

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES MICRO-RESEAUX AUTONOMES ALIMENTENT
PAR LA COMBINAISON PHOTOVOLTAIQUE-DIESEL SANS STOCKAGE
D'ENERGIE**

Burkina Faso 2017-2020

Par

BOGNINI YIBOULI LUCIEN (Distant Production House University)

Email : yiboulilucien@yahoo.fr

NIZEYIMANA Jean Baptiste (Distant Production House University)

Email : njebanize@gmail.com

0. RESUME

La question de l'énergie et de sa production est actuellement au cœur de tous les débats qu'ils soient politiques, économiques, ou écologiques : les estimations des ressources d'énergie primaire restantes, le réchauffement de la planète et la constante hausse des besoins énergétiques forcent les états à réfléchir au problème. Le développement des énergies renouvelables est une des mesures nécessaires en vue de répondre aux besoins du pays et d'assurer la sécurité de l'énergie. Le Vietnam a connu une augmentation souhaitée du produit intérieur brut (PIB) avec une moyenne annuelle de 7% sur les 15 dernières années. Cette croissance économique a pour conséquence directe, d'accroître la demande d'énergie électrique, mais la capacité de financement reste un facteur très limitant. Pour atteindre ces objectifs ambitieux de croissance économique, il faudra élargir son financement afin d'attirer des investisseurs locaux et étrangers pour investir dans le secteur de l'énergie ; et assurer le développement de sources d'énergies diversifiées et concurrentielles.

La demande d'électricité a dépassé l'offre d'environ 3% au cours des cinq dernières années au Vietnam, et la consommation devrait passer de 98 milliards de kWh en 2011 à 175 milliards de kWh en 2015, soit 11,15% de croissance par an de 2016 à 2020 ; et 7,4% à 8,4% par an de 2021 à 2030. Parmi les secteurs consommateurs d'électricité, on trouve le commerce en particulier, qui a connu une forte augmentation, + 9,8% par rapport à 2010. Pendant ce temps, le pays a produit 109 milliards de kWh électrique en 2011, soit une hausse de 9,2% par rapport à 2010.

1. INTRODUCTION

Dans ce délai, nous allons présenter une étude bibliographique dédiée à un générateur photovoltaïque autonome. Nous allons exposer quelques généralités reliées au domaine du solaire photovoltaïque ; le développement des cellules photovoltaïques, les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque, les phénomènes contraignants la production et les topologies de convertisseurs DC/DC dédiés aux applications photovoltaïques. Aussi, nous nous intéressons aux interfaces de puissance dédiées à l'acheminement de la puissance puisée de la source photovoltaïque vers les consommateurs. Nous allons ainsi introduire les principales contraintes associées au bon fonctionnement de ces interfaces ; notamment, la qualité de l'énergie exportée, l'autonomie face aux intermittences de la source solaire et la stabilité de l'interface de conversion d'énergie.

1.1 Générateur photovoltaïque

Développement

Les cellules photovoltaïques ou composants optoélectroniques sont les éléments de base d'un générateur photovoltaïque. Cette classe de matériaux a la faculté de transformer la lumière "solaire" en énergie électrique. Ce phénomène est connu sous le nom d'effet photovoltaïque, découvert par Antoine Becquerel en fin de XIX^{ème} siècle. Cependant, le faible rendement de ces composants et de leur coût constitue un problème de taille, qui freine relativement le déploiement de la filière solaire en l'absence des subventions publiques. Cependant, le secteur des composants optoélectroniques est sans conteste en plein essor et l'émergence de grands projets de centrales solaires ont conduit à une forte augmentation de la production de panneaux solaires et à une baisse sensible du kWh solaire.

Dans l'objectif d'améliorer le rendement et/ou de réduire leur coût, trois générations de panneaux de technologies différentes ont à ce jour émergées ou sont en développement. La première génération, concerne les cellules en silicium cristallin relativement épaisses dont le rendement est voisin de 12%, ainsi que les multi-jonctions développées initialement pour le spatial dont le

rendement peut atteindre 30%. Les cellules en couches minces constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération. Les plus connus sont, le Silicium amorphe et microcristallin (TFSi), le Semi-conducteur Polycristallin CdTe (Tellurure de Cadmium) et l'alliage Cu (In,Ga) Se₂ (Cuivre-Indium/Gallium-Sélénium). Dans cette classe on retrouve aussi, les multi-jonctions en couche mince. L'appellation, troisième génération, a été dédiée aux technologies à base de films photovoltaïques organiques. Cette, génération offre une grande flexibilité aux applications solaire, mais le rendement maximum obtenu en laboratoire (8,3% en 2010) reste faible. La figure 1.1 montre les rendements record des différentes technologies obtenus en laboratoire dans ces dernières décennies. Pour plus de détails sur cette partie, le lecteur peut se référer aux références [PET,09] -[LIN,07] -[PAR,11].

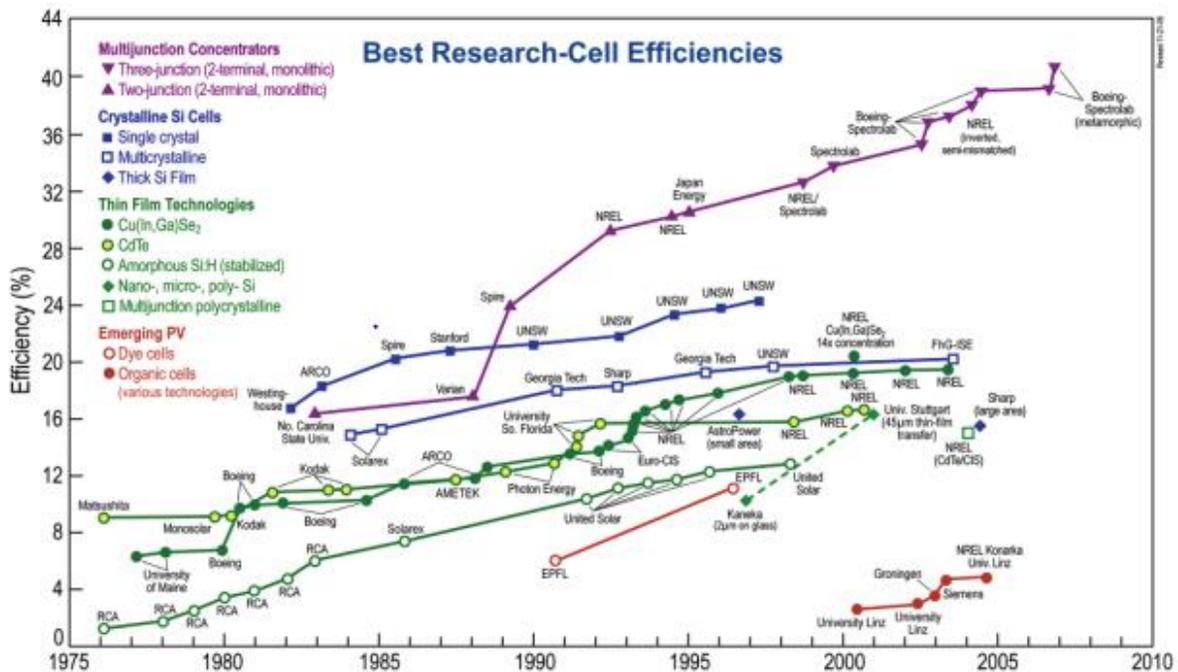


Figure 1.1. Rendements record de cellules photovoltaïques obtenus en laboratoire, [PET,09].

En dehors des progrès énumérés précédemment, d'autres innovations liées à la maximisation de rendement des enceintes photovoltaïques, sont à rappeler. À titre d'exemple, les modules CPV

(concentrated-photovoltaics) développés par Heliotrop [CPV,10], permettent un rendement élevé grâce à des lentilles de Fresnel qui concentre l'énergie du soleil par 900 sur des cellules triple-jonction à haut rendement (37%). Les surfaces de production sont réduites de 900 fois comparées à des panneaux à base de silicium. Une autre technologie innovante, est la HITMD (Hetero Junction Intrinsic Thin-Layer) [HIT,09], autrement dit, capteur d'énergie solaire à double face. Ces modules photovoltaïques permettent un gain de plus de 30% qu'un panneau mono-face classique. Ces technologies garantissent un avenir prometteur à la filière photovoltaïque, en particulier si un développement à grande échelle peut être envisagé, développement qui va réduire certainement les coûts d'installation. Dans la suite, nous allons présenter en termes simples quelques généralités liées au secteur photovoltaïque ; caractéristiques, paramètres contraignants, association de panneaux.

1.2.2. Caractéristiques

La figure 1.2 montre les caractéristiques courant-tension $I_{pv}(V_{pv})$ et puissance-tension $P_{pv}(V_{pv})$ d'un générateur photovoltaïque pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés.

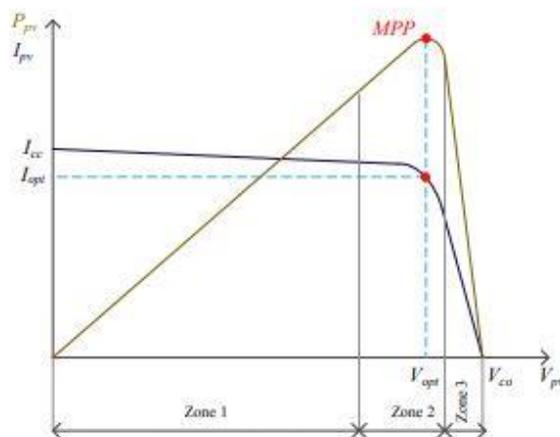


Figure 1.2. Caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ d'un générateur PV pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés.

La nature intermittente de l'énergie solaire, fonction des conditions météorologiques ainsi que des demandes coté consommateur, rend complexe la possibilité d'un fonctionnement optimal.

Remédier aux problèmes d'optimisation et de gestion des systèmes photovoltaïques, impose généralement un étage d'adaptation comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques ; contrôlés par des stratégies de poursuite en temps réel du point de fonctionnement à puissance maximale dites "MPPT" (Maximum Power Point Tracking). Les caractéristiques tension-courant et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclairagements. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant photovoltaïque et de la puissance produite, figure 1.3 (a) et (b). L'accroissement du courant de court-circuit I_{cc} est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert V_{co} .

1.2.3. Ombrage et protection des panneaux photovoltaïques

Le retour d'expérience de la filière solaire, montre que les contraintes technologiques et météorologiques se traduisent par une impuissance des installations photovoltaïques à extraire la totalité de la puissance disponible au sein des cellules.

Technologiquement, on ne peut éviter l'hétérogénéité électrique des cellules. Ceci induit une production électrique en baisse, ce phénomène étant connu sous le nom de pertes par "miss match". Malgré le fait que ces pertes entraînent une baisse de la puissance produite comprises entre 1% et 10% [VIG,10] - [NOR,09], elles diminuent la rentabilité des générateurs solaires et augmente la durée d'amortissement de l'investissement.

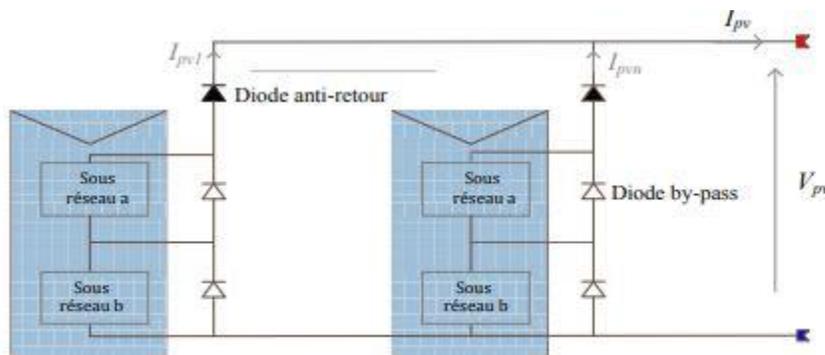
Un autre problème contraignant pour l'exploitation des champs photovoltaïques, est celui de l'ombrage partiel. En effet, le photovoltaïque réagit de manière très sensible aux phénomènes d'ombrages [DEL,09] - [DIA,10] - [VIG,10]. Le rendement baisse fortement au-delà d'un certain pourcentage de la surface ombrée. Le facteur d'impact de l'ombrage (Shade Impact Factor (SIF)) [DEL,09], peut être calculé comme suit :

$$SIF = \left[1 - \frac{P_{shade}}{P_{sys}} \right] \frac{A_{sys}}{A_{shade}}$$

Ou A_{sys} et A_{shade} représentent respectivement la surface totale du champ photovoltaïque et la surface ombrée. P_{sys} et P_{shade} sont respectivement la puissance nominale et la puissance extraite sous l'effet d'ombrage. En conséquence, les panneaux photovoltaïques doivent être

protégés contre les effets destructifs de tels phénomènes. Ils sont dotés de deux types de protection :

- Diode by-pass en cas de connexion série, pour faire face aux tensions inverses qui provoquent des échauffements ;
- Diode anti retour en cas de connexion en parallèle pour éviter le retour de courant (courants négatifs).



Exemples d'association sécurisée de deux modules photovoltaïques en parallèle avec leurs diodes de protection.

Lors de l'enclenchement de ces dispositifs de sécurité, des irrégularités typiques apparaissent dans les caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ du générateur photovoltaïque, figure 1.6. Cette figure reflète l'ampleur du déficit en puissance que peut provoquer un ombrage ainsi que la possibilité d'apparition de plusieurs maxima locaux de puissance. Face à de tel cas de figure, les algorithmes MPPT classiques sont automatiquement mis en échec. En effet, ils sont conceptuellement dédiés à la recherche d'un maximum de puissance pour des conditions d'ensoleillement uniformes. Pour faire face à ce problème, de nombreux travaux ont été menés pour adapter les algorithmes MPPT à ce cas de figure.

1.2.3 Associations de panneaux photovoltaïques

La connexion des panneaux photovoltaïques est généralement conditionnée par des contraintes liées à l'application envisagée, au niveau de puissance et à la qualité de l'énergie. Une connexion série permet d'avoir le niveau de tension voulu. Quant à la connexion parallèle, elle est essentielle

pour atteindre le niveau de puissance requis. Cependant, des réflexions sur la reconfiguration des associations classiques sont menées dans différents travaux de recherche, afin de faire face aux problèmes technologiques et météorologiques précédemment exposés. La finalité de ces recherches, est de proposer une association optimale valorisant au mieux la production électrique de l'ensemble.

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 composait 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 sentions pas obligés de séparer une partie de l'analyse des données. Pourtant, nous aurons des résultats directs du 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 Micro-réseaux autonomes

Un micro-réseau autonome désigne l'interface de puissance utilisée pour transporter l'énergie électrique produite par une ou plusieurs sources autonomes (photovoltaïque, éolien, pile à combustible, générateur diesel...etc.) jusqu'au point d'interconnexion de consommateurs. La distinction "autonome" fait référence au genre d'applications non raccordées au réseau et (ou) à l'autonomie de ces applications. La structure d'un micro-réseau autonome varie en fonction des contraintes de l'application. Néanmoins, quatre éléments sont souvent utilisés :

- Les sources (renouvelables, batteries, générateur diesel...etc.) ;
- Les convertisseurs de puissance (permettant le contrôle et la gestion du système) ;
- Les filtres d'interconnexions (assurant la transmission d'une énergie de qualité) ;
- Les charges (statiques, ou dynamiques). Les potentialités d'un micro-réseau autonome sont évaluées suivant trois critères principaux :
 - L'autonomie ;
 - La qualité de l'énergie transitée ;
 - La stabilité. En effet, l'interface de puissance autonome doit garantir la continuité de service en garantissant la qualité de l'énergie disponible, la stabilité du réseau et sa robustesse vis-à-vis des perturbations provenant des charges. Dans la suite de cette partie, nous allons revenir en détail sur ces trois critères.

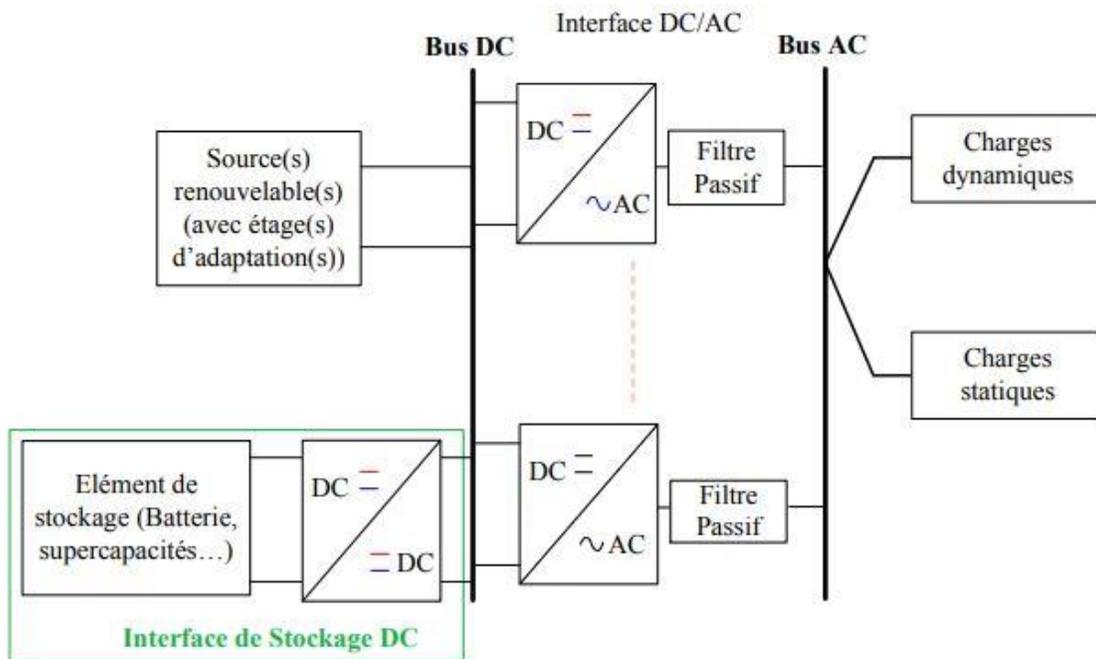
3.1.1. Autonomie

Dans le cas d'une source renouvelable (photovoltaïque, éolien...), le recours à un système de stockage est indispensable pour assurer l'autonomie de l'installation. En effet, la nature intermittente de ces sources nécessite un système de soutien, dont le rôle est d'accumuler l'excédent d'énergie produite et de fournir le complément nécessaire lors d'un déficit de production. Toutefois, nous soulignons que l'adjonction de stockage peut s'avérer nécessaire même pour les applications raccordées au réseau. A titre illustratif, les lignes électriques étant dimensionnées pour un sens de flux unidirectionnel, un flux important d'énergie dans le sens inverse (provoquer par exemple par les injections d'une centrale photovoltaïque) provoque des surtensions et engendre d'importantes dégradations du réseau [RIF,08] -[RIF,09] ; c'est l'effet de déphasage entre la production et la consommation.

3.1.1. Architectures électriques d'un micro-réseau autonome

Les micro-réseaux autonomes peuvent être subdivisés en deux principales configurations, suivant la disposition de l'organe de stockage au bus continu ou au bus alternatif, figures et 1.12.

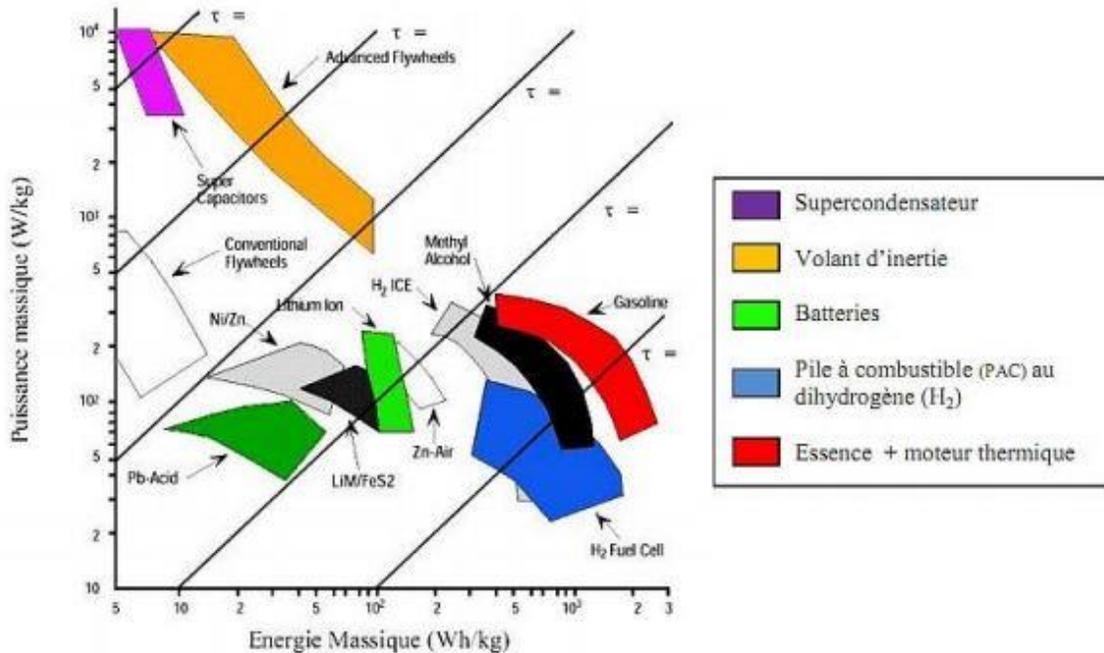
a) Micro-réseau autonome, avec système de stockage couplé au bus DC Cette configuration est dite "Standalone". Cette configuration est une solution naturelle pour l'association de la plus part des sources (de nature DC) utilisées dans ce genre d'application (panneaux photovoltaïques, pile à combustible, éléments de stockage...etc.) [FAK,11] -[CHO,11] - [VAN,08].



3.1.2. Moyens de stockage

Il existe de nombreux moyens de stockage de l'électricité. La figure 1.13, diagramme de Ragone, décrit les performances énergie-puissance massiques des technologies les plus utilisées. En règle générale, pour les applications renouvelables, ce sont les batteries et les super-condensateurs qui sont les plus utilisées. Les deux solutions peuvent être utilisées simultanément. D'un côté, les batteries confèrent une forte densité énergétique à faible densité de puissance, ce qui permet de satisfaire les régimes stationnaires de fonctionnement. D'un autre côté, les super-condensateurs ont une puissance

massique est importante (faible densité énergétique) sont plutôt destinées pour satisfaire les régimes transitoires de fonctionnement.



3.3 Qualité de l'énergie exportée

Le rôle principal d'une interface de puissance est la conservation de la qualité de l'énergie exportée jusqu'aux consommateurs, et cela, indépendamment de la nature de charges à alimenter (linéaires ou non, équilibrées ou non). Bien qu'il n'y ait pas de normes internationales spécifiques aux configurations autonomes, la qualité de l'énergie à garantir doit être (au moins) semblable à celle imposée dans le cas des réseaux interconnectés. La qualité de l'énergie exportée, revient à assurer une tension quasi-sinusoidale (à amplitude et à fréquence fixes) avec un contenu harmonique minime au point de connexion des consommateurs. La qualité de cette énergie est quantifiée par la faiblesse du taux de distorsion harmonique (THD) de cette tension.

BIBLIOGRAPHY

- Vechiu, I. (2005). *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome* (Doctoral dissertation, Université du Havre).
- Idjdarane, K., & Hacini, I. (2015). *Etude et gestion d'un système d'énergie hybride* (Doctoral dissertation, Université de Bejaia).
- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés: rapport interne.
- Al Anfaf, M. M. M. (2016). *Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).
- Moumni, A., Hadji, N., & Dahbi, H. (2020). *Etude d'une ferme typique en termes d'autosuffisance électrique par les énergies renouvelables* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR).
- Barbieri, J., Colombo, E., Mungwe, J. N., Riva, F., Berizzi, A., Bovo, C., ... & Caniato, M. RECOMMANDATIONS SUR LES TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES DURABLES POUR L'UTILISATION DES ALIMENTS DANS LES CONTEXTES HUMANITAIRES ET LES INSTALLATIONS INFORMELLES.
- William, R. J. (2018). *ETUDE DE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ADAPTE À CHAQUE ZONE SOLAIRE DE MADAGASCAR* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO).
- KHOUDIRI, S. (2018). *Commande et Optimisation d'un Système Énergétique Hybride (SEH): Application à l'Énergie Renouvelable* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA).

- Omar, F. (2014). *Contribution à l'étude des systèmes hybrides de génération: application aux énergies renouvelables* (Doctoral dissertation, University of Souk Ahras).