % sur les prédictions (24h) des ressources renouvelables a été ajoutée. Cependant, les méthodes de prévision statistique, notamment pour des horizons élevés, appliquées à la gestion des systèmes multisources sont quant à elles souvent confrontées à de grandes erreurs de prédiction en cas de fluctuations rapides du rayonnement solaire ou du vent [45]. Aujourd'hui, les utilisateurs tels que les exploitants de fermes éoliennes, les gestionnaires de réseaux de distribution ou de transport, les compagnies d'électricité, très demandeurs d'outils de prédiction car ils reconnaissent que c'est le seul moyen économique permettant de gérer l'intermittence des ressources renouvelables.

A ce jour, à notre connaissance, aucune application réelle de la commande prédictive n'a été réalisée pour la supervision. Néanmoins, une commande MPC utilisée comme contrôleur local a été implémentée avec succès dans [46] afin de commander une pile à combustible (PàC). Les auteurs dans [47]) l'ont appliquée également comme un contrôleur local dans le but de contrôler la vitesse d'un moteur à combustion, en trouvant un compromis entre la consommation du fuel et les émissions polluantes.

## Conclusion

Le but de ce chapitre est de dresser un état de l'art de la gestion de puissance dans les systèmes multisources. Après avoir présenté le contexte de la thèse, nous avons montré l'intérêt de l'hybridation des sources. Cette hybridation va compliquer davantage le pilotage de la cellule.

La problématique de pilotage optimal concerne plusieurs niveaux de supervision, sur des périodes de temps les plus longues (heures, journée, semaine) aux plus faibles (un quart d'heure). Cependant, les solutions existantes comme les algorithmes de conduite de réseau tels que *Unit Commitment* et *Economic Dispatch*, ne sont pas directement adaptables à notre problématique et ne permettent pas de tenir compte des prédictions court terme des variables exogènes. L'état de l'art a été réalisé en élargissant la problématique à la gestion énergétique de systèmes hybrides d'autres applications (transport, secteur du bâtiment,..). Tout en notant les différences de ces systèmes des points communs ressortent.

Les méthodes de supervisions peuvent être divisées principalement en deux catégories : les systèmes experts (logique floue, algorithmes séquentiels..etc.) et les algorithmes à base d'optimisation. Les méthodes à base d'optimisation se basent sur une approche déterministe, en disposant de l'information parfaite sur les variables exogènes et les caractéristiques du système, et en se ramenant à un problème classique d'optimisation sous contraintes. Toutefois, ces approches sont incomplètes et ne permettent pas de proposer une réponse applicable telle quelle en temps réel. Cette étape sert ainsi le plus souvent de référence, pour évaluer la performance de la stratégie réellement employée, qui doit nécessairement couvrir tous les aspects : prédictions à très court terme, minimisation du coût, vieillissements ..etc.

Le chapitre suivant sera consacré à la construction de modèles des éléments constituant la cellule multisources, qui seront utilisés comme base pour la conception d'un superviseur à base de la commande prédictive.