



HAL
open science

Systèmes multi-agents pour la gestion de sources d'énergie renouvelable et de stockage de masse

M. K. Crédo Paniah, Javier Gil-Quijano, D. Mercier

► **To cite this version:**

M. K. Crédo Paniah, Javier Gil-Quijano, D. Mercier. Systèmes multi-agents pour la gestion de sources d'énergie renouvelable et de stockage de masse. JFSMA 13 - Vingt-et-unièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents, Jul 2013, Lille, France. pp.29-38. hal-00990654

HAL Id: hal-00990654

<https://hal.science/hal-00990654>

Submitted on 14 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Systèmes multi-agents pour la gestion de sources d'énergie renouvelable et de stockage de masse

C. Paniah^a J. Gil-Quijano^a D. Mercier^a
credo.paniah@cea.fr javier.gil-quijano@cea.fr david.mercier@cea.fr

^aCEA, LIST, Laboratoire Information Modèles et Apprentissage,
F-91191 Gif-sur-Yvette, France

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable (EnR) ont des caractéristiques qui limitent l'intégration de la production à la consommation électrique. Des travaux récents ont montré la pertinence des systèmes multi-agents pour la gestion de la production renouvelable et/ou distribuée. Le projet Winpower¹ a pour objectif l'intégration de la production d'un ensemble de fermes éoliennes off-shore (et autres producteurs d'EnR). Pour optimiser leur interaction avec le marché de l'énergie, Winpower propose une association avec des centres de stockage et une interconnexion HVDC (réseau à courant continu à haute tension). Pour piloter l'ensemble, nous proposons une approche hiérarchique qui permet d'une part de gérer les dynamiques locales et d'autre part d'optimiser l'interaction avec le marché tout en respectant les contraintes globales du réseau (stabilité, pertes). Nous présentons nos travaux sur l'architecture multi-agent et les protocoles de communication conçus pour le pilotage de haut niveau du système Winpower.

Mots-clés : Smart Grid, Systèmes multi-agents hiérarchiques, Stockage de masse, Sources d'énergie renouvelable, Gestion de la production, Planification

Abstract

The integration of the renewable production in the consumption is limited by the characteristics of the Renewable Energy Sources (RES). Recent studies have shown the relevance of multi-agent systems for the management of distributed renewable generation. Winpower¹ is a project which aims at offshore wind energy integration through a high voltage DC network. In order to optimize their interaction with the energy market, Winpower proposes to associate a set of off-shore wind plants with mass storage. We propose a hierarchical approach that allow both to manage renewable generation local dynamics and to optimize interaction with the market while handling global constraints of the net-

work (stability, losses). We present our work on the multi-agent architecture and communication protocols designed for the high-level management of the Winpower system.

Keywords: Smart Grid, Hierarchical multi-agent system, Mass storage, Renewable energy sources, Generation management, Planning

Remerciements : Nous remercions Daniel Grif-fel (Zamiren), Pierre Ollivier (Winnove) pour les discussions enrichissantes qui nous ont permis d'avancer dans notre travail. Ce travail est issu du projet Winpower (WINPOWER - ANR-10-SEGI-016) financé par l'ANR.

1 Introduction

En Janvier 2008, l'Union Européenne adoptait le plan Energie-Climat dont l'objectif est de lutter contre le changement climatique et d'instaurer une politique d'énergie durable commune aux pays de l'Union. On peut le résumer à l'objectif 20-20-20 : atteindre à l'horizon 2020 [3] une part de 20% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique Européen, une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre, en particulier le CO₂ et une augmentation de l'efficacité énergétique de 20%.

Pour y parvenir, il est nécessaire de mieux intégrer la production des sources d'énergie renouvelable (EnR). L'Europe se trouve, en effet, dans un contexte d'implantation croissante de sites de production d'EnR. Les capacités de production renouvelable ont considérablement augmenté ces dernières années (de 1000MW en 2005 à 6692MW pour l'énergie éolienne et de 140MW à 2503MW pour l'énergie solaire en fin 2011 [14]). Néanmoins, la production renouvelable est caractérisée par des propriétés qui limitent son intégration aux marchés de l'énergie ([13]). D'une part, la courbe de production est variable et intermittente et il est difficile de la prévoir (dépendance de la météo). D'autre part

1. WINPOWER - ANR-10-SEGI-016

les sources sont distribuées géographiquement et souvent éloignées du consommateur final.

L'objectif 20-20-20 ne peut être atteint que si des solutions sont proposées pour faciliter l'intégration des EnR. Le projet Winpower propose d'intégrer les technologies de l'information et la communication pour développer une vaste stratégie de contrôle et de gestion des réseaux HVDC (réseau haut voltage à courant continu) reliant des sources d'EnR au réseau de courant alternatif actuel. Il démontre aussi comment il est possible d'obtenir la stabilité sur des réseaux HVDC ou des systèmes combinés Courant continu - Courant alternatif. L'objectif est d'intégrer les nouvelles technologies au réseau et de présenter de nouveaux outils pour prendre en charge les problèmes spécifiques au contrôle distribué des fermes éoliennes off-shore.

Ce travail propose en solution une architecture distribuée, un Système multi-agents (SMA) pour le pilotage du réseau Winpower. La section 2 présente les travaux existant, appliquant les SMA aux Smart Grids. Le projet Winpower et ses objectifs sont présentés dans la section 3. La section 4 présente l'architecture proposée pour piloter le réseau Winpower puis la section 5 décrit les différents agents et leurs rôles. Cette description est suivie par celle des protocoles de communication implémentés pour le pilotage optimal du réseau dans la section 6. La section 7 conclut le travail en présentant les perspectives de recherche dans le cadre du projet.

2 Etat de l'art

L'intelligence artificielle distribuée et en particulier les SMA ont été utilisés pour le contrôle et la gestion des systèmes électriques complexes et/ou distribués. Fatemeh propose dans [6] une revue de sujets d'application des SMA dans les réseaux électriques : gestion de production, contrôle distribué et gestion de la congestion, contrôle à distance, formation de coalitions, etc. McArthur [10] adapte dans son étude les concepts centraux des SMA aux systèmes électriques. Il présente deux applications pour la supervision et l'analyse de quantités importantes de données provenant de sources hétérogènes et distribuées dans un réseau électrique. Dimeas [4] propose pour la gestion des micro-grids (réseaux électriques à bas voltage intégrant du stockage, des charges contrôlables et de la production distribuée) un SMA intégrant la notion d'apprentissage multi-couches. Plusieurs études portent sur la production renouvelable,

au contraire des précédentes. Kok [7] utilise de nouveaux mécanismes de coordination de l'offre et de la demande en formant des coalitions de sources et en flexibilisant la demande par le *pilotage de charge*. Robu [13] présente le concept des CVPP (Cooperative Virtual Power Plants). Un CVPP associe et fait coopérer des producteurs distribués géographiquement et/ou renouvelables pour participer aux échanges en tant que producteur unique. Ce producteur virtuel pourra proposer des prévisions de production moins incertaines et assurer la stabilité du réseau électrique. Il propose des mécanismes de distribution de revenus et de pénalités pour garantir l'équité sociale dans la coalition. Toutefois, le réalisme des solutions est remis en doute par Bourry dans [1]. Lagorse [8] décrit un SMA pour gérer un réseau électrique connectant des charges, des unités de production et de stockage, connectés par un réseau à courant continu et relié au réseau alternatif de distribution en utilisant Simulink mais ne prend pas en compte les réseaux de transmission. Dans Winpower nous considérons à la fois les moyens de production et stockage, l'interaction avec le marché et les contraintes associées au réseau de transmission.

3 Le projet Winpower

Le projet Winpower se concentre sur les fermes éoliennes off-shore. En effet, l'off-shore tend à devenir le standard dans la production éolienne. La puissance et la fréquence du vent, ainsi que la non pollution visuelle motivent ce choix. On sait aussi que pour des distances relativement courtes, environ 50km des côtes, les lignes à courant continu sont non seulement viables mais deviennent plus rentables que les lignes à courant alternatif et favorisent l'indépendance des composantes du réseau. Néanmoins, la production éolienne se caractérise par des propriétés qui l'empêchent de participer au marché de l'électricité comme un producteur conventionnel :

- *La marginalité* : La production d'une ferme éolienne, lorsqu'elle est comparée à celle des producteurs conventionnels reste marginale [13]. Ceci empêche la production éolienne d'être "vue" sur le marché. Winpower propose de résoudre ce problème par l'agrégation de la production de plusieurs fermes éoliennes (foisonnement). Le groupe peut se présenter au marché en tant que producteur unique et mieux négocier les modalités de vente de sa production.

- *L’intermittence* : Cette caractéristique de la production éolienne nuit à l’offre que peut présenter une ferme éolienne au marché [7]. Ce problème est aussi résolu par l’agrégation de plusieurs fermes. la distribution géographique des fermes participant au réseau fait que les productions sont à différents moments de la journée. Winpower présente au marché une offre stable dans le temps.
- *Les difficultés de prévision* : l’énergie éolienne est par essence difficile à prévoir [1]. Cela s’explique par les prévisions météorologiques qui sont approximatives. Le vent est la source primaire de l’énergie éolienne et est difficile à prévoir. Winpower propose d’associer aux fermes éoliennes des centrales de stockage. Lorsque les prévisions incorrectes font que toute la production n’est pas vendue, elle peut être stockée pour être, plus tard, déstockée en cas de nécessité.
- *La variabilité* : Elle est soulevée par Robu [13]. L’utilité du stockage est importante pour lisser les crêtes et les creux de production. L’offre de production que peut faire un producteur au marché est assez contrainte. Elle ne supporte pas la variabilité de la production éolienne. On peut utiliser les capacités de stockage des centrales de production et l’énergie stockée pour lisser la production éolienne.

Winpower considère plusieurs types de stockage qu’on peut distinguer par rapport à leurs temps de réaction et leurs capacités de stockage. Ces caractéristiques les destinent à différents usages. Le stockage d’énergie a des temps de réaction courts [12]. Cette rapidité lui permet de participer au réglage de fréquence pour la stabilité des réseaux. Toutefois, les capacités disponibles sont faibles. Il n’est donc pas possible de l’utiliser pour le stockage à long terme de l’énergie produite. Cette fonction est réalisée par le stockage de masse. Les temps de réactions sont plus longs mais les capacités plus grandes. Enfin, la production éolienne doit être mise en vente sur le marché de l’énergie. Il existe trois types de marché : le *marché à long terme* (il fixe des contrats sur des productions fixes sur plusieurs années, le marché intra-journalier et le marché infra-journalier. Ces deux derniers représentent environ 5% des échanges et servent à gérer les variations de production/consommation sur un horizon journalier. Winpower connecte donc par un réseau à courant continu des sources d’EnR et des centrales de stockage de masse distribuées géographiquement. Winpower connecte ce groupe au réseau principal pour fournir sa production à

la consommation électrique. Un tel réseau nécessite plusieurs niveaux de contrôle qui s’appliquent à des échelles différentes [2].

Le propos principal du *contrôle* est la stabilité du réseau. Il existe le contrôle primaire, le plus localisé (la turbine d’une éolienne) qui s’applique à une échelle de temps allant de la milliseconde à la seconde. Elle se fait par l’automatique et a pour but d’assurer que les variations climatiques (qui peuvent être brusques) n’empêchent pas la continuité effective de la production renouvelable. Le contrôle secondaire a une portée plus globale ; il s’applique à une portion du réseau dont on veut sauvegarder la stabilité. Le contrôle secondaire reçoit comme paramètre d’entrée des consignes de fonctionnement qui lui sont transmises d’un niveau plus élevé : le pilotage.

Le pilotage correspond à un contrôle haut-niveau des réseaux électriques et a pour fonction de déterminer les consignes de contrôle du réseau. Il assure aussi l’interaction avec le marché et l’optimalité de la production et de l’offre de production. Le pilotage construit une offre de production qu’elle présente au marché et se charge de respecter les engagements pris au moment de la fourniture de l’énergie produite. L’idée est de minimiser les pénalités qui sanctionnent les écarts entre l’offre prévue et l’offre effective. Le pilotage s’applique à une échelle géographique plus grande, le réseau Winpower dans son entier et des échelles de temps allant du quart d’heure à l’heure. Le pilotage effectue une planification d’utilisation des différents moyens de production (fermes éoliennes et stockage) sur un horizon allant de l’heure (pour les marchés infra-journaliers) à la journée (pour le marché intra-journalier).

4 L’architecture de pilotage

Les différents éléments du réseau Winpower sont organisés en une architecture qui permet de réaliser la gestion optimale du stockage et l’interaction avec le marché. Chaque producteur construit un planning de production, sur un horizon journalier. Afin de modéliser le pilotage et l’interaction avec le marché de l’énergie de Winpower, nous proposons une architecture multi-agent hiérarchique. Les différentes couches considérées dans cette architecture sont présentées dans la figure 1. Ces couches sont :

- *Centrales de production/Stockage de masse* : Cette couche permet de gérer de manière

agrégée la production d'électricité et le stockage de masse par la construction/opération de plannings agrégés. La construction de ces plannings se base sur les prévisions de production des différentes centrales de production (éoliennes ou autres) et sur les capacités de stockage disponibles à chaque centre de stockage. Les mécanismes d'agrégation proposés prennent en compte l'imprécision des prévisions.

- **Réseau DC** : Cette couche permet à la fois de construire des stratégies combinées d'utilisation du stockage de masse et de la production pour gérer l'intermittence de la production renouvelable et de vérifier les contraintes physiques du réseau (i.e. capacités de transport) et des différents éléments de production et stockage (i.e. temps de réponse, courbes de charge/décharge, etc.).
- **Interface avec le marché** : Cette couche permet de gérer les interactions du système Winpower avec le marché de l'énergie. A ce niveau sont définis les engagements sur la production globale. Ces engagements sont construits par négociation entre Winpower le marché et se basent sur les prix de l'énergie et sur la demande. L'énergie produite est injectée sur le réseau de transmission.

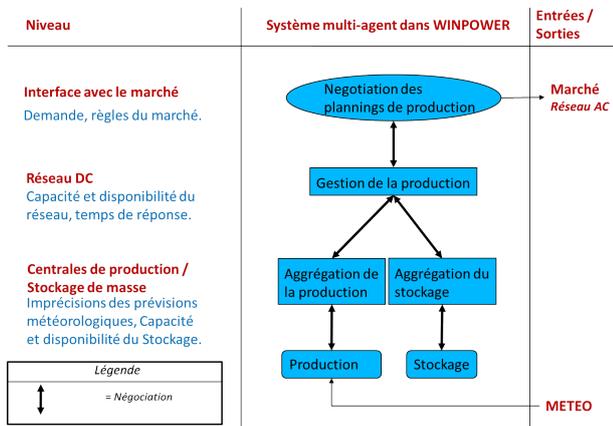


FIGURE 1 – Vision fonctionnelle du système multi-agent dans Winpower

Selon cette architecture fonctionnelle, des agents localisés sur les couches assurent le fonctionnement du pilotage du système. Les agents représentent les acteurs du système. On peut les classer suivant leurs fonctions de planification ou d'opération.

5 Les agents et leurs rôles

5.1 Les agents de planification

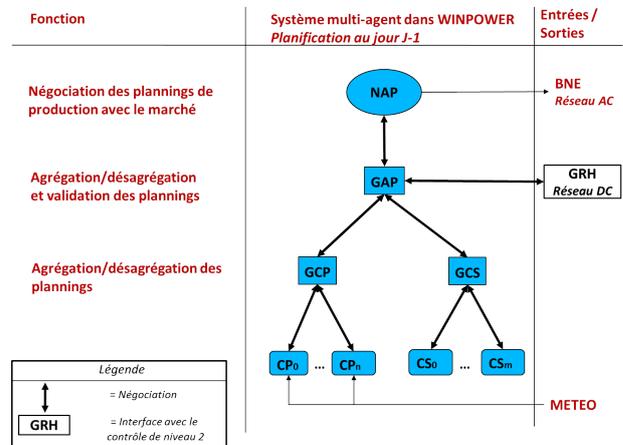


FIGURE 2 – Agents de planification

Le jour $J-1$, leur rôle est de construire des plannings de production et de stockage/déstockage à partir des prévisions. Le jour J , leur rôle est d'ajuster ces plannings en cas d'erreur dans les prévisions, des défaillances matérielles et en fonction des opportunités de participation au marché infra-journalier. Ils calculent en continu les écarts dans la production grâce à des prévisions à des horizons temporels courts (de l'ordre de quelques heures).

- Centrale de production (CP). Représente une centrale de production éolienne ou autre. Son rôle est de produire des plannings prévisionnels de production en fonction des prévisions météorologiques et des disponibilités matérielles des installations.
- Centrale de stockage (CS). Son rôle en tant que représentant d'un centre de stockage est de produire des plannings prévisionnels de stockage/déstockage.
- Gestionnaire de centrale virtuelle de production (GCP). Il représente un ensemble de CP. Il a deux fonctions :
 - Regrouper les plannings prévisionnels de production des CP qu'il représente sous la forme d'un planning agrégé.
 - Consolider la prévision en définissant les plannings définitifs de chacun des CP qu'il représente.
- Gestionnaire de centrale virtuelle de stockage (GCS). Il représente un ensemble de CS. Il a deux fonctions :
 - Agréger les plannings prévisionnels de stockage/déstockage de chacun des CS qu'il représente.

- Consolider la prévision en négociant l'utilisation du stockage avec le gestionnaire agrégateur de production.
- Gestionnaire de réseau HVDC (GRH). Il sert d'interface avec le niveau 2 de contrôle. Sa fonction est de calculer les capacités de transport internes au réseau Winpower et les pertes associées. Il base ses calculs sur un modèle physique du réseau.
- Gestionnaire agrégateur de production (GAP). Il représente un ensemble de GCP et de GCS. Il a deux fonctions :
 - Produire un planning global de production à partir des plannings construits par les GCP et les capacités de transport et pertes calculées par le GRH.
 - Produire un planning global de stockage/déstockage par négociation avec les GCS. Cette négociation sera fonction des prévisions du marché, les surplus de production et les capacités de transport.
- Négociateur agrégateur de production (NAP). Il représente Winpower dans les échanges avec le(s) marché(s). Il est en interaction avec le GAP pour ajuster les plannings de production et stockage en fonction des négociations avec le marché. Il prend les engagements de production pour le jour J au près du marché.

5.2 Les agents d'opération

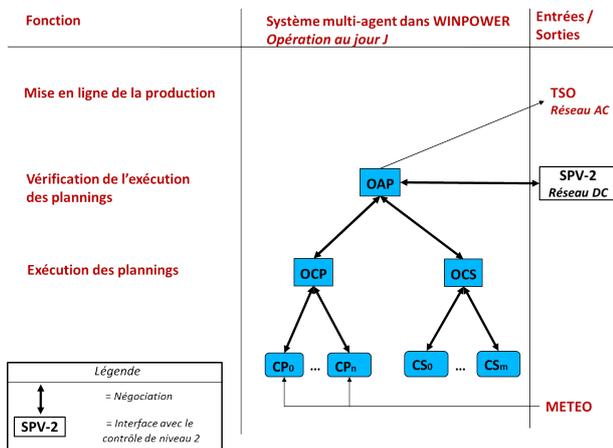


FIGURE 3 – Agents d'opération

Ils interviennent dans la phase de réalisation le jour J. Leur rôle est double : d'une part ils sont en charge de veiller à respecter l'exécution des plannings de production, stockage/déstockage le jour J et d'autre part, d'adapter ces plannings à la demande des agents planificateurs. Les plannings sont ajustés pour garantir le respect des engagements pris la veille par le NAP

et pour permettre aux acteurs de Winpower de participer au marché infra-journalier.

- Opérateur de centrale virtuelle de production (OCP). Il est en interaction directe avec le GCP.
- Opérateur de centrale virtuelle de stockage (OCS). Il est en interaction directe avec le GCS.
- Opérateur agrégateur de production (OAP). Il est en interaction avec le GAP.
- Superviseur secondaire (SPV-2). Il sert d'interface avec le niveau de contrôle 2. Son rôle est de surveiller le fonctionnement du réseau DC et de lever des alertes que doit traiter le système multi-agent.

TABLE 1 – Acronymes des agents du système

Acronyme	Agent
CP	Centrale de Production
CS	Centrale de Stockage
GCP	Gestionnaire de Centrale virtuelle de Production
GCS	Gestionnaire de Centrales virtuelle de Stockage
GRH	Gestionnaire de Réseau HVDC
GAP	Gestionnaire Agrégateur de Production
NAP	Négociateur Agrégateur de Production
OCP	Opérateur de Centrale virtuelle de Production
OCS	Opérateur de Centrale virtuelle de Stockage
OAP	Opérateur Agrégateur de Production
SPV-2	Superviseur Secondaire
TSO	Opérateur de réseau de transmission
BNE	Bourse de Négoce d'Énergie
METEO	Système de prévision météo

5.3 Les agents extérieurs

Ces agents représentent des entités à l'extérieur du système.

- Opérateur de réseau de transmission AC (TSO) : Au jour J, il transmet à l'OAP les demandes d'effacement ou d'augmentation de la production.
- Bourse de négoce d'énergie (BNE) : Cet agent représente le marché avec lequel le NAP négocie, au jour J-1, la production à fournir au jour J.
- Système de prévision météo (METEO) : Cet agent fournit les prévisions météorologiques aux agents CP et CS.

6 Communications entre les agents

Nous utiliserons dans la suite du document les acronymes des agents comme ils sont décrits dans la section précédente. Nous allons maintenant décrire le protocole qui cadre les échanges entre les agents, en fonction des différentes étapes du processus de pilotage de Winpower. Ce pilotage se base sur trois processus principaux, *la planification de la production, l'exécution des plannings* et *l'adaptation des plannings* pour répondre aux aléas de la production lors de la phase d'opération. Dans un cadre de marché intra-journalier de l'énergie, la planification est effectuée le jour $J - 1$ et l'opération et adaptation de plannings ont lieu le jour J .

6.1 Contenu des Plannings

Lors de ces différents étapes les agents échangent et exécutent des plannings. Nous définissons deux types de planning : les plannings prévisionnels et les plannings consolidés. Ces plannings sont échangés entre les agents producteurs et les agents agrégateurs. Comme on peut le constater sur la figure 2, chaque CP (respectivement CS) est associé à un GCP (respectivement GCS) unique qui à son tour est associé au GAP. Le CP (CS) agit comme un producteur vis-à-vis du GCP (GCS) qui agit comme agrégateur. Le GCP (GCS) agit comme un producteur vis-à-vis du GAP qui agit comme agrégateur.

Les plannings échangés entre les agents permettent de prendre en compte les caractéristiques suivantes associées à la production et au stockage :

- Les prédictions de la production renouvelable comportent des erreurs de manière systématique. Ces erreurs sont dues à plusieurs causes (erreurs dans les prédictions météorologiques en entrée, courbes de puissance des fermes difficiles à obtenir à partir des courbes de puissance individuelles des turbines, etc.) et ont des caractéristiques diverses. Quand le producteur fournit une valeur nominale prévisionnelle, il est souvent difficile de respecter cette valeur prévue.
- La prévision des capacités de stockage est également sujette à des erreurs. Par exemple si l'on considère une batterie, la valeur de son état de charge n'est pas mesurable directement, on ne peut mesurer que les entrées et les sorties et estimer les pertes (auto-décharge en fonction notamment de la température ambiante). Si l'on considère un stockage basé sur des ensembles de batteries, l'incertitude sur

l'état de charge des batteries individuelles se traduit par une incertitude sur la capacité de stockage de l'ensemble.

Les planning prévisionnels sont utilisés par les producteurs pour annoncer une production prévue sur un horizon fixe à leur agrégateur. Il est composé de t sous-propositions, où t est le nombre de créneaux temporels. Les créneaux temporels peuvent être de taille variable ou fixe, ici pour des fins de simplification nous considérons des créneaux temporels consécutifs de taille fixe. Un planning prévisionnel est défini comme suit :

$$Plan_{prev} = \{Type, PlanPr_1, \dots, PlanPr_i, \dots, PlanPr_t\}$$

avec :

$$PlanPr_i = \{(P_{i,1}, F_{i,1}, Pr_{i,1}), \dots, (P_{i,j}, F_{i,j}, Pr_{i,j}), \dots, (P_{i,p}, F_{i,p}, Pr_{i,p})\}$$

Type représente le type de production. Cette information est utile pour déterminer le type d'optimisation applicable. Il peut prendre les valeurs *stockage [hydraulique, batteries, cinétique, etc.]*, *production [éolienne, solaire, etc.]*. $PlanPr_i$ est le planning de production prévisionnel pour un créneau temporel i . C'est un ensemble de triplets qui à chaque valeur prévue de production $P_{i,j}$ associe une fiabilité $F_{i,j}$ de la prévision et un prix de vente $Pr_{i,j}$. $|P_{i,1}|$ est la puissance minimale potentiellement délivrée et $|P_{i,p}|$ la puissance maximale à l'intervalle i . Les capacités de production (éolienne ou autre source) et de déstockage sont représentées comme des productions positives. Une capacité de stockage est représentée comme une production négative.

Les planning consolidés sont utilisés par les agrégateurs pour fixer la production de leurs producteurs. Un planning consolidé est composé de t sous-propositions, t étant le nombre de créneaux temporels. Un planning consolidé est défini comme suit :

$$Plan_{consol} = \{Type, PlanCn_1, \dots, PlanCn_i, \dots, PlanCn_t\}$$

avec :

$$PlanCn_i = \{(PAtt_i, Pr_i), Ecart_i\}$$

$$Ecart_i = \{(PEc_{i,1}, Pr_{i,1}), \dots, (PEc_{i,j}, Pr_{i,j}), \dots, (PEc_{i,e}, Pr_{i,e})\}$$

$PlanCn_i$ est le planning de production consolidé pour le créneau temporel i . Il définit

la production nominale attendue ($PAtt_i$) et son prix (Pr_i) ainsi qu'une liste des écarts ($Ecartsi$) de taille e de production acceptées ($PEc_{i,j}$) avec leurs prix associés ($Pr_{i,j}$). Les prix dans cette liste suivent la contrainte suivante : $\forall (PEc_{i,j}, Pr_{i,j}) \in Ecartsi, Pr_{i,j} < Pr_i \iff PAtt_i \neq PEc_{i,j}$. Cette contrainte permet de pénaliser les écarts de production. La prise en compte de ces écarts permet d'assimiler en partie l'intermittence des sources renouvelables et les imprécisions des prévisions. L'objectif des mécanismes de construction de plannings de production et d'opération du système Winpower est de minimiser l'écart de la production. Un résultat attendu de l'étude en cours est la définition d'une méthodologie permettant de déterminer la valeur optimale de cet écart.

6.2 Construction des plannings

La construction de plannings fait intervenir un ensemble de producteurs et un agrégateur. Cette construction se fait en deux étapes, une étape d'agrégation de l'offre et une étape de désagrégation. Dans la première étape, chaque producteur propose un planning prévisionnel de production. Ces plannings sont vérifiés par l'agrégateur (e.g. vérification de contraintes physiques auprès du GRH, contraintes du marché définis par le NAP). Cette vérification des plannings peut donner suite à des négociations entre l'agrégateur et les producteurs pour adapter les plannings individuels en fonction des contraintes globales. L'agrégateur produit un planning agrégé qui est soumis à l'agrégateur du niveau supérieur. Cette agrégation en cascade aboutit à un planning prévisionnel agrégé global (cf. figure 4).

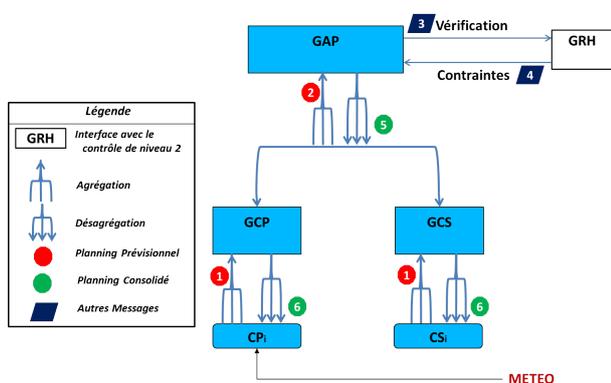


FIGURE 4 – Planification. Procédure générale

Agrégation des plannings. L'agrégation des plannings traite des plannings prévisionnels, elle

considère en entrée des distributions de probabilité de production et de stockage. Les méthodes et algorithmes utilisés sont actuellement à l'étude et se baseront sur l'état de l'art en agrégation de distributions non-paramétriques [9]. Quelques particularités sont à considérer dans ces calculs :

- *Négociation des capacités de stockage.* Il existe une dépendance temporelle dans l'utilisation du stockage. La capacité de stockage à $t + \delta t$ dépend de la capacité utilisée à t . En raison de cette dépendance les plannings prévisionnels d'utilisation du stockage d'un CS ne peuvent pas être construits localement. La construction de ces plannings nécessite la prise en compte des productions globales et des possibilités de vente.
- *Calcul des pertes et des capacités de transport.* Le GRH doit calculer les capacités de transport et les pertes au niveau du réseau Winpower. Ce calcul doit être forcément global, car les pertes et les contraintes de transport sont associées à l'utilisation conjointe du réseau par tous les producteurs. Les capacités de transport et les pertes sont estimées par le contrôle de niveau 2, pour chaque partie du réseau.

Désagrégation des plannings. Suivant les prix du marché et des méthodes d'optimisation, un planning consolidé sur le marché au jour J est défini. Ce planning est envoyé au GAP. Ce dernier se charge de désagréger ce planning et de remonter à chaque NCS et NCP leurs plannings respectifs qui eux-mêmes désagrègent ces plannings pour chaque CP et CS. Dans la désagrégation des plannings de production deux cas sont à prendre en compte :

- Toute la production est vendue.
- Seulement une partie de la production est vendue.

Dans le premier cas, il s'agit simplement de confirmer les plannings de production proposés par les CP/CS. Dans le deuxième cas, il s'agit de traiter le surplus de production, ce qui doit intégrer une stratégie de gestion du stockage et de redistribution « juste » du manque à gagner parmi les producteurs. Cette redistribution est faite suivant une fonction de bien-être social (social welfare [11]) qui permet de prendre en compte les redistributions passées afin d'éviter de sur-pénaliser certains des CP/CS (par exemple ceux qui ont une localisation défavorable dans le réseau DC).

6.3 Echanges au jour J-1

L'objectif des échanges au jour J-1 entre les agents planificateurs est de produire les plannings de production et d'utilisation du stockage pour le jour J. Ces plannings prennent en compte à la fois les prévisions de production de chacune des CP, les disponibilités de stockage/déstockage de chacune des CS, les contraintes du réseau DC (i.e. capacité de transport, pertes) et enfin la consommation et les prix de l'énergie définis par les échanges avec le marché. Ils suivent la procédure décrite dans la figure 5.

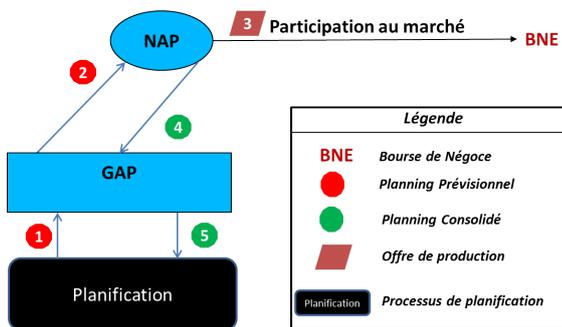


FIGURE 5 – Echanges au jour j-1

La planification au jour J-1 est donc composée de trois phases principales :

- L'agrégation des plannings dans le sens montant de la hiérarchie d'agents (depuis les centrales de production et de stockage jusqu'au GAP)
- La négociation des plannings agrégés entre le NAP et le BNE
- La désagrégation des plannings définitifs dans le sens descendant de la hiérarchie d'agents (depuis le GAP jusqu'au centrales de production et de stockage).

La construction de ces plannings suit le protocole de construction de planning décrit de manière générale à la section 6.2 et se présente spécifiquement comme suit :

- *Agrégation de la production prévisionnelle.* Les GCP agrègent les plannings prévisionnels de production de chacun de leurs CP et les envoient au GAP qui les agrège à son tour.
- *Agrégation des capacités de stockage.* Chaque CS envoie à son GCS un message unitaire prévisionnel contenant ses capacités de stockage pour la journée. Le GCS agrège ces prévisions et les envoie au GAP qui les agrège à son tour.
- *Prise en compte des pertes et des capacités de transport.* Le GAP demande au GRH d'éva-

luer la faisabilité des plannings par rapport aux capacités de transport et de calculer les pertes en fonction des plannings prévisionnels de production. En fonction des contraintes émises par le GRH, le GAP adapte les plannings.

- *Négociation des productions.* Le GAP envoie les plannings de production et les prévisions de stockage au NAP. Le NAP détermine des plannings consolidés de production et de stockage en fonction des échanges avec la bourse de négoce. Il renvoie ces plannings au GAP.
- *Négociation du stockage.* Le GAP interagit avec les GCS afin de définir les plannings consolidés de stockage en fonction du stockage prévu par le NAP.
- *Désagrégation des plannings.* Les gestionnaires d'agrégation envoient les plannings consolidés définitifs à chaque centrales de production et de stockage.

Les algorithmes utilisés pour l'agrégation des plannings se basent sur l'état de l'art récent en planification et négociation multi-agent ([5]).

6.4 Échanges au jour J

Le jour J, les agents opérateurs sont chargés d'exécuter le planning consolidé défini le jour J-1. Toutefois ce planning peut être modifié le jour J pour faire face à différents événements :

- Des écarts de la production effective par rapport à la production prévue.
- Les demandes d'effacement ou d'augmentation de la production en provenance du TSO.
- Les incidents techniques (e.g. pertes de tension, fonctionnement dégradé d'un CP/CS, etc.).

Les modifications le jour J des plannings se font grâce à des échanges présentés dans les sous-sections ci-après et ils se basent sur la procédure générale de planification (figure 4).

Adaptation des plannings. Les modifications des plannings le jour J se font grâce à un mécanisme de re-planification. La re-planification est déclenchée par un message de demande d'adaptation qui définit les contraintes (nouvelles productions, producteurs/stockage à adapter, période de re-planification) du nouveau planning. Cette actualisation se fait par un appel à la procédure de planification générale (cf. 6.2) sous les contraintes demandées. Le message de demande d'adaptation est défini comme suit :

DemandeAdaptation(*emmeteur*, *recepteur*, *contraintes*, *origine*, *urgence*, *date₀*, *date_f*)
où

$contraintes = \{contraintes_0, \dots, contraintes_i, \dots, contraintes_f\}$

$contraintes_i = \{P_{i,1}, \dots, P_{i,j}, \dots, P_{i,p}\}$

$urgence \in \{Bas, Intermediaire, Haut\}$

$contraintes_i$ est l'ensemble de puissances demandées pour une série d'agents à l'instant i . $urgence$ contient le niveau d'urgence de la demande, plus il est élevé moins les contraintes de prix sont prises en compte dans l'adaptation des plannings. $origine$ est un ensemble de paramètres qui décrit la raison pour laquelle la procédure de re-planification est initiée. Trois cas différents sont considérés :

- **Gestion des écarts.** Lorsqu'un producteur/stockage détecte un écart important sur sa production il émet un warning à son opérateur agrégateur. Une procédure locale de gestion des écarts est déclenchée (re-planification locale). Si cette procédure est insuffisante la demande de re-planification remonte dans la hiérarchie de gestionnaires. Cette procédure est présentée dans la figure 6. Deux types des écarts sont possibles, un écart réel mesuré sur une production délivrée ou un écart prévu sur une production future. Ce dernier type d'écart peut être détecté lors d'une actualisation des prévisions.
- **Gestion des demandes en provenance du TSO (effacements, augmentation de la production).** Dans Winpower le TSO peut demander à l'OAP d'augmenter ou au contraire de réduire la production sur une période donnée. Ces demandes sont faites par un envoi de message de modification externe). La procédure permettant de gérer ces demandes est présentée dans la figure 7. Lors de la réception de la demande, l'OAP envoie au GAP un message de demande de re-planification avec un niveau d'urgence haut. Le GAP déclenche alors une procédure de re-planification. Le résultat de cette re-planification est soumis au TSO en guise d'engagement.
- **Gestion de lors des incidents techniques (Plan de sauvegarde du réseau)** Lors d'un incident technique, mesuré sous la forme d'une variation significative de tension, le contrôle de niveau 2 déclenche des procédures visant à rétablir l'équilibre. Dans les cas où ces incidents sont très importants, les mesures prises par le niveau 2 de contrôle peuvent être insuffisantes. Dans Winpower le niveau 2 représenté par le Superviseur secondaire (SPV-2) peut, dans les cas d'incidents techniques graves, demander au niveau 3 d'utiliser ces

moyens de stockage pour l'aider à garder le fonctionnement du réseau en conditions sécurisées. Cette procédure est présentée dans la figure 8. Dans cette procédure le SPV-2 déclenche une alerte par l'envoi d'un message de détection de problème d'équilibre. Lors de la réception de ce message l'OAP envoie un message de demande de re-planification avec un niveau d'urgence haut au GAP. Ce dernier déclenche une procédure de re-planification des plannings.

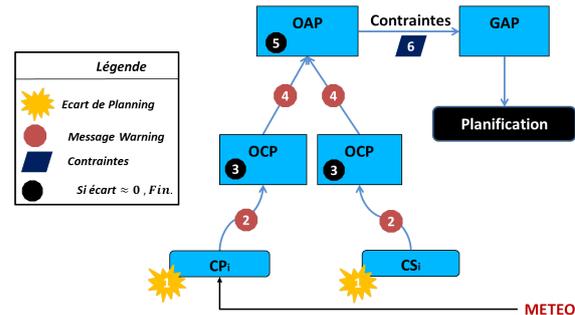


FIGURE 6 – Echanges entre les agents opérateurs et planificateurs au jour J en cas d'écart de la production.

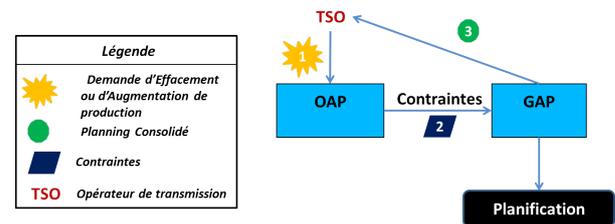


FIGURE 7 – Adaptation du planning par les agents opérateurs et planificateurs au jour J en cas de demande extérieure d'effacement ou d'augmentation de production.

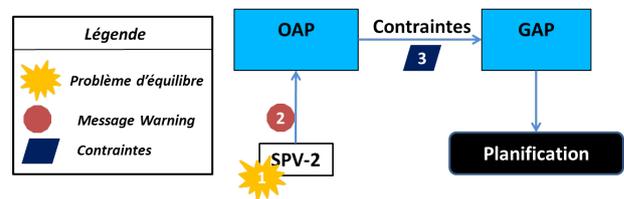


FIGURE 8 – Echanges entre les agents opérateurs et planificateurs au jour J en cas de détection d'un problème d'équilibre.

7 Conclusion et perspectives

Nous avons présenté une architecture SMA hiérarchique pour le pilotage d'un ensemble de

fermes éoliennes et de centrales de stockage de masse dans le cadre du projet Winpower. L'objectif est d'obtenir une meilleure intégration de la production renouvelable dans la consommation Européenne tout en prenant en compte les caractéristiques critiques des EnR (qui peuvent compromettre la stabilité du réseau électrique). L'architecture de pilotage propose de modéliser les différents acteurs de Winpower et d'agréger leurs offres complexes (de production et de stockage) en une offre unique, consistante et optimale (revenus maximaux et redistribution juste parmi les différents acteurs). Cette architecture est actuellement en cours d'implémentation et des tests seront réalisés en simulation. Des modèles de comportement des producteurs, des centrales de stockage et du réseau de distribution sont développés actuellement par nos partenaires. Ces modèles seront couplés avec le SMA pour obtenir un modèle de fonctionnement réaliste du réseau. Le développement du SMA inclut celui des algorithmes de planification (agrégation, désagrégation, interaction avec le marché) et de re-planification (en cas d'évènements perturbants). Un travail de normalisation pour rendre conformes les protocoles de coordination utilisés aux standards du marché de l'électricité est également actuellement en cours. Cette architecture prend en compte les interactions du marché de l'énergie et vise la réalisation de l'objectif 20-20-20 en utilisant mieux les capacités de production renouvelables : En effet, l'optimisation de la participation au marché permet une meilleure intégration des énergies éoliennes dans la production globale européenne.

Références

- [1] Franck Bourry. *Management of uncertainties related to renewable generation participating in electricity markets*. PhD thesis, MINES ParisTech - École nationale supérieure des mines de Paris, 2009.
- [2] Stijn Cole. *Steady-state and Dynamic Modelling of VSC-HVDC Systems for Power System Simulation*. PhD thesis, Arenberg Doctoraatschool Wetenschap & Technolied, 2010.
- [3] Conseil de l'union Européenne. Rapport - conseil européen de bruxelles. Conclusions de la présidence - Bruxelles, 11 et 12 décembre 2008.
- [4] AL Dimeas and ND Hatziargyriou. A mas architecture for microgrids control. In *Intelligent Systems Application to Power Systems, 2005. Proceedings of the 13th International Conference on*, pages 5–pp. IEEE, 2005.
- [5] Yannis Dimopoulos, Pavlos Moraitis, and Leila Amgoud. Extending argumentation to make good decisions. *Algorithmic Decision Theory*, pages 225–236, 2009.
- [6] D. Fatemeh and B. Hassan. Multi-agent systems in control engineering : A survey. *Journal of Control Science and Engineering*, 2009, 2009.
- [7] K. Kok, G. Venekamp, and P. Macdougall. Market-based control in decentralized electrical power systems. In *First International Workshop on Agent Technologies for Energy Systems, ATES2010, Toronto*, 2010.
- [8] J. Lagorse, D. Paire, and A. Miraoui. A multi-agent system for energy management of distributed power sources. *Renewable Energy*, 35(1) :174–182, 2010.
- [9] Arthur Lewbel. The rank of demand systems : theory and nonparametric estimation. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 711–730, 1991.
- [10] S.D.J. McArthur, E.M. Davidson, V.M. Catterson, A.L. Dimeas, N.D. Hatziargyriou, F. Ponci, and T. Funabashi. Multi-agent systems for power engineering applications-part i : concepts, approaches, and technical challenges. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4) :1743–1752, 2007.
- [11] Hervé Moulin. *Fair division and collective welfare*. Mit Press, 2004.
- [12] Paulo F Ribeiro, Brian K Johnson, Mariessa L Crow, Aysen Arsoy, and Yilu Liu. Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, 89(12) :1744–1756, 2001.
- [13] V. Robu, R. Kota, G. Chalkiadakis, A. Rogers, and N.R. Jennings. Cooperative virtual power plant formation using scoring rules. In *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 3*, pages 1165–1166. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2012.
- [14] RTE. Rapport sur l'accueil des enr sur le réseau. 2012.