



Coût de la production et dynamique optimale de fonctionnement d'un réseau électrique : application à la Senelec

Abdoul K. MBODJI¹, El hadji Mounirou NDIAYE², Mamadou L NDIAYE³, Pape A NDIAYE⁴
^{1,3,4}Centre International de Formation et de Recherche en Energie Solaire (CIFRES) de l'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) - Université Cheikh Anta Diop de Dakar – Sénégal
²Laboratoire CREFAT (Centre de Recherche en Economie et Finance Appliquée de Thiès) - UFR Sciences Economiques et Sociales - Université de Thiès - Sénégal
¹akmbodji@yahoo.fr, ²elhadjimounirou@gmail.com, ³mamadoulamine.ndiaye@ucad.edu.sn, ⁴papealiou-nen@yahoo.fr

Reçu juin 2013 – Accepté mars 2014

Résumé

Cet article présente une approche distribuée collaborative pour un contrôle décentralisé de la gestion du réseau électrique interconnecté de la Société Nationale d'Electricité au Sénégal (Senelec). Il s'agit de la conception et de la simulation d'un système auto-adaptatif capable de faire face aux situations changeantes et imprévisibles qu'exige la gestion d'un réseau électrique complexe. Autrement dit un système auto-organisé capable de proposer un agencement optimal des sources d'énergie électrique du réseau interconnecté de la SENELEC. Compte tenu de la complexité de la gestion du réseau, le contrôle est décentralisé au niveau de différents agents sources de production et d'agents départ. Après avoir montré le besoin de suivre «intelligemment» le système électrique par un modèle de système distribué en interaction, ce papier présente d'abord brièvement les enjeux technico-économiques du réseau et s'intéresse ensuite à la modélisation multi-agents du système de gestion de l'énergie, avant d'exposer enfin les résultats obtenus par la plateforme mise en place. Ces résultats mettent en évidence la possibilité d'optimisation du coût de production du parc énergétique, ainsi qu'en termes de réduction des gaz à effet de serre. Ils montrent également l'existence de slacks et la non soutenabilité du réseau de SENELEC qui nécessite des procédés alternatifs.

Mots-clés : Réseau électrique ; Optimum; Système multi-agents ; Approche comportementale ; Slacks.

1. Introduction

La gestion de l'énergie électrique passe par la protection, la surveillance et le contrôle de tout le réseau électrique à tout moment. Pour l'exploitant, il s'agit d'optimiser au plus juste prix la consommation d'énergie sans préjudice pour l'activité. Cela passe par une vision globale et en temps réel des paramètres électriques de toute l'installation. Les solutions modernes à ce besoin sont des produits et des services utilisant les technologies de l'information et de la communication, construits autour de systèmes intelligents, tels que les centrales de mesure et les logiciels de supervision et de commande. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de conception d'une plateforme de simulation d'une gestion décentralisée du réseau électrique de Senelec (Société Nationale

d'Electricité du Sénégal) pour optimiser le coût de production et mieux faire face à la complexité du réseau.

Senelec offre un cadre d'analyse très intéressant, puisqu'elle est en proie avec une crise dont l'explication se situe dans le fonctionnement même du réseau. Le fonctionnement du réseau électrique sénégalais présente plusieurs anomalies qui se sont traduites par une crise sans précédent à partir de 2003. Toutefois, il faut reconnaître que les délestages observés ces dernières années sont largement dus à des facteurs exogènes portés par la cherté du combustible, dans un contexte où près de 80% de l'électricité commercialisée par Senelec nécessitent un combustible. Ainsi à partir de 2006, la facture de combustible, qui représente environ 80% du chiffre d'affaires de Senelec, explique les soldes d'exploitation négatifs de la société pour les années 2006, 2007, 2008

[1]¹. Le gouvernement du Sénégal a dû déboursier une subvention d'exploitation de 137 milliards de FCFA pendant ces trois années et opérer une recapitalisation de 109 milliards de FCFA pour maintenir la viabilité de l'entreprise. Dès lors, le coût du combustible constitue le principal problème qui a entraîné le secteur dans la profonde crise qui le secoue jusqu'à présent. Le plan TAKKAL² n'est pas porteur de ruptures significatives : il est basé sur les mêmes procédés de production à base d'énergie fossile, et plus inquiétant encore, il procède par des locations de groupes de secours trop onéreux. Cependant, la résolution définitive de la crise proviendra d'un processus dynamique et non de mesures statiques. Le problème du secteur est, plutôt, d'ordre structurel et concerne l'ensemble des maillons du réseau électrique, de la production à la consommation finale.

Le réseau électrique de la Senelec est un système complexe de production de transport et de distribution de l'énergie électrique. Face à une telle problématique, il ne s'agit plus de décomposer en sous problèmes indépendants, de résoudre tous les sous-problèmes puis de synthétiser les résultats pour obtenir une solution globale. Il faut une analyse conjointe des comportements individuels et collectifs des différentes composantes du système pour apporter une réponse globale au problème. C'est dans ce sens que l'analyse comportementale prend toute son importance.

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) et la gestion de l'énergie électrique présentent des points de convergences remarquables [2]. Les systèmes multi-agents permettent de modéliser et/ou simuler des systèmes basés sur des entités autonomes, distribués en interactions [3-7]. Ils s'intéressent aux comportements collectifs produits par des interactions locales de plusieurs entités autonomes et flexibles appelées agents. La gestion de l'énergie met en jeu plusieurs sources de production, distribuées géographiquement dans l'espace et en interactions permanentes pour satisfaire plusieurs sources de consommation. Ce travail met à contribution une analyse économique et une approche d'analyse distribuée collaborative dans le management du réseau électrique.

La section 2 retrace les principaux aspects techniques et quantitatifs du réseau de SENELEC (capacité de production, connexion, appel de puissance). La section 3 présente une modélisation mathématique d'un système de gestion du réseau de SENELEC. L'architecture du SMA proposée et les groupes d'agents mis en relation au travers de différents comportements sont déclinés. La section 4 présente les résultats à travers une analyse comportementale du système. Sous l'angle purement

économique, il s'agit de dégager des interprétations susceptibles de déboucher sur des propositions concrètes concernant les options d'avenir dans le secteur.

2. Le réseau de la Senelec : aspects quantitatifs et techniques

2.1. Programmes de production et enjeux de réseau

La demande globale du réseau interconnecté d'électricité adressée à SENELEC se chiffre à quelque 400 MW environ. A la suite de la crise des années 90, l'Etat du Sénégal, tenaillé par l'urgence d'améliorer un parc de production insuffisant et source de délestages multiples à la fin des années 90, a été obligé de signer un contrat BOT³ avec l'américain GTI pour une capacité supplémentaire de 50 MW. En 2006 Kounoune Central Power s'est installée avec un supplément de 67 MW, sans oublier les autres projets en cours tels que la turbine à gaz de 126 MW et la centrale à charbon de Sendou. Ces nouvelles capacités sont censées venir satisfaire l'objectif de suivre une demande qui évolue de 8% par année [8]. L'équation 1 permet d'estimer la demande pour une année donnée.

$$(Demande)_N = (Demande)_{N_0} \times (1 + 0.08)^{N-N_0} \quad (1)$$

Où N_0 est l'année à l'instant présent et N est l'année où la demande énergétique est estimée. L'équation (1) permet de suivre l'évolution de la demande énergétique.

Le tableau 1 présente le parc de production en 2012. Malgré une capacité de production installée qui est supérieure à la demande dont la pointe est estimée à 380 MW, les délestages ont continué à coûter 1 à 2 points de pourcentage de croissance économique entre 2006 et 2011.

Tableau 1. Capacités installées.

SENELEC	MW	P.I.	MW
Centrale à vapeur	87,5	GTI	50
Production diesel	109	Kounoune	67,5
Turbine à gaz	74	Manantali	58
Autres	47,2	Total PI	175.5
Total SENELEC	317,7	Total Production	493.2

P. I.: Producteur indépendant.

Ce problème s'explique doublement : d'une part, l'électricité produite n'est pas intégralement disponible dans tout le réseau. Le réseau de transport est vétuste, et le parc de production de SENELEC est inadapté avec des

¹[] renvoie à la Référence bibliographique.

²TAKKAL : est un mot wolof qui signifie mettre la lumière.

³BOT : Build Operate and Transfert, c'est un contrat de partenariat public/privé par lequel l'opérateur finance l'ouvrage, l'exploite pendant une durée déterminée lui permettant une juste rémunération et transfère la propriété à l'Etat.

groupes dont certains datent des années 50. Le réseau de distribution est donc défectueux, archaïque, une situation qui facilite le piratage et cause des problèmes de sécurité, des pannes récurrentes et des pertes techniques et non techniques qui occasionnent chaque année un préjudice d'environ 30 milliards de F CFA en termes de chiffre d'affaires. Le tableau 2 donne quelques chiffres indicatifs.

Tableau 2. Production et pertes de réseau.

Production	kW	Consommation	%
Production disponible	2489	Etat et ménages	50
Production facturée	1928,9	Industriels	10
Pertes technique	497,8	Commerciaux	20
Pertes non technique	62,3	Pertes technique	20

D'autre part, le parc global de production (production indépendante et parc de Senelec) fonctionne essentiellement à base de fuel, et est donc soumis aux aléas des cours mondiaux du pétrole. Depuis 2006, le coût du fuel est devenu intenable. Senelec dépense actuellement 230 milliards de FCFA de fuel par année, soit plus de 80% de son chiffre d'affaires. Le rythme infernal des délestages observés à partir de 2006 s'explique en grande partie par les problèmes d'approvisionnement en fuel. Les audits effectués en 2011 ont révélé que Senelec a un déficit financier de 55 milliards de FCFA, et des dettes estimées à plus de 160 milliards FCFA.

Par ailleurs, le dernier plan de résolution de la crise initié en mars 2011, nommé Plan TAKKAL, n'est pas porteur de véritables germes de rédemption. Ce plan vise à mobiliser 653 milliards de F CFA à l'horizon 2014, destinés à renforcer les capacités et à renflouer les caisses de Senelec afin de lui permettre de faire face aux charges de combustibles. Toutefois le problème se situe ailleurs et les méthodes adoptées dans le plan TAKKAL sont les mêmes qui ont aggravé la crise durant ces dernières années. D'abord, même si les 485 milliards de ces fonds proviendront de contributions parafiscales, la dette de Senelec va s'aggraver du reliquat, soit 168 milliards de F CFA. Ensuite, la stratégie du plan TAKKAL repose sur la location onéreuse de groupes et un recours accentué aux énergies impropres qui, à terme, vont faire passer la part des énergies renouvelables de 10 à 7%.

2.2. Le Réseau Interconnecté (RI)

Les problèmes d'un réseau ne sont pas seulement d'ordre économique, ils intègrent une dimension technique encore plus importante dans le cas de la Senelec. En effet, l'optimisation de la gestion de l'énergie est cruciale surtout dans un système où certains groupes conçus pour fonctionner en appoint constituent des sources de pro-

duction de base. Les sources de production étant de types et d'efficacité différents, la maîtrise de leurs conditions d'exploitation (coûts de production et sollicitation) va permettre de dresser un plan d'utilisation suivant la recherche du moindre coût.

L'infrastructure du secteur de l'énergie électrique de la Senelec est constituée des moyens de production, des ouvrages de transport de l'énergie (lignes et postes), des réseaux de distribution Moyenne Tension/Basse Tension. La production d'énergie électrique du pays est assurée le parc de production résumé dans le tableau 3. Le fuel représente 88 % des charges totales en combustible. Après vient le Diesel oil, le Kérosène et le Naphta qui représentent 12% des charges totales en combustible.

Le réseau de transport de Senelec comprend 326,72 km de lignes 90 kV de 18 tronçons et 175 km de ligne 225 kV de 2 tronçons.

2.3. Classification des groupes électriques selon le coût de production

Le coût direct⁴ (équation (2)) du kWh produit par chaque groupe électrique est la somme des dépenses en combustibles et en huiles pour produire un kWh.

$$\text{Coût direct du kWh} = E_{\text{comb}} + E_{\text{huile}} \quad (2)$$

Avec

E_{comb} = dépenses en combustibles, E_{huile} = dépenses en huile.

Le mode de détermination est donné par l'équation (3).

$$\text{Coût du kWh (F/kWh)} = \frac{\text{(somme des dépenses)}}{\text{(Energie brute produite)}} \quad (3)$$

Avec,

$$\text{Somme des dépenses} = \text{dépenses en combustible} + \text{dépenses en huile} \quad (4)$$

$$\text{Energie brute produite} = \text{Puissance totale fournie} \times \text{période de fonctionnement} \quad (5)$$

3. Modélisation du système de gestion

La qualité du service offert par le réseau est un souci majeur pour l'exploitant. D'autre part, les phénomènes de propagation dans un réseau électrique à très haute tension s'effectuent à grande vitesse [2]. D'où la nécessité d'un suivi permanent du réseau. De plus l'exploitant est tenu par l'obligation de produire l'énergie à son juste prix et à juste à temps. Ces différents éléments rendent la gestion d'un tel système complexe.

⁴ Le coût direct du kWh produit par une source de production d'énergie électrique du réseau de Senelec est la somme des dépenses en combustibles et huile pour produire un kWh.

Les systèmes multi-agents ont déjà montré leur intérêt pour répondre à des problématiques en rapport avec des systèmes complexes dans lesquels rentrent en jeu des paramètres énergétiques, écologiques, économiques et sociaux [10]. En sus de cela, les univers multi-agents

proposent des formalisations qui prennent en compte à la fois la gestion collective et la modélisation centrée sur les individus [11]. Il ne s'agit plus de représenter la résolution d'un problème de manière hiérarchique, mais plutôt de manière parallèle et conjointe.

Tableau 3. Le parc de production du RI.

Auteurs	Centrales	Groupes	Date d'installation	Combustibles	Puissance installée (MW)	
SENELE C	C. VI	601	2006	Fuel lourd	16.45	
		602	2006	Fuel lourd	16.45	
		603	2006	Fuel lourd	16.45	
		604	2006	Fuel lourd	16.45	
	C. IV	401	1990	Fuel lourd	21	
		402	1990	Fuel lourd	21	
		403	1997	Fuel lourd	23	
		404	2003	Fuel lourd	15	
		405	2003	Fuel lourd	15	
		C. III	301	1966	Fuel lourd	27.5
			302	1975	Fuel lourd	30
			303	1978	Fuel lourd	30
	C. III	TAG 2	1984	Gasoil	18	
		TAG 3	1995	Kerosene	20	
C. II	TAG 4	1999	Gasoil	30		
P. I.	Manantali	Manantali	2002	Hydraulique	60	
	Kounoune	KP	2007	Fuel lourd	67.5	
	GTI	GTI	2000	Naphtha	50	

3.1. Positionnement du problème

Le réseau de Senelec (figure 1) est un système distribué sur plusieurs sites S_i . Chaque site est constitué de plusieurs centrales $C_{i(S_i)}$ et chaque centrale d'un site est composée de plusieurs groupes de production $G_{i(C(S_i))}$. Chaque groupe produit la puissance P_i et la puissance totale fournie par le réseau électrique est établit par l'équation (6).

$$P_f^T = \sum_{k=1}^S \left(\sum_{j=1}^C \left(\sum_{i=1}^G P_i \right) \right)_k \quad (6)$$

Où,

- G : est le nombre de groupes de la centrale C_j ;
- C : est le nombre de centrales du site S_k ;
- S : est le nombre de site du réseau.

La puissance totale appelée par charge est donnée par l'équation (7) :

$$P_A^T = \sum_{k=1}^H \left(\sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^B P_{\delta_i} \right) \right)_k \quad (7)$$

Avec:

- B : nombre total de clients gérés par un départ de moyenne tension ;
- M : nombre total de départs de moyenne tension d'un départ de haute tension ;

H : nombre total de départs de haute tension du réseau ;

La puissance totale fournie P_f^T par le réseau à un instant t est donné par l'équation (8) :

$$P_f^T = P_A^T + Pertes \quad (8)$$

Où les pertes sont d'ordre technique et non technique.

L'estimation des émissions imputables à la combustion des combustibles fossiles dans les sources d'énergie fossile se présente en trois niveaux dans les Lignes directrices 2006 [12].

- Approche de niveau 1: elle utilise la quantité de combustible brûlée par unité d'énergie et un facteur d'émission par défaut (équation (9)).

$$E_{GES,comb} = Q_{comb} \times FE_{GES,comb} \quad (9)$$

Où $E_{GES,comb}$ (en kg GES) est l'émission d'un GES donné par type de combustible, Q_{comb} (en GJ) représente la quantité de combustible brûlée en unité d'énergie et $FE_{GES,comb}$ (en kg GES /GJ), le facteur d'émission par défaut d'un GES donné par type de combustible utilisé.

L'émission totale d'un GES imputable à combustion s'obtient en additionnant l'émission de ce GES imputable de la combustion de chaque combustible (équation (10)).

$$E_{GES} = \sum_{comb} E_{GES,comb} \quad (10)$$

Où E_{GES} représente l'émission totale du gaz à effet de serre relative à chaque combustible [13].

- Approche de niveau 2: elle remplace les facteurs d'émission par défaut du niveau 1 par des facteurs d'émission spécifiques du pays correspondant [12].
- Approche de niveau 3: elle utilise en plus des données du niveau 1 et 2, un facteur d'émission par combustible et par technologie [12]. Le modèle mathématique associé à cette approche est donnée par l'équation (11) :

$$E_{GES,comb,techn} = Q_{comb,techn} \times FE_{GES,comb,techn} \quad (11)$$

L'émission totale d'un Gaz à Effets de Serre (GES) engendré par les différentes technologies est donnée par l'équation (12):

$$E_{GES,comb} = \sum_{techn} E_{GES,comb,techn} \quad (12)$$

Où $E_{GES,comb,technologie}$ (en kg GES) est l'émission d'un GES donné par type de combustible et de technologie; $Q_{comb,technologie}$ (en GJ) représente la quantité de combustible brûlée en unité d'énergie par type de technologie et, $FE_{GES,comb}$.(en kg GES /GJ) est le facteur d'émission d'un GES donné par combustible et par type de technologie.

3.2. Topologie et la structure des agents

La démarche adoptée consiste à transposer ce problème de traitement vectoriel des échanges de flux d'énergie dans un espace agent où les entités du système coopèrent mutuellement. Une approche située, coopérative et décentralisée, est proposée pour la gestion du système électrique. Il s'agit d'une approche dans laquelle un agent «*Agent_source*» (**S**) est associé à chaque source de production d'énergie et un agent «*Agent_depart*» (**D**) est associée à chaque départ basse tension.

L'architecture proposée (figure 2) est hybride et est répartie en 2 couches : la première couche composée de deux types d'agents réactifs (les agents sources et les agents départs). Chaque agent source (S_i) ($i \in [1 - N]$) et chaque agent départ (D_j) ($j \in [1 - M]$), disposent de caractéristiques intrinsèques à la source qu'il représente (tableau 4). La deuxième couche est constituée d'un agent cognitif dénommé «*ManagerAgent*» (G_s) et d'un agent réactif dénommé «*DataBaseAgent*» (B_s) qui

gère la base de données des informations manipulées par les agents sources et départs.

Chaque agent source dispose d'un paramètre noté priorité « p_{Si} » qui est déterminant dans le choix des sources de production qui doivent contribuer à satisfaire la demande. Elle est fonction du critère d'optimisation, de la disponibilité de la source, du coût de production de la source et/ou de la quantité de GES dégagée (équation (13)). C'est une valeur réelle comprise entre zéro (0) et un (1). Une source de production est d'autant plus prioritaire que la valeur de « p_{Si} » est proche de un.

$$f: \{1, -1\} \times \{0, 1\} \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

$$v_1, v_2, v_3 \rightarrow p_s = f(v_1, v_2, v_3) = v_2 (1 - v_1 \times v_3) \quad (13)$$

La priorité des «*Agent_depart*» varie entre zéro (0), un (1), deux (2) et trois (3). Les départs hors délestages alimentant les zones sensibles (grandes institutions nationales, hôpitaux, etc.) ont une priorité égale à trois (3). Les départs alimentant des zones secondaires (secteurs industriels, etc.) ont une priorité égale à deux (2). Les départs alimentant des zones non prioritaires (résidentiels, etc.) ont une priorité égale à un (1).

Un «*Agent_source*» du parc de production peut être dans quatre (4) états différents (figure 3): actif (**ac**), réserve (**r**), disponible (**d**) et arrêt (**ar**). Dans chaque état, la puissance instantanée de l'agent_source est encadrée par une puissance minimale et maximale admissible ($P_{(état)min} \leq P_{(état)}(t) \leq P_{(état)max}$). Les nombres d'agents sources dans l'état actif, réserve, disponible et arrêt sont notés respectivement N_1 , N_2 , N_3 et N_4 . L'équation 14 donne la puissance instantanée de réserve qui est la somme des puissances des agents sources dans l'état de réserve à l'instant t. La puissance instantanée de réserve notée $P_{(r)}(t)$ doit toujours rester entre une valeur minimum notée $P_{(r)min}$ et une valeur maximum notée $P_{(r)max}$. Les sources de production qui sont dans l'état de réserve permettent de réguler la fréquence autour de 50 Hz.

v_1 est le critère d'optimisation, $v_1 = 1$ ou -1 , $v_1 \in \{-1, 1\}$;

v_2 est la disponibilité de la source, $v_2 = 1$ si la source est disponible et $v_2 = 0$ sinon, $v_2 \in \{0, 1\}$;

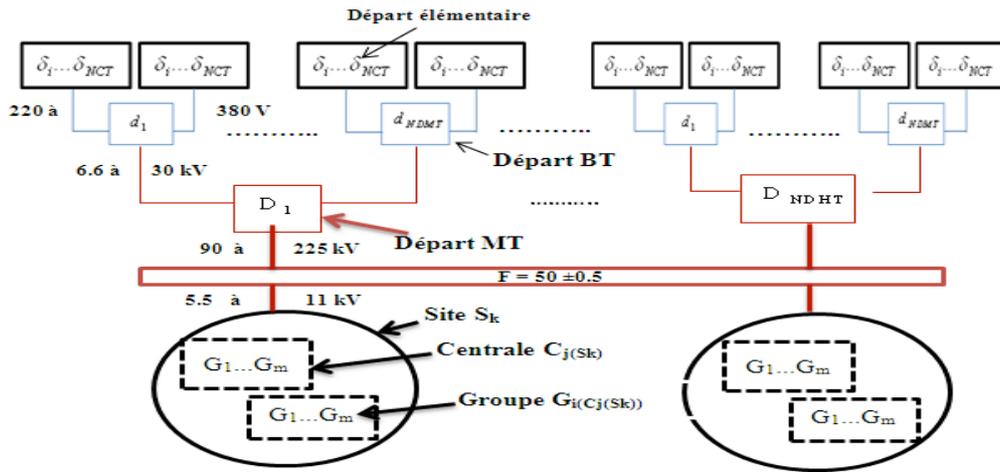


Figure 1. Le réseau électrique de la SENELEC.

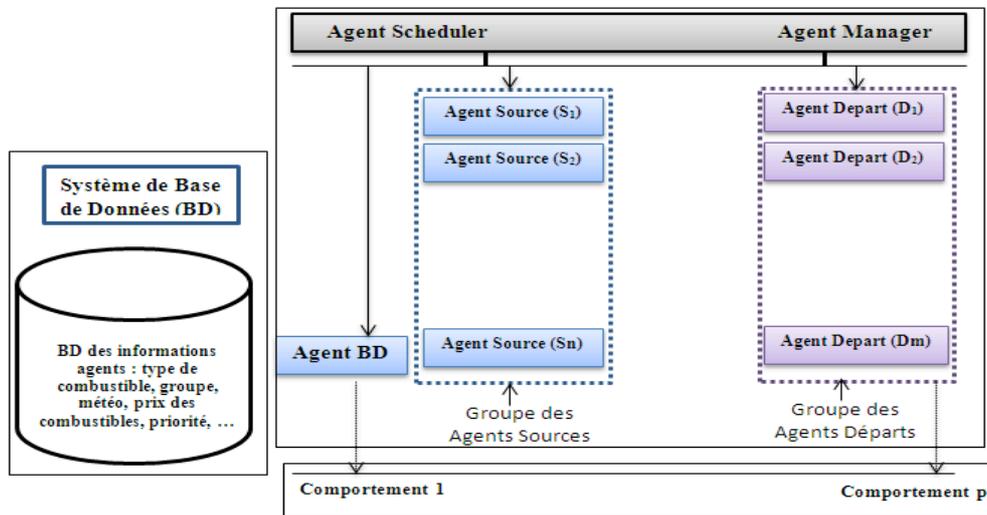


Figure 2. Typologies des agents du système de contrôle.

Tableau 4. Attributs d'un «Agent_source» et «Agent_depart». A refaire taille non conforme

Agent_source (Si)	Agent_depart (Dj)
: numéro d'identification	R_{S_i} : numéro d'identification R_{D_j}
Comb : combustible consommé	P_{D_j} : puissance consommée (MW)
P_{S_i} : puissance fournie (MW)	p_{D_j} : priorité de fonctionnement
d_{S_i} : disponibilité	
C_{S_i} : coût de production d'un kWh (FCFA/kWh)	
Q_{S_i} : quantité de GES dégagée pour produire 1 kWh (g/kWh)	
p_{S_i} : priorité de fonctionnement	

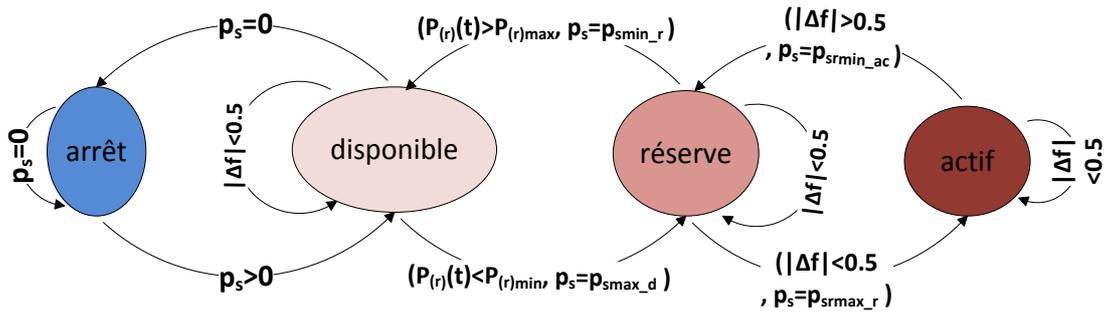


Figure 3. Modèle comportemental d'un agent source de production d'énergie.

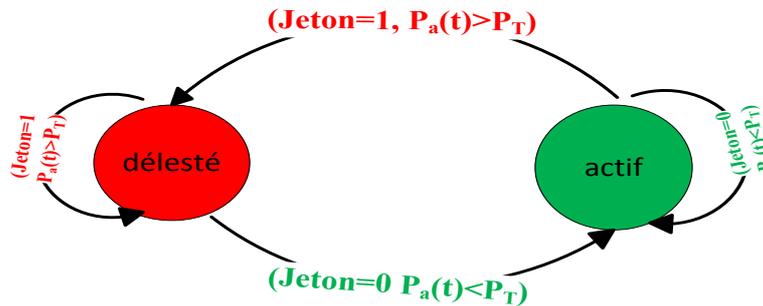


Figure 4. Modèle de comportemental d'un agent départ.

v_3 est le coût du kWh normé ou la quantité de GES dégasée normée,

$$v_3 = \frac{C_{S_j}}{\text{Max}(\{C_{S_i}\})} \quad \text{ou} \quad v_3 = \frac{Q_{S_j}}{\text{Max}(\{Q_{S_i}\})}$$

$j = \{1, 2, \dots, N\}$ $k = \{1, 2, \dots, M\}$ par construction $v_3 \in [0, 1]$.

$$P_{(r)min} \leq P_{(r)}(t) = \sum_{i=1}^{N_2} P_{(r)i}(t) \leq P_{(r)max} \quad (14)$$

Les agents ont une base de connaissances locales (internes) et une connaissance des autres agents (externes) à partir des messages échangés. Ce mode de communication directe assure la distribution des connaissances.

3.3. La plateforme de développement

Nous avons opté pour l'utilisation de plateforme dédiée au SMA. Les spécifications techniques utilisées sont basées sur un environnement de développement et de programmation orientée agents et sur les services à offrir. Elles se divisent en deux objectifs : (i) fournir un environnement de développement pour construire des applications multi-agents comprenant l'analyse, la conception et la programmation, (ii) fournir des moyens d'exécution répartie, de communication et de test des

applications multi-agents développées dont la validation, la possibilité de tests, et d'exploitation. Notre choix s'est porté sur MADKIT, un modèle organisationnel et générique de conception et d'exécution des SMA.

MADKIT est une plateforme générique de conception et d'exécution de systèmes multi-agents. MADKIT (librement téléchargeable à <http://www.madkit.org>) est un environnement de programmation de Java consacré à la création des SMA pour développer des applications basées sur un paradigme orienté organisation.

4. Résultats et analyses

La plateforme mise en place permet d'analyser le fonctionnement du réseau de la Senelec sous diverses situations. Pour tester le modèle de simulation présenté dans la section 3, nous avons mis en place deux scénarios :

4.1. Présentations des scénarii de simulation

- Le premier Scénario (S1) consiste à utiliser un critère basé sur le coût de production de notre réseau et de comparer les résultats obtenus avec les coûts de production réels de Senelec.
- Le deuxième scénario (S2) consiste à utiliser un profil de charge (figure 6) qui est caractérisé par une demande variant autour de 325MW et à effectuer plusieurs simulations pour analyser le comportement du

système. Les simulations sont effectuées suivant trois critères : un critère basé sur une minimisation du coût de production, un critère basé sur une minimisation de la quantité de gaz à effet de serre (GES) dégagée

- et un critère basé sur des règles aléatoires.

Les données utilisées dans les simulations datent du mois d'août 2010. La figure 5 montre le profil charge de trois mois des treize grands postes électriques du réseau La première simulation (figure 7) permet d'obtenir un coût de production toujours plus faible avec le critère d'optimisation utilisé. En effet sans critère

d'optimisation la courbe obtenue est toujours au dessus (sur toute la durée de la simulation) de la courbe utilisant le critère d'optimisation.

Les figures 8 et 9 montrent les résultats de simulation du scénario 2 où nous avons comparé les résultats obtenus avec les deux critères d'optimisation du coût de production et de la quantité de GES avec des critères basés sur des règles aléatoires. Ces courbes montrent que les coûts obtenus avec les critères utilisés sont toujours plus bas que les autres obtenus avec les règles aléatoires.

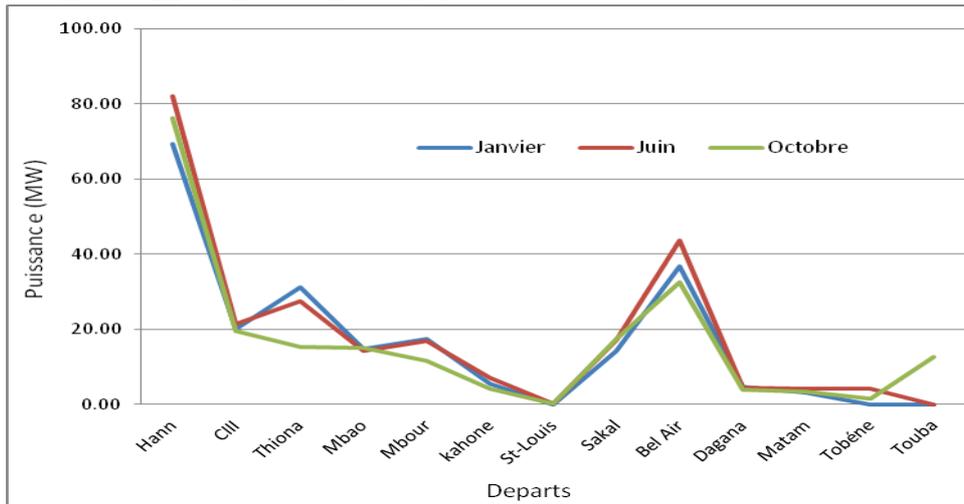


Figure 5. L'appel de puissance du mois d'août 2010 de la SENELEC (I19).

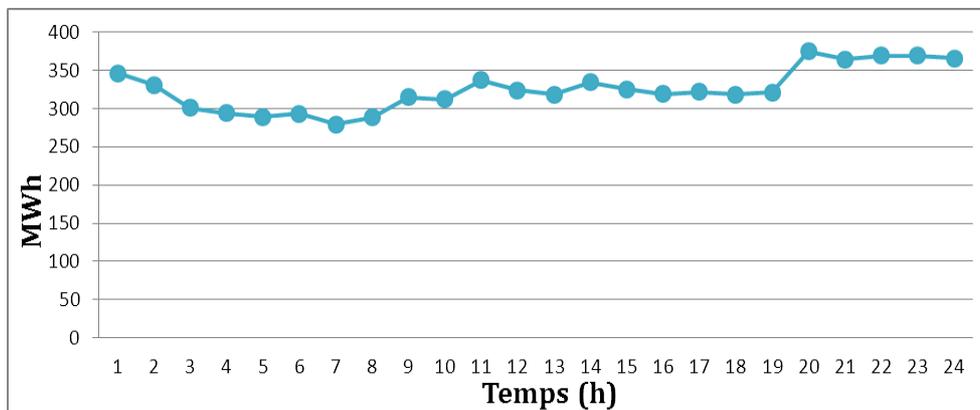


Figure 6. Profils de la demande puissance de réseau pour le Scénario 2 (S2).

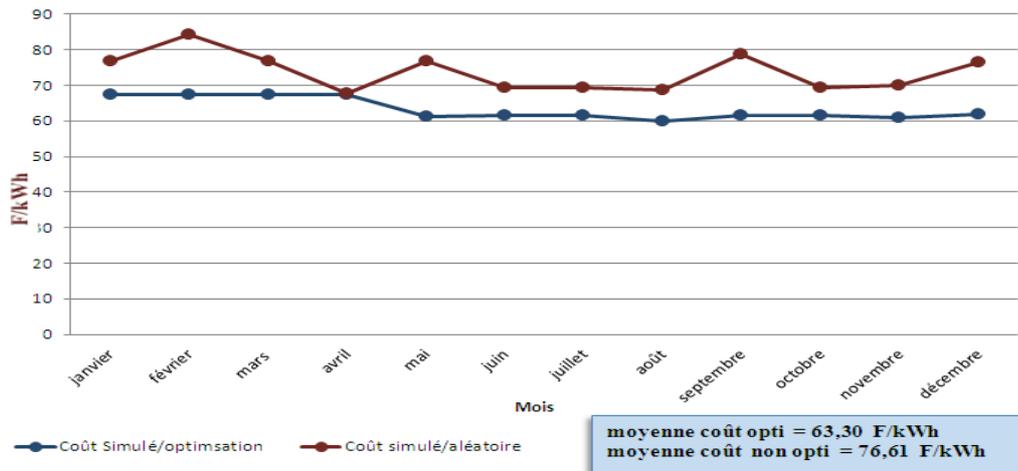


Figure 7. Le coût spécifique des groupes du parc de production de la SENELEC (S1).

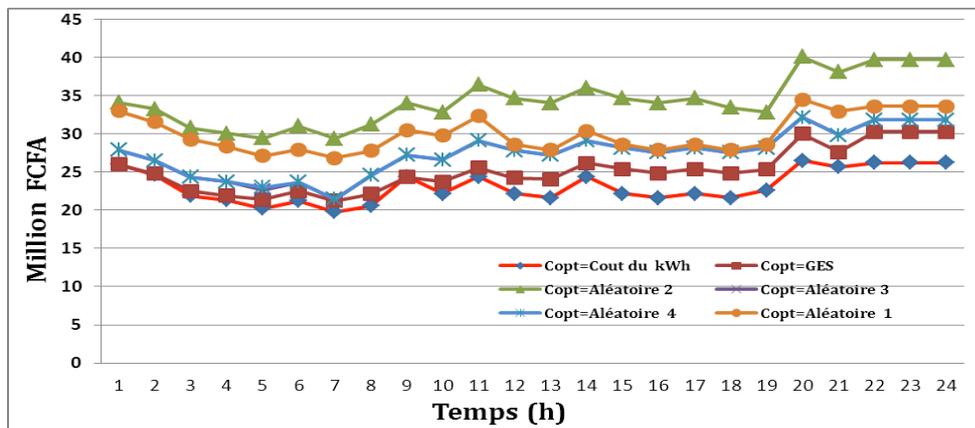


Figure 8. Coûts du fonctionnement des sources de production (S2).

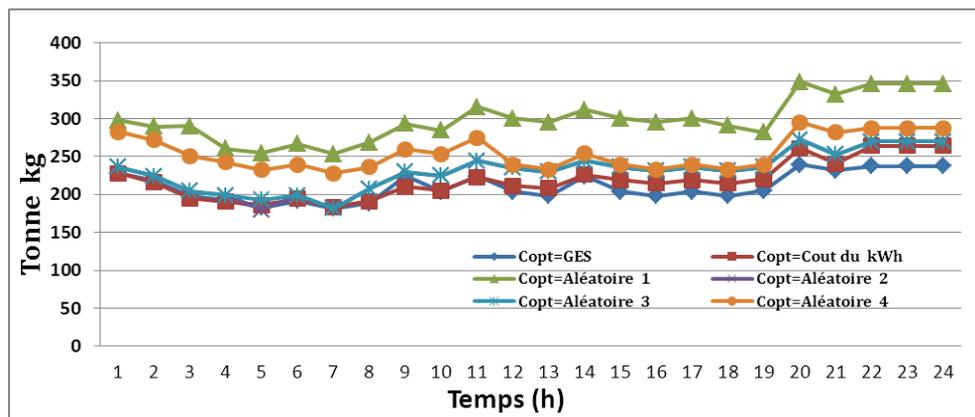


Figure 9. Quantité de CO₂ (S2).

Analyse et discussion des résultats

Les figures 6 et 7 mettent en évidence un coût de production très élevé qui nécessite le renouvellement du

parc de production à court terme pour la compétitivité de la société. Il faudrait aussi une meilleure gestion de l'appel de puissance des sources de consommation depuis la distribution. La figure 8 donne une idée sur la

quantité de GES dégagée par les sources de production. Le renouvellement du parc de production permettrait aussi de réduire cette quantité de GES dégagée. Les sources d'énergies renouvelables seraient de bonnes candidates mais leur opérationnalité à moins terme dépend de la résolution des problèmes de coût qu'elles posent surtout concernant l'énergie solaire.

La modélisation mathématique des aspects techniques de gestion du réseau de SENELEC a, par ailleurs, permis une mise en évidence technique de l'existence des slacks au niveau de SENELEC (surcoûts en Input et insuffisance en Output). Les délestages récurrents et les pertes d'exploitations constatées depuis l'année 2006 suffisent pour parler de slacks à la SENELEC. Les slacks⁵ sont responsables de l'effet Averch-Johnson [14] (c'est-à-dire la surcapitalisation due à la faiblesse de l'efficacité productive) constatée dans l'entreprise à partir des années 2000⁶. Elle a aussi établi la non soutenabilité de la dynamique du réseau et la nécessité de se tourner progressivement vers les énergies renouvelables. Mais la faisabilité des dispositifs d'énergies renouvelables telles le photovoltaïque, l'aérogénérateur, dépend des économies d'énergies qu'il est possible de réaliser à court terme. Autrement dit, la restauration de l'efficacité productive de la SENELEC peut permettre d'allouer un fonds consistant, notamment les importantes subventions souvent mobilisées, à la promotion de l'éolienne, de l'hydroélectricité, du solaire et même de la bioénergie. En termes économiques, il s'agit d'économiser sur les coûts par l'éradication de toute forme de slacks (surcoûts en input et insuffisance en output), afin de laisser des marges financières qui vont venir appuyer l'adoption de ces énergies renouvelables. D'ailleurs si la SENELEC avait son équilibre financier, les 160 milliards de subvention annuels prévus à partir de 2012 auraient pu servir à des programmes publics d'énergies alternatives. Au final, la gestion efficace du réseau électrique est un impératif inaliénable qui permettra de réduire le coût global du réseau, suivant l'objectif général d'améliorer significativement les résultats financiers de SENELEC et l'état du secteur.

5. Conclusion et perspectives

Le travail présenté sur ce papier propose une plateforme de simulation de la gestion des systèmes électriques avec les Systèmes Multi-Agents (SMA). Une application a été proposée pour le cas de la SENELC sur ce papier. L'utilisation d'un *modèle individu centré* construit autour du

paradigme agents est une option innovante et prometteuse pour le développement d'outils d'aide à la décision. La méthodologie abordée met en place une stratégie de contrôle sur les agents pour organiser, ordonnancer et interpréter la quantité d'informations échangées dans le système multi-agents.

Après une longue consultation des rapports de la SENELEC, une descente sur les sites de productions nous avons pu recueillir plusieurs scénarios qui nous ont permis de développer la plateforme présentée sur ce papier. Les résultats obtenus montrent que les coûts de production optimisés des agencements des sources d'énergie proposés par la plateforme sont toujours meilleurs que n'importe quels autres agencements. Nous avons aussi évalué les quantités de GES dégagées surtout le dioxyde de carbone.

La modélisation a débouché sur des résultats économiquement révélateurs. Elle a permis de localiser les anomalies techniques du réseau et d'indiquer les voies de leur solution, qui tournent autour de la redéfinition de la politique de production, le renouvellement du parc de production et l'introduction des énergies renouvelables. Il faudrait rationaliser l'utilisation de l'énergie produite par une optimisation de la demande. Les économies réalisées pourraient venir à bout de ses multiples slacks. Cet article est une contribution qui vise, avant tout, à réorienter le débat scientifique sur la crise énergétique au Sénégal, cette dernière ayant toujours été abordée en ordre dispersé par les chercheurs.

Les perspectives porteront sur une extension de cette étude à ce que devrait être le futur réseau de la SENELEC. Ces perspectives viseront à simuler les meilleures orientations du renouvellement des sources de production de la SENELEC avec l'intégration des sources d'énergies renouvelables telles que l'éolienne et le solaire. Il serait aussi intéressant d'intégrer des informations a priori sur le système de gestion de la demande et mettre plus d'interactivité entre la plateforme et son utilisateur surtout dans les stratégies de contrôle de la demande

REFERENCES

- [1]. E. M. Ndiaye. «Le secteur de l'électricité au Sénégal : état des lieux et perspectives de sortie de crise », *Colloque International sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l'Electrotechnique, CIMGLE*, Dakar 14-16 2011.
- [2]. P. Bornard, M Pavard, « Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement, Technique de l'ingénieur ». *Traité génie électrique, D 41 (D4 090)*, 1-23. 1993.

⁵ Se référer à Chaffai M.E. (1997) et Coelli T.J. (1998) sur les slacks et leur modélisation ([6] et [7]).

⁶ Certains observateurs avancent le chiffre de 1000 milliards F CFA injectés depuis l'année 2000 sans résolution de la crise.

- [3]. A. K. MBODJI., M. L. NDIAYE, P. A. NDIAYE, "Decentralized management of a multi-source electrical system: A multi-agent approach," Vol. 8(22), pp. 1256-1265, 16 June, 2013.
- [4]. M. Cirrincione , Cossentino M., Hilaire V., Koukam A., Pucci M., Sabatucci L., Vitale G. (2009), «Intelligent Energy Management System » *Industrial Informatics, 7th IEEE International Conference on, 2009*.
- [5]. J. Feber. (1995), *Les Systèmes Multi-agents. Vers une intelligence collective*, InterEditions.
- [6]. J. Ferber (1994), "La kénétique: des systèmes multi-agents à une science de l'interaction." : *Revue internationale de Systémique*.
- [7]. O. Gutknect, J. Feber (2000), «Madkit multi-agent: une architecture de plateforme multi-agents générique». *Rapport de Recherche*. Laboratoire d'informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, Université de Montpellier II. 2000.
- [8]. Transport, SENELEC Direction., *Rapport annuel Mouvement d'énergie*, (pp. 28). Dakar, 2008.
- [9]. E. M. Ndiaye, *L'économie sénégalaise : enjeux et problématiques*, l'Harmattan 2010.
- [10]. F Bousquet, O. Barreteau, J. Webber, «Modélisation d'Accompagnement : Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables » *Quel Environnement au 21ème Siècle ?* 1996.
- [11]. T Logenthiran, D Srinivasan, A.M. Khambadkone, Aung HN, "Multiagent system for real-time operation of a microgrid in real-time digital simulator," IEEE Transactions on Smart Grid, Article number 6180026, 3(2):925-933, 2012.
- [12]. G. Amit, K. Kainou, P. Tinus. «Chapitre 2: Combustion stationnaire », *Lignes directrices du GIEC*, vol. 2 Energie, 53 p, 2006.
- [13]. J. Richalet. « Modélisation et identification des processus », *Techniques de l'ingénieur* R7140, 1988.
- [14]. H. Averch, L. L. Johnson. (1962), "Behaviour of the Firm Under Regulatory Constraint", *American Economic Review*, n° 52, p.1052-1069.