

**GESTION OPTIMALE D'UN RESEAU ELECTRIQUE INTEGRANT DES ENERGIES  
RENOUVELABLES INTERMITTENTES DANS LES PAYS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST**

Cas du solaire photovoltaïque sur le réseau national de Burkina Faso 2017-2020

Par

**KAMBOU CELESTIN** (Distant Production House University)

Email : [celkam707@gmail.com](mailto:celkam707@gmail.com)

**NIZEYIMANA Jean Baptiste** (Distant Production House University)

Email : [njebanize@gmail.com](mailto:njebanize@gmail.com)

**0. RESUME**

Actuellement, les stratégies de gestion de l'énergie dans les réseaux intelligents sont pour la plupart limitées à l'intérêt d'un sous-système. En règle générale, chaque acteur est géré de façon autonome sans tenir compte du fait qu'il est intégré dans un réseau électrique à proximité. Par exemple, un système de gestion de l'énergie des bâtiments vise à fournir le niveau de service souhaité aux occupants et ne se soucie pas de son impact sur le réseau, sauf s'il doit en respecter certaines contraintes. Cette manière de gérer peut conduire bien entendu à un équilibre donné mais la résultante ne sera qu'un ensemble de sous-systèmes optimisés qui amèneront rarement à un optimum global dans la poche à laquelle ils appartiennent. Compte tenu de ce qui est dit ci-dessus, et au vu d'une architecture de réseaux de distribution en évolution rapide; la restructuration physique et algorithmique en sous réseaux physiques ou virtuels permettra de répondre efficacement aux problématiques liées à :

- La sûreté de la fourniture
- L'intégration massive de renouvelable
- La qualité de l'énergie

— L'apparition de nouvelles charges non conventionnelles

— Aux services systèmes Dans la littérature, les aspects du contrôle et de la gestion de l'énergie de micro réseau sont traités séparément, et l'interaction de réseau intelligent est simplement proposée. Pour relever ces défis, le concept de réseaux intelligents est apparu au cours de la dernière décennie. Il s'appuie sur les capacités des systèmes de communication modernes qui permettent le flux continu de données entre les acteurs d'un réseau intelligent et sur les capacités de calcul évolutives permettant de mettre en œuvre des stratégies avancées de gestion de l'énergie à grande échelle.

## **1. INTRODUCTION**

### **1.1 Les enjeux de modélisation du système électrique dans une perspective de long terme**

Le fonctionnement du système électrique repose sur la nécessité d'assurer l'équilibre entre production et consommation à chaque instant et au moindre coût, pour une grande variété de situations (fluctuations de la demande et de la production renouvelable, pannes et maintenance des groupes de production et des infrastructures de réseau). Or, les préoccupations environnementales, notamment le réchauffement climatique, mais également des préoccupations d'ordre géopolitique concernant le prix et la disponibilité des combustibles conduisent, d'une part, à accroître la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie et, d'autre part, à faire évoluer le mix électrique vers des moyens moins polluants, moins carbonés et/ou reposant sur des ressources plus faciles d'accès. Il faut alors s'assurer que ces évolutions ne viennent pas compromettre le fonctionnement du système électrique.

Dans cet article, nous souhaitons aborder cette problématique sous l'angle de la prospective, discipline dont la vocation est de construire le futur. Il s'agit dans cet article de décrire plus précisément le système électrique et son fonctionnement, puis de le positionner dans le contexte

où s'inscrit son évolution actuelle. L'électricité est ainsi appelée à jouer un rôle de plus en plus central dans l'approvisionnement énergétique alors même que sa production est aujourd'hui la principale source des émissions de CO<sub>2</sub>. Parmi les solutions envisagées pour décarboner la production d'électricité, le renouvelable variable présente certaines particularités (production non-pilotable, moindre prévisibilité, énergie plus dispersée que pour les moyens conventionnels et fonctionnement non-synchrone avec le reste du système électrique) qui pourraient complexifier le fonctionnement du système électrique. Ce constat nous amène à définir un cadre d'analyse pour l'étude de l'évolution sur le long terme du système électrique, notamment de la pénétration du renouvelable dans la production d'électricité, à l'aide de la modélisation prospective. Après avoir présenté cette démarche, nous montrons finalement que la pénétration du renouvelable, en plus d'être un enjeu pour la gestion du système électrique, en constitue également un pour l'analyse prospective, tant les échelles de temps et d'espace impliquées sont disparates.

## **1.2 Caractéristiques du système électrique**

### **1.2.1 Description du système électrique**

L'utilisation de l'électricité s'est rapidement étendue aux applications de la vie courante, industrielles et résidentielles, suite à la découverte du transport du courant à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. Dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle des sociétés de transport d'énergie sont créées pour construire des réseaux électriques destinés à acheminer l'électricité produite par les centrales hydrauliques jusqu'aux villes (Meslier et Persoz 1989, part. 2.1). Depuis, sa part dans la consommation globale d'énergie n'a cessé de croître (Aguet et Morf 1993, part. 1.2.1) et le taux d'accès à l'électricité est devenu un indicateur de développement des pays  $\lambda$ . Le système électrique, c'est-à-dire l'ensemble des centrales produisant l'électricité, les infrastructures de réseau servant à la transmettre, et les

dispositifs la consommant, a en fait relativement peu évolué au cours du XXème siècle. Certes de nouvelles technologies de production et de nouveaux modes de consommation ont vu le jour, le rendement des équipements s'est amélioré, les dispositifs de surveillance et de contrôle se sont développés, ainsi que le réseau électrique, plus étendu et mieux maillé, mais l'architecture globale du système est restée la même<sup>λ</sup> : l'électricité est essentiellement produite et transportée en haute tension, puis distribuée et consommée en basse tension. Aujourd'hui encore, excepté dans certaines régions peu électrifiées, le système électrique repose sur une telle architecture centralisée. Nous présentons maintenant de manière plus détaillée les principales caractéristiques du système électrique.

### **1.2.2 Structure du système électrique**

Le système électrique représente l'ensemble des machines et dispositifs qui permettent de produire, transporter, répartir, distribuer et consommer de l'électricité dans un périmètre géographique donné. Ce périmètre peut être un pays, un groupe de pays, ou un ensemble interconnecté et fonctionnant à la même fréquence. On parle ainsi de système électrique européen ou encore de système électrique français. Il est classiquement scindé en quatre grands domaines d'activité : production, transport, distribution, et fourniture.

Depuis la directive européenne du 26 juin 2003 concernant les « règles communes pour le marché intérieur de l'électricité », ces activités doivent être juridiquement séparées dans les différents Etats membres. La production et la fourniture doivent être ouvertes à la concurrence, contrairement aux activités liées à la gestion des réseaux électriques qui sont des monopoles naturels (Parlement Européen et Conseil 2003a). En France, le transport est réalisé par RTE (Réseau de Transport d'Electricité) et la distribution, en grande majorité par Enedis <sup>λ</sup> ainsi que par des entreprises locales

de distribution (ELD) . Dans sa grande majorité, l'électricité est produite en courant alternatif à des tensions allant de 10 kV à quelques dizaines de kilovolts. Elle est ensuite injectée sur le réseau de transport, après avoir été « rehaussée » à un niveau de tension de plusieurs centaines de kilovolts afin de pouvoir être transportée sur de relativement grandes distances avec le moins de pertes possibles. L'électricité est enfin abaissée à plusieurs reprises à l'aide de transformateurs avant de pouvoir être amenée jusqu'aux consommateurs via le réseau de distribution en basse tension (Bergen, Arthur R. et Vittal, Vijay 2000, part. 5.0).

Une partie de la production est également réalisée à des niveaux de tension plus faibles et directement injectée sur les réseaux de distribution, voire pour la production la plus décentralisée, consommée sur place $\lambda$  . De même une partie des consommateurs soutirent l'électricité depuis des niveaux de tension plus élevés, typiquement des sites industriels ou encore le transport ferroviaire.

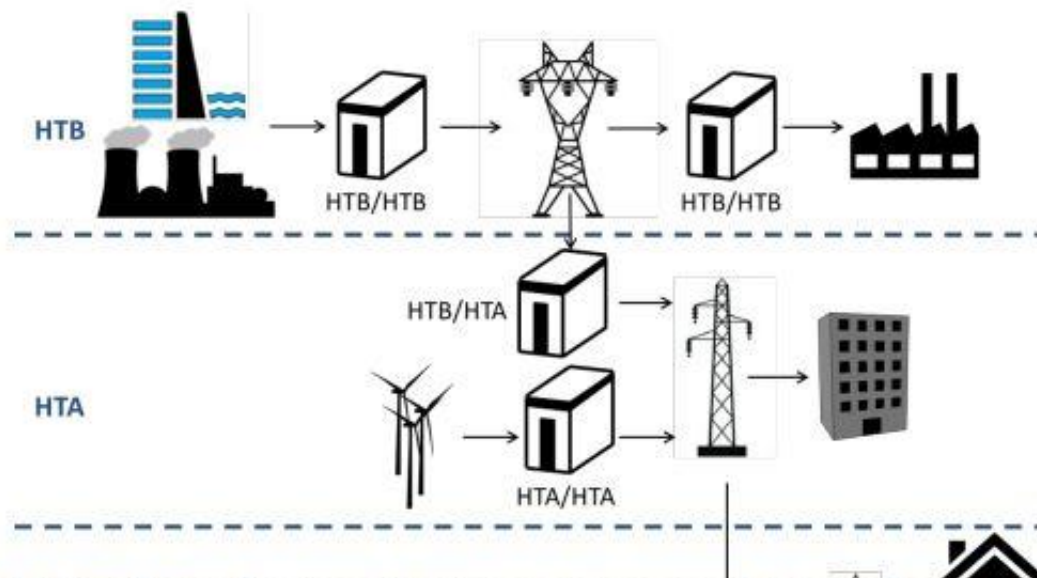


Figure 1-1 : Stratification d'un réseau électrique en plusieurs niveaux de tension $\lambda$  pour acheminer l'électricité de la production à la consommation.

### **1.3 Contexte et Perspective du sujet en question**

En n'oubliant pas les chocs pétroliers successifs de 1973 et 1979 qui ont dévoilé l'importance de la donnée énergétique ce qui a abouti à répondre aux besoins de consommation et soutenir la croissance qui deviennent de plus en plus importante avec l'évolution des modes de vie et l'augmentation de la population. Bien que les dates des pics de production pour les différentes ressources fassent toujours débat, La limite des stocks de pétrole, de gaz ou de charbon ne fait plus de doute aujourd'hui. Les questions environnementales viennent s'ajouter au problème d'approvisionnement énergétique avec les Sommets de la Terre de Kyoto (1997). Une liste de recommandations pour réduire les émissions de gaz à effet de serre est actuellement établie et acceptée politiquement et socialement. Toutefois, la question demeure sur le comment se passer du recours aux énergies fossiles, lesquelles rappelons le, satisfont actuellement les trois quarts des besoins mondiaux.

#### **1.3.1 Cas du Burkina Faso**

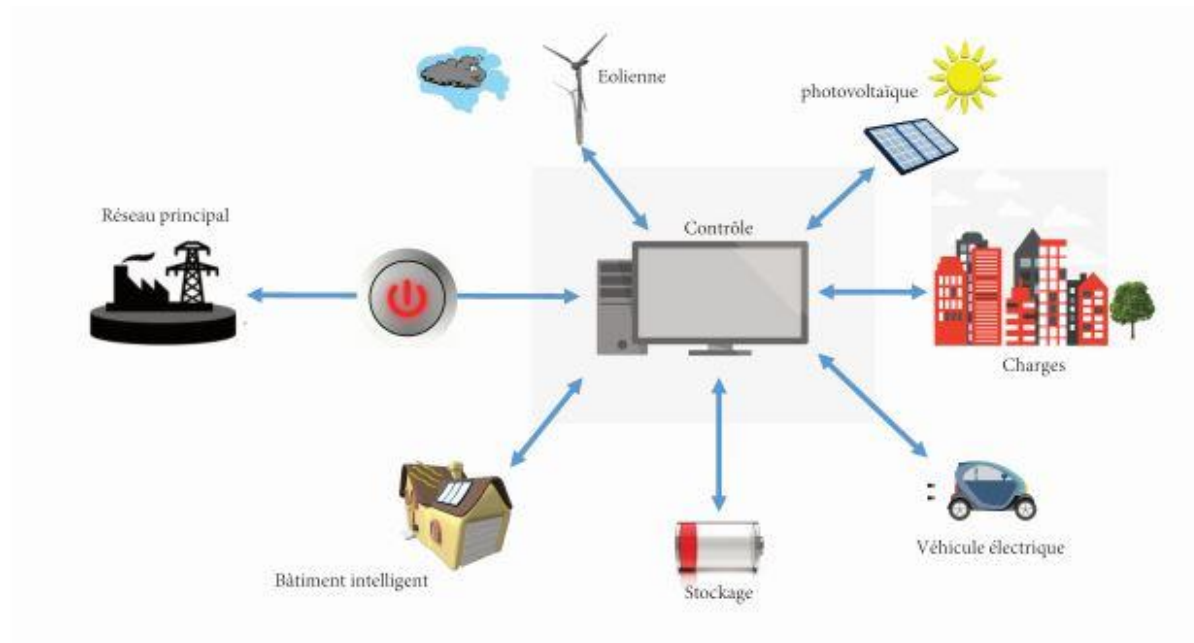
Dans ce travail nous nous intéressons tout particulièrement au cas du Burkina Faso. Outre, l'intérêt écologique du recours au renouvelable, ce dernier peut être un complément d'ajustement à une situation des plus préoccupantes. En effet, le secteur de l'électricité Burkinabaise est au cœur d'une crise profonde. Le secteur est incapable d'assurer une fourniture fiable pour l'habitat, le tertiaire et l'industrie. Ce secteur est un drain massif sur les finances publiques, il accumule une dette énorme, et ceux qui sont le moins en mesure besoins de s'approvisionner ailleurs en subissent les

conséquences les plus néfastes. L'état du secteur de l'électricité symbolise à lui seul les contraintes d'un marché libre et d'une gouvernance non-régaliennne. Ainsi, les coupures d'électricité sont quotidiennes au Burkina Faso dans des certaines régions et de plus est la qualité de l'énergie distribuée laisse à désirer. Depuis les années 1990, il n'y a pas eu de nouvelles capacités de production d'électricité installées, les dernières ayant été deux centrales à cycle combiné. Cela a poussé à la fois les particuliers et les industriels à des investissements massifs dans les systèmes de secours. Cette forme de sécurisation de l'approvisionnement, amène à peu près à une surfacturation énergétique de 25% imputable aux consommateurs. De plus les interruptions imputables au distributeur coûtent près de 400 millions d'Euro en pertes annuelles.

### **1.3.2 Réhabilitation du réseau**

Afin de pallier en partie à ces difficultés d'une part et d'atténuer les émissions du gaz à effet de serre, le réseau électrique existant intègre déjà les ressources énergétiques renouvelables qui peuvent être le complément nécessaire à la production d'électricité traditionnelle actuelle. La production d'énergie distribuée est basée sur des systèmes qui peuvent être classés comme suit :

- Système connecté au réseau, avec une injection de puissance totale et permanente ;
- Système autonome, considéré comme un substitut de la connexion au réseau d'électricité, principalement pour les sites distants ou isolés ;
- Hors réseau / système connecté au réseau et système de sécurité. En zone urbaine, il y a un développement important de petites centrales de production décentralisée photovoltaïque (PV) associées ou intégrées aux bâtiments.



### 1.3.3 Composants générateurs

#### 1.3.3.1 Le photovoltaïque

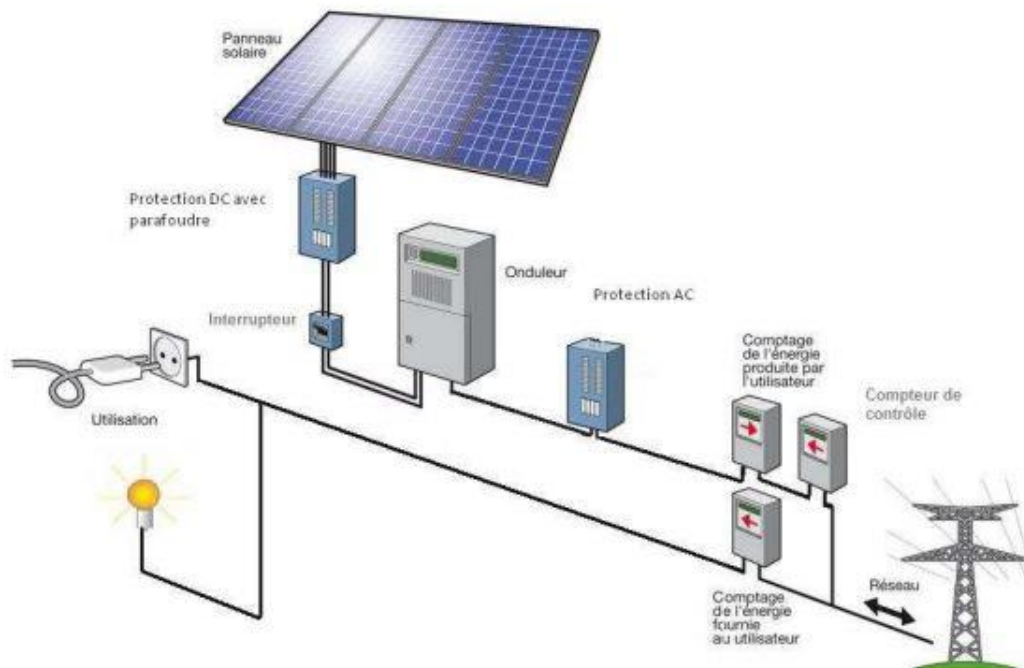
Les systèmes photovoltaïques (PV) devraient augmenter de manière significative dans le monde entier. Les générateurs PVs sont une source intéressante d'énergie renouvelable pour la production d'électricité urbaine distribuée en raison de leur taille modulable et un fonctionnement silencieux. Un autre avantage tient de l'évolutive, à savoir que le système peut augmenter en taille par adjonction de modules supplémentaires pour répondre à une augmentation de la puissance installée en charges. Nous récapitulons ci-dessous les principaux avantages de la production d'énergie à partir du PV qui sont les suivantes :



- Délai court pour concevoir, installer et démarrer une nouvelle installation.
- Hautement modulaire.
- Répond très bien aux exigences de charge de pointe à condition d'être muni d'un stockage.
- La structure est statique donc pas de pièces mobiles, et par conséquent pas de bruits d'une part ni d'usure mécanique d'autre part.
- Très mobile et portable en raison de son poids léger et de sa géométrie (panneaux). Les panneaux PV sont des systèmes qui convertissent la radiation d'ensoleillement directement en électricité. La technologie PV est bien établie et largement utilisée pour l'alimentation électrique des sites éloignés du réseau de distribution [Jen+00]. Les cellules photovoltaïques peuvent être divisés en quatre groupes : les cellules cristallines, des cellules à couches minces, les cellules multicouches et enfin le PV organique. Les cellules multicouches peuvent aussi être considérées comme plusieurs couches de cellules photovoltaïques en couches minces. Les différents types sont décrits dans [Lin00]. Figure ci-dessous réactualisée chaque année par NREL (National Renewable Energy Laboratory) montre toutes ces technologies et l'évolution de leurs rendements. Ce que l'on appelle communément un "onduleur" est souvent composé de deux étages de conversion :
  - Un premier étage, en général un convertisseur DC/DC élévateur qui, dans la majorité des cas a pour fonction d'extraire le maximum de puissance disponible du système PV.
  - Un bus continu intermédiaire. — Un deuxième étage, un onduleur connecté au réseau qui aura pour tâche d'injecter des courants sinusoïdaux à ce réseau, de gérer éventuellement l'énergie réactive mais surtout de maintenir la tension du bus continu intermédiaire à une valeur optimale.
  - Parfois un transformateur d'isolement.

— Un filtre de puissance en sortie.

— Un certain nombre de protections et autres éléments de coupure. Des variantes existent bien entendu, comme des architectures à transformateur haute fréquence intermédiaire ou encore des fonctionnalités supplémentaires comme la participation au réglage local de la tension du réseau.



## 2. METHODOLOGIE

Dans cette partie, les aspects méthodologiques en sont l'une des parties les plus importantes. Pour cette raison, le but est d'expliquer ces aspects méthodologiques de l'entreprise. Les principaux axes

de ces aspects sont à savoir : les approches utilisées, les méthodes de collecte des données et les instruments de recherche, le plan d'échantillonnage (population, techniques d'échantillonnage, taille de l'échantillon) ainsi que les méthodes de traitement des données.

### **2.1 Conception de l'étude**

La conception de l'étude étant un cadre qui a été établi pour rechercher des réponses aux questions de recherche, elle permet d'aborder efficacement le problème de la recherche de manière logique et aussi sans ambiguïté que possible. À cet égard, la conception de cette étude est basée sur les principes fondamentaux de la recherche exploratoire où l'intention n'est pas de fournir des preuves concluantes, mais aide à avoir une meilleure compréhension du problème en explorant le sujet de recherche avec différents niveaux de profondeur (Saunders, 2012).

### **2.2 Stratégie de l'étude**

Cette recherche se réfère aux critiques, documentations et autres matériels de lecture et les réactions de l'entretien lors de la collecte des données doivent être pris en compte. En s'adressant aux littératures écrites, cela peut aider à interpréter et à mieux comprendre la réalité complexe d'une situation donnée de manière qualitative. L'approche de cette étude est qualitative car elle explore et comprend comment formuler des stratégies pour le relèvement d'un secteur de la santé en crise car elle suppose que le sens et les connaissances sont construits dans un contexte social et cherchent à comprendre les perspectives subjectives des participants (validité sociale) pour fournir une description riche des phénomènes.

### **2.3 Collecte de données**

En général, la collecte de données peut être utilisée grâce à diverses techniques. Il existe principalement deux manières différentes : par des données primaires et secondaires. Les données primaires sont des données qui ont été collectées spécialement à cette fin. Cela implique à la source d'origine de première main, alors que les données secondaires se réfèrent aux informations collectées par d'autres (Bryman et Bell, 2011).

### **2.4 Outils et méthodes de collecte de données : documentation**

La recherche documentaire fait référence à la bibliothèque et à la documentation en ligne. Il se compose de livres, d'articles de synthèse, de rapports et d'autres documents écrits dans la ligne

de l'étude. En outre, des données en ligne ont été collectées ; ces données complétaient celles que nous n'avons pas trouvées dans les livres.

## **2.5 Analyse des données**

L'analyse des données est le processus de description et d'évaluation des données. Cependant, la base de la recherche réside dans l'interprétation des données et dans la description de l'expérience vécue des êtres humains (Atkinson et al 2001). Comme la nature de cette étude s'inspire des sources de données des données primaires et secondaires, leur analyse sera basée sur l'approche interprétative ou analytique qui se concentre sur la façon dont les répondants interprètent leur réalité subjective et y attachent un sens. Comme cette étude est qualitative, il n'y a pas de manière unique d'analyser les données qualitatives (Powell et Renner, 2003 :1), nous ne nous sentons pas obligés de séparer une partie de l'analyse des données. Pourtant, nous aurons des résultats directs de la documentation et les relierons à ce qui a été dit par les observateurs dans leurs littératures et obtiendrons l'analyse des données en utilisant le prisme des cadres théoriques et conceptuels conçus pour cette étude.

## **3. RESULTATS**

### **3.1 Retour à l'Énergie éolienne**

L'énergie éolienne devrait être l'une des plus importantes sources d'énergie électrique dans les années à venir. Les préoccupations croissantes des problèmes environnementaux exigent la recherche de sources électriques plus durables. Les éoliennes ainsi que les systèmes photovoltaïques sont des solutions possibles pour la production d'énergie respectueuse de l'environnement. Les éoliennes sont des systèmes qui comprennent un rotor, un générateur, des aubes de turbine, et une transmission ou un dispositif d'accouplement. Comme le vent souffle à travers les pales, l'air exerce des forces aérodynamiques qui causent les pales à tourner le rotor. Lorsque le rotor tourne, sa vitesse est modifiée pour correspondre à la vitesse de fonctionnement du générateur. La plupart des systèmes possèdent une boîte de vitesses et un générateur dans un

seul dispositif, derrière les pales de la turbine. Le principe de fonctionnement de l'éolienne peut être décrit dans deux processus, qui sont menées par ses principaux composants : le rotor qui extrait l'énergie cinétique du vent puis le convertit en couple mécanique et le système de production qui convertit le couple en électricité.

### 3.2 Les types de machines électriques

L'alternateur peut être une machine synchrone ou asynchrone, utilisée en vitesse fixe ou en vitesse variable. La machine asynchrone est utilisée dans la plupart des cas car cette génératrice peut supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces variations de vitesses engendrent des sollicitations mécaniques importantes sur le système qui se trouvent plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe.

Une éolienne fonctionne en extrayant l'énergie cinétique du vent passant par son rotor. Typiquement, une éolienne est composée d'un rotor, un générateur, trois pales, et un mécanisme d'entraînement. Comme le vent souffle à travers les pales, la puissance captée par l'éolienne est convertie en énergie électrique par un générateur. L'angle d'inclinaison des pales est contrôlé afin de limiter la puissance de sortie du générateur à sa valeur nominale pour des vitesses de vent élevées. Grâce à une certaine interface électronique de puissance, la puissance est transportée au réseau. Une éolienne fonctionne en extrayant l'énergie cinétique du vent passant par son rotor. La puissance développée par une éolienne est donnée par :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V_w^3 A$$

Où :

**P** : La puissance (W).

**C<sub>p</sub>** : Le coefficient de puissance.

**ρ** : La densité de l'air (1,225kg/m<sup>3</sup>).

**V<sub>w</sub>** : La vitesse du vent (m/s).

**A** : La surface balayée du rotor (m<sup>2</sup>).

La force extraite sur le rotor est proportionnelle au carré de la vitesse du vent et ainsi de l'éolienne doit être conçu pour résister à de grandes forces pendant les tempêtes. La plupart des conceptions modernes sont des rotors à trois pales à axe horizontal car cela donne une bonne valeur du pic C<sub>p</sub> avec une conception esthétique. Le coefficient de puissance C<sub>p</sub> est une mesure de la quantité d'énergie dont le vent est extrait par la turbine. Il varie en fonction de la conception du rotor et la vitesse relative du rotor et le vent pour donner une valeur pratique maximale d'environ 0,4 [Jen+00]. Le C<sub>p</sub> est une fonction du rapport de vitesse de pointe λ et l'angle d'attaque β. Comme le calcul de ce coefficient nécessite la connaissance de l'aérodynamique et les calculs sont assez compliquées, des approximations numériques ont été développés [PP01] et illustrées par la fonction suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_i} + 0.0068\lambda$$

Où :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

### **3.3 Conclusion sur les impacts du renouvelable variable : des besoins supplémentaires de flexibilité**

Peu corrélé avec la demande, la pénétration du renouvelable variable dans la production d'électricité requière l'installation de moyens de production contrôlables, de capacités de stockage, d'augmenter les échanges avec les pays voisins, ou encore de décaler la demande, pour que l'équilibre production – consommation soit assuré en permanence. Les variations parfois rapides de la production renouvelable variable, ainsi que sa moindre prévisibilité, induisent de plus des contraintes supplémentaires sur les temps d'arrêt et de démarrage des unités, qui ne peuvent être trop longs. Cela restreint les types de centrale qui pourront être installés. La présence de renouvelable variable dans la production électrique reporte sur les autres moyens de production la participation aux services système  $\lambda$ . Dans la suite du manuscrit, nous appellerons flexibilités les différentes options qui facilitent l'intégration du renouvelable variable et qui sont compatibles avec les contraintes que nous venons de mentionner. Enfin, l'injection prioritaire du renouvelable sur le réseau électrique réduit le taux d'utilisation des moyens de production conventionnels, détériore les marges de ces derniers, qui finalement peuvent ne plus pouvoir être rentabilisés par la seule vente d'électricité sur le marché. La pénétration du renouvelable risque donc de conduire à un paradoxe, entre la nécessité d'être réalisée parallèlement à l'installation de nouvelles flexibilités pour le système électrique, et la captation de la rémunération liée à la vente d'électricité. Il y a donc là également une réflexion à porter sur le cadre réglementaire et économique encadrant la production et la vente d'électricité, réflexion qui dépasse le cadre de cet article.

### **BIBLIOGRAPHY**

- KHEZZANE, K. *Gestion Energétique Optimale des Flux Énergétiques dans un Réseau Electrique Intelligent Intégrant des Sources d'Énergies Renouvelables* (Doctoral dissertation, Université de Biskra-Mohamed Khider).
- Kanchev, H. (2014). *Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable: Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain* (Doctoral dissertation, Ecole centrale de Lille).
- Rigo-Mariani, R. (2014). *Méthodes de conception intégrée" dimensionnement-gestion" par optimisation d'un micro-réseau avec stockage* (Doctoral dissertation).
- Péresse, J. (2013). Gérer les intermittences électriques (production et transmission d'électricité): le point de vue d'un industriel. In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (No. 1, pp. 125-131). ESKA.
- RENOVELABLES, V. I. D. É. L'UNIVERSITÉ DE PERPIGNAN VIA DOMITIA.
- Voyant, C. (2011). *Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels* (Doctoral dissertation, Université Pascal Paoli).
- Klaimi, J. (2017). *Gestion multi-agents des smart grids intégrant un système de stockage: cas résidentiel* (Doctoral dissertation, Troyes).



- Kamel, L. (2016). *Gestion d'énergie dans un réseau intégrant des systèmes à source renouvelable* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).
  
- KRÜGER, E. (2016). *Développement d'algorithmes de gestion optimale des systèmes de stockage énergétique basés sur des modèles adaptatifs* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes (ComUE)).
  
- Doucouré, B. (2015). *Proposition, intégration dans un système de gestion de réseau intelligent et validation expérimentale d'une méthode de prédiction pour un système d'énergies renouvelables* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
  
- Klaimi, J. (2017). *Gestion multi-agents des smart grids intégrant un système de stockage: cas résidentiel* (Doctoral dissertation, Troyes).