

GÉNÉRATEUR ÉOLIEN-DIESEL AVEC STOCKAGE D'ÉNERGIE : CRITÈRES DE CHOIX DU SYSTÈME DE STOCKAGE

Hussein **IBRAHIM**^{a,*}, Mariya **DIMITROVA**^a, Daniel **ROUSSE**^b, Adrian **ILINCA**^c, Jean
PERRON^d

^a Wind Energy TechnoCentre, 51 ch. De la mine, Murdochville, QC, G0E 1W0, Canada

^b Chaire de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique (T3E), ÉTS, Montréal, Canada

^c Laboratoire de recherche en énergie éolienne (LREE), Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Canada

^d Laboratoire International des Matériaux Antigivre (LIMA), Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC, Canada

RÉSUMÉ

Dans la plupart des régions isolées, le générateur diesel est la source principale d'énergie électrique, une méthode qui pose toujours d'immenses défis techniques et financiers. Pour ces régions, le prix d'extension du réseau électrique est prohibitif et le prix du combustible augmente radicalement avec l'isolement. Au Québec, la plupart de ces communautés sont situées dans des régions possédant une ressource éolienne suffisante pour une exploitation commerciale. L'utilisation du jumelage éolien-diesel (JED) dans ces réseaux autonomes pourrait réduire les déficits d'exploitation. Cependant, la rentabilité du JED est atteinte à la condition d'obtenir un taux de pénétration élevé de l'énergie éolienne (TPE) ce qui est possible uniquement en utilisant des systèmes de stockage. Dans cet article, sera présenté un tour d'horizon des technologies de stockage d'énergie pouvant être associées au JED. Ensuite, dans l'objectif de pouvoir comparer les performances des différentes technologies de stockage et dégager la technologie la plus performante pour le JED, une liste des critères techno-économiques sera analysée. Cette analyse mène à l'élaboration d'une nouvelle méthode de choix caractérisée par l'indice de performance des techniques de stockage d'énergie où la détermination de cet indice peut être obtenue à partir d'une série de matrices d'aide à la décision.

Mots Clés : *éolien-diesel, stockage d'énergie, indice de performance, critères de choix, sites isolés.*

1. INTRODUCTION

Le Canada occupe un immense territoire et la population est extrêmement éparse. Plus de 200,000 personnes vivent dans plus de 300 communautés isolées (Yukon, Nunavut, Îles, ...) qui ne sont pas connectées aux réseaux provinciaux ou nationaux de distribution et de transport d'électricité [1]. Cela est dû au fait qu'il est techniquement trop complexe d'étendre le réseau jusqu'à ces secteurs à cause du coût prohibitif des lignes de transmission et des pertes liées à la distribution de la puissance centralement développée aux régions éloignées. La plupart de ces communautés utilisent des diesels pour générer de l'électricité, une méthode relativement inefficace, très dispendieuse et responsable de l'émission de 1.2 millions de tonnes de gaz à effet de serre (GES) annuellement. De plus, l'exploitation de ces réseaux se solde par un déficit annuel estimé par Hydro-

Québec à environ 133 millions de dollars afin d'assurer l'alimentation de 14000 abonnés répartis dans une quarantaine de communautés québécoises non reliées au réseau principal [2]. La plupart de ces communautés sont situées près de la côte et possèdent une importante ressource éolienne. Ceci pourrait réduire les déficits d'exploitation en privilégiant le vent, un carburant local, plutôt que le diesel, un carburant importé.

Le JED représente une technique de génération d'électricité en utilisant en parallèle une ou plusieurs éoliennes avec un ou plusieurs groupes diesel. Cette approche, déjà utilisée au Yukon, Nunavut et en Alaska, rencontre des obstacles résultant des contraintes de fonctionnement des diesels qui limitent l'énergie éolienne à un niveau de pénétration trop faible pour en réaliser le plein potentiel. Ceci force à rejeter une quantité appréciable de l'énergie éolienne [3].

* auteur correspondant

Adresse électronique : hbrahim@eolien.qc.ca

Le «Jumelage Éolien-Diesel à Haute Pénétration» (JEDHP), caractérisé par des valeurs $TPP^1 > 1$, pourrait réduire d'une manière importante la consommation de diesel et les émissions de GES mais il est sujet à des problèmes techniques complexes dont les solutions sont très coûteuses. De plus, la rentabilité du JEDHP n'est atteinte qu'à un certain seuil de TPE ce qui est possible uniquement en utilisant des systèmes de stockage. Pour cette raison, un seul projet de ce type, sans aucun stockage, est actuellement opérationnel en Alaska [4].

L'utilisation des moyens de stockage associés au JEDHP maximise TPE en profitant de l'énergie excédentaire, donne une puissance plus stable et permet l'arrêt complet des groupes diesel pendant que la production éolienne est supérieure à la demande en apportant des économies sur l'entretien et le coût de remplacement des diesels.

2. TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE

Le stockage de l'électricité peut se faire d'une façon significative. Il faut d'abord la transformer en une autre forme d'énergie stockable, puis effectuer la transformation inverse lorsqu'on désire disposer à nouveau de l'électricité. Les possibilités techniques sont très vastes et concernent pratiquement toutes les formes d'énergie : mécanique, chimique ou thermique. Ces diverses solutions ont toutes été explorées. Elles ont donné naissance aux techniques comme : volant d'inertie, stockage hydraulique, stockage sous forme d'air comprimé, batteries redox, batteries électrochimiques, stockage d'hydrogène, stockage thermique, supercondensateur, supraconductrice, etc.

Les moyens de stockage de l'énergie éolienne excédentaire envisagés présentement sont sous forme thermique (eau chaude), ou par des bancs de batteries. Ces dernières sont dispendieuses, difficiles à recycler, une source de pollution et limitées en puissance et en durée de vie. Les piles à combustible représentent une alternative viable mais la complexité technique, le prix prohibitif et le faible rendement retardent l'acceptation par le marché. De là apparaît la nécessité de choisir un dispositif de stockage assez efficace, propre, dynamique et adaptable au JEDHP afin qu'il soit capable de réduire la consommation du diesel et l'émission des GES et d'agir en temps réel en fonction des fluctuations de la puissance générée et consommée.

Pour ce faire, toutes les technologies de stockage d'énergie ont été étudiées avec leurs caractéristiques techniques, économiques et environnementales d'une façon objective et détaillée dans les ouvrages suivants [5], [6]. Ces études ont menés à la conclusion

¹ TPP – taux de pénétration en puissance : rapport entre la puissance éolienne et la puissance totale de la charge à un instant donné.
TPE – taux de pénétration en énergie : rapport entre l'énergie éolienne annuelle et l'énergie annuelle totale consommée par la charge.

* auteur correspondant
Adresse électronique : hibrahim@eolien.qc.ca

préliminaire que le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé est la technologie la plus appropriée et la plus performante pour être associée à un JEDHP destiné pour l'alimentation en électricité des sites isolés. De là émane la proposition d'une solution récente et innovatrice qui répond aux exigences techniques et financières de l'électrification des sites isolés tout en assurant une fiabilité d'approvisionnement électrique de ces sites. Il s'agit du système hybride éolien-diesel avec stockage d'air comprimé (SHEDAC). La validation du choix de stockage d'air comprimé et la méthode utilisée seront discutées dans la suite.

3. CRITÈRES DE CHOIX

Les différentes technologies de stockage répondant aux critères techniques et économiques varient considérablement selon la nature d'applications et des besoins. La comparaison entre ces nombreuses techniques est rendue difficile, entre autres raisons, par la variété de leur degré de maturité. Il est nécessaire, donc, d'analyser de façon critique les caractéristiques fondamentales des systèmes de stockage. Ceci permet d'établir des comparaisons entre les différentes technologies afin d'en choisir la meilleure et la plus adaptable à un JEDHP destiné à l'électrification des sites isolés, en tenant en considération leurs gestions, dimensionnements, coûts et impacts sur l'environnement. Les caractéristiques principales des moyens de stockage (systèmes et convertisseurs de puissance), sur lesquelles se base le choix, sont :

1. *La capacité de stockage* : définie comme la quantité d'énergie disponible dans le dispositif de stockage à la fin de la charge.

2. *La puissance disponible* : généralement exprimée à l'aide d'une valeur moyenne ainsi qu'une valeur crête souvent utilisée pour représenter la puissance maximale de charge ou de décharge.

3. *La profondeur de décharge* : définie par la limite du dispositif de stockage de délivrer la totalité de l'énergie emmagasinée. Ce taux de livraison détermine le temps requis pour extraire l'énergie emmagasinée.

4. *Le temps de décharge* : est la durée durant laquelle l'énergie stockée se décharge. Il caractérise l'adéquation du système avec certaines applications.

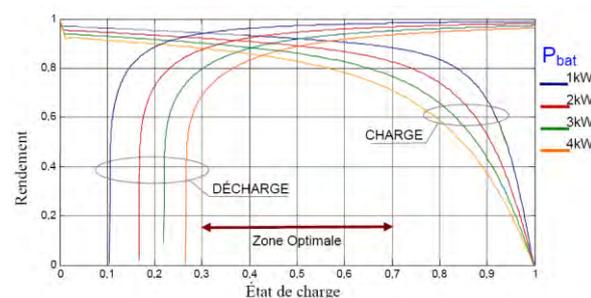


Figure 1. Rendement d'un accumulateur au Plomb 48V – 310Ah paramétrées en puissance [6]

5. *Le rendement* : est le rapport entre l'énergie restituée et l'énergie stockée. Cette définition doit se baser sur un ou plusieurs cycles réalistes en rapport avec l'application. La puissance instantanée est l'un des facteurs qui régit le rendement (figure 1).

6. *La durée de vie (cyclabilité)* : est le nombre de fois où le dispositif du stockage peut restituer le même niveau d'énergie après chaque nouvelle recharge pour lequel il était dimensionné. Elle est exprimée en nombre maximal de cycles (figure 2).

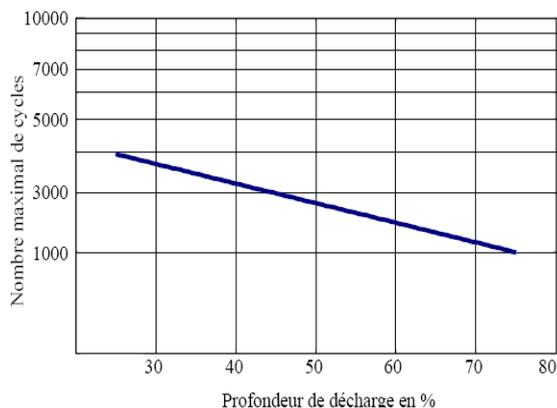


Figure 2. Cyclabilité d'une batterie Plombe/Acide en fonction de la profondeur de décharge [6]

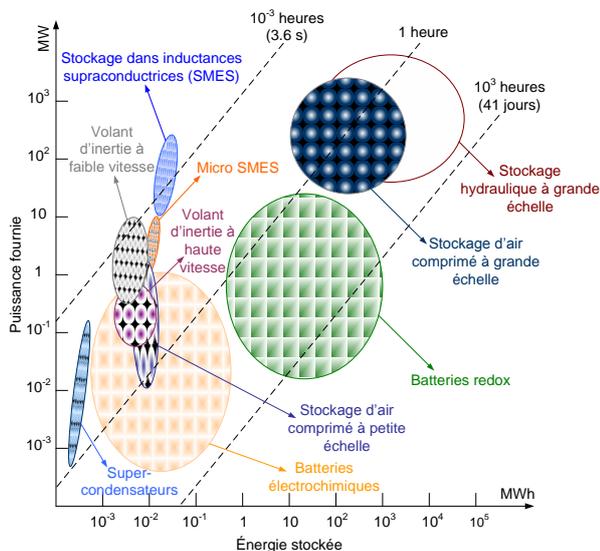


Figure 3. Domaines d'applications des différentes techniques de stockage [6]

7. *L'autonomie* : définie comme la durée maximale durant laquelle le dispositif pourrait restituer, continuellement, de l'énergie emmagasinée. Elle est calculée par le rapport entre la capacité énergétique et la puissance maximale de décharge et diffère selon le type de stockage et la nature de l'application.

8. *Les coûts* : sont le capital investi qui est la part la plus marquante pour l'acheteur et les frais d'exploitation (maintenance, énergie perdue lors des

cycles, vieillissement), et cela sur toute la durée de vie. Les systèmes qui se dégradent le plus vite en cyclage et dont le rendement est le plus mauvais, sont généralement les moins coûteux à l'investissement.

9. *Les domaines de faisabilité et adaptation à la source de production* : Le type de stockage optimal est intimement lié à la nature de l'application (application de faible et moyenne puissance en sites isolés, application pour la connexion au réseau,...) et au type de production (stationnaire, embarquée, etc.) (figure 3).

10. *L'autodécharge* : est la partie de l'énergie initialement contenue dans l'unité de stockage et qui s'est dissipée en un temps donné sans aucune utilisation.

11. *Densités massique et volumique d'énergie* : représentent les quantités maximales d'énergie accumulée par unité de masse ou de volume du dispositif de stockage. Elles montrent l'importance de la masse et du volume de dispositifs de stockage pour certaines applications.

12. *Les équipements de contrôle et de surveillance* des moyens de stockage tant sur le plan de la quantité que de la sûreté du stockage ont des répercussions sur l'accessibilité et la disponibilité de l'énergie.

13. *Les contraintes opérationnelles* : notamment les aspects liés à la sécurité (explosion, rejets, éclatement comme dans le cas du stockage à volant d'inertie, etc.) ou aux conditions de fonctionnement (température, pression, etc.), pouvant influencer sur le choix d'une technologie de stockage en fonction des types de besoins énergétiques.

14. *La fiabilité* : La fiabilité d'un système de stockage importe toujours, parce qu'elle constitue la garantie du service sur demande.

15. *Autres caractéristiques* : L'impact sur l'environnement (matériaux aisément recyclable), la facilité de maintenance, simplicité de conception, souplesse de l'exploitation et de l'utilisation, la rapidité du système à mettre en disposition l'énergie stockée (temps de réponse du dispositif), etc.

4. SYNTHÈSE SUR LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE STOCKAGE

Les comparaisons habituelles des moyens de stockage utilisent la représentation du diagramme de Ragone (figure 3). Il s'agit d'un moyen de comparaison surtout intéressant pour les applications dans lesquelles la masse est un critère très important, mais dans le contexte de traitement de l'énergie électrique, la durée de vie et le coût total (investissement, énergie perdue et vieillissement en cyclage) constituent des critères encore plus importants. Ainsi, ces comparaisons, excessivement simplistes, ne permettent pas de dégager une conclusion définitive à propos de la validité du choix de l'air comprimé pour l'associer au système hybride éolien-diesel. Pour cette raison, une synthèse

* auteur correspondant

Adresse électronique : hibrahim@eolien.qc.ca

approfondie et détaillée sera présentée dans la suite pour justifier ce choix tout en basant sur les critères techno-économiques cités ci-dessus.

1. *Batteries électrochimiques* : Les batteries au plomb-acide constituent l'investissement le plus économique au moment de la livraison du système. Malheureusement, ces batteries sont sensibles aux usages abusifs et présentent divers inconvénients qui nécessitent de mener encore des travaux de recherche, notamment pour améliorer leur durée de vie en cyclage (charges et décharges). Elle est, dans le meilleur des cas, de l'ordre du millier des cycles (près de 3 ans), ce qui est très insuffisant dans des systèmes de production dont la durée de vie est de l'ordre de 15 à 20 ans [7]. De plus, la « mort subite » des batteries au plomb en fin de vie est difficilement compatible avec les exigences d'alimentation fiable en sites isolés.

Les batteries alcalines (Ni/Cd et Ni/MH) sont beaucoup plus performantes, robustes mais plus coûteuses. Elles sont mieux adaptées aux températures basses et utilisées lorsqu'une grande fiabilité est demandée. Par contre, les batteries Ni/Cd souffrent, après un certain nombre de ces cycles réguliers, d'un "effet mémoire" réduisant la capacité utilisable car elles ne peuvent plus se décharger au-delà de la valeur à laquelle elles ont été habituées. Techniquement, les batteries au lithium présentent les meilleures performances. L'autodécharge des batteries Li/ion est en effet faible alors que leur densité énergétique est bien supérieure. Ils permettent par ailleurs un cyclage à grande profondeur de décharge avec un impact moindre sur les performances comparativement à l'accumulateur au plomb surtout, mais aussi au nickel/cadmium. Principalement pour des raisons de coût, accumulateurs sont aujourd'hui encore fort peu répandus.

Enfin, lorsque les batteries ne sont pas recyclées, elles constituent une source importante de pollution. Pour toutes ces raisons, les batteries ne seront pas adoptées pour le système hybride éolien-diesel (SHED).

2. *Stockage d'hydrogène-Piles à combustible* : Il est impossible d'utiliser l'hydrogène produit à partir de l'énergie éolienne comme carburant pour les moteurs diesels parce que ces derniers ne sont pas équipés par des systèmes d'allumage commandé. Par contre, l'utilisation de l'hydrogène stocké pour alimenter une pile à combustible destinée à fonctionner dans l'absence du vent et remplacer le diesel pour certaines périodes, semble une bonne alternative. Mais le rendement faible de l'ensemble électrolyseur-pile à combustible (35-40%), leur manque de fiabilité, le coût prohibitif d'investissement et d'exploitation de cet ensemble et l'aspect de sécurité lié au stockage d'hydrogène, font d'en sorte qu'ils retardent l'acceptation de cette technologie par le marché. Pour ces raisons, le stockage d'hydrogène ne sera pas adopté pour le SHED.

3. *Stockage cinétique* : Technologie non envisageable pour stocker des grandes quantités

d'énergie à long terme. Par contre, dans l'alimentation des sites isolés, les volants d'inertie peuvent être utilisés pour accumuler l'énergie lorsque la production est supérieure à la demande et améliorer la qualité de la fourniture lorsque la production éolienne est proche de la consommation. De plus, pour un SHED, la présence d'un volant d'inertie intermédiaire permet de réduire sensiblement le nombre de démarrages journaliers du diesel et d'accroître la qualité du courant fourni ainsi que l'autonomie en couplant l'arbre du volant au moteur. Malgré tous ces avantages, cette technologie a été exclue parce que c'est un stockage à courte durée (quelques dizaine de secondes à quelques minutes) et nécessite, dans le cas contraire, des matériaux massifs pour stocker l'énergie; ce qui fait augmenter le coût du système et des équipements utilisés. De plus, ce système de stockage n'amènera pas de réduction remarquable de la consommation de carburant quand le diesel fonctionnera à vide (périodes de régime moyen du vent). Notamment, peut être ajoutée la question de sécurité liée à la possibilité de l'éclatement du volant.

4. *Stockage thermique* : ce type de stockage, quelle que soit la technologie utilisée, peut servir, en utilisant l'énergie éolienne excédentaire ou la chaleur des gaz d'échappement du diesel, pour produire de l'eau chaude pour les systèmes de chauffage ou bien pour l'utilisation sanitaire dans la communauté où se trouve le SHED. Ce système n'amène pas de réduction de la consommation du carburant et d'émissions des GES. Cependant, peut être proposée une conception bien meilleure qui consiste à coupler le stockage thermique (ST) au système hybride éolien-diesel-air comprimé. Le ST sera utilisé, dans ce cas, comme échangeur-stockeur thermique pour récupérer la chaleur disponible dans l'air à la fin de sa compression pour la restituer dans la suite lors de la détente de l'air comprimé dans le moteur diesel ou dans un moteur à air comprimé. En conclusion, le ST ne sera pas adopté comme dispositif de stockage principal associé au SHED mais plutôt comme système auxiliaire qui améliore les performances énergétiques du système global.

5. *Stockage hydraulique* : c'est un stockage à grande échelle et caractérise une production centralisée. Alors, s'il est disponible aux sites isolés, il ne sera plus nécessaire d'envisager l'utilisation des génératrices diesels surtout si le potentiel éolien y est disponible aussi. Par contre, le stockage hydraulique à petite échelle nécessite une ressource d'eau suffisante afin de pouvoir produire de l'électricité; de plus le critère de relief géographique reste toujours présent. Pour toutes ces raisons, cette technologie a été exclue de la liste des technologies candidates pour être associée au SHED.

6. *Batteries redox* : Malgré que les batteries redox peuvent être utilisées pour des applications à petite échelle comme à grande échelle, elles sont moins matures et reste encore à démontrer leur fonctionnement en les associant aux éoliennes. De plus, leur prix

* auteur correspondant

Adresse électronique : hibrahim@eolien.qc.ca

prohibitif pénalise leur intégration dans le marché sans oublier que leur contribution à l'arrêt du diesel est reliée à leur autonomie qui est reliée à son tour au volume des réservoirs des électrolytes en circulations et au nombre des cellules utilisées (nécessité des grands volumes et d'un nombre élevé des unités). Ceci fait augmenter le coût d'investissement ainsi que celui de l'exploitation du système. Toutes ces raisons excluent la possibilité d'adopter les batteries redox pour le SHED.

7. *Stockage par super-condensateurs* : ce type de stockage est destiné à des applications à petite échelle et son utilisation à moyenne échelle (cas du SHED) nécessite un branchement en série de plusieurs éléments pour atteindre la tension demandée. Ceci nécessitera plus d'aménagement, plus d'espace et, par conséquent, plus d'investissement surtout que le coût unitaire est assez élevé. L'autodécharge élevée (5% par jour), diminue l'autonomie du dispositif de stockage et nécessitera une consommation rapide de l'énergie éolienne stockée avant qu'elle ne soit totalement auto-déchargée sans aucune utilisation. Ceci peut influencer faiblement sur la consommation du diesel et son coût d'exploitation et rendre le système global mal fonctionnel et mal harmonisable. Par conséquence, ce système de stockage ne sera pas adopté pour le SHED.

8. *Stockage par inductances supraconductrices* : c'est un stockage pour une très courte durée et non envisageable pour des applications à moyenne échelle. Sa complexité réside dans la nécessité d'un système de réfrigération, des transformateurs et convertisseurs et une grande infrastructure. Ceci accroît considérablement le coût et rend plus compliqué l'exploitation du système. De plus, ce type de stockage n'est pas trop adaptable au SHED et ne contribue pas à une réduction remarquable de la consommation du carburant. Pour ces raisons, il est exclu de la liste des technologies étudiées.

Après avoir exclu toutes les technologies citées ci-dessus, il est proposé d'utiliser le stockage sous forme d'air comprimé (SAC) pour l'associer au SHED. En effet, le SAC est adaptable pour les deux sources de production d'électricité (éolien/diesel). De plus, il présente une solution intéressante au problème des fortes fluctuations stochastiques de l'énergie éolienne car il permet une conversion à rendement élevé (60–70% sur un cycle charge-décharge complet), et d'effectuer un nombre de cycles quasi illimité en utilisant des matériaux conventionnels faciles à recycler.

5. VALIDATION DU CHOIX DE L'AIR COMPRIMÉ PAR LA MÉTHODE D'INDICE DE PERFORMANCE

5.1. Indice de performance

L'analyse de la liste des critères techno-économiques comme par exemple le coût, la densité d'énergie, la durée de vie, le rendement énergétique de chaque technologie, etc., permet d'évaluer « un indice

de performance » et élaborer un diagramme des rendements des différentes technologies de stockage.

L'indice de performance est défini comme la mesure de l'applicabilité d'une technique de stockage à une application spécifiée en tenant compte des caractéristiques techniques présentées auparavant. Il permet aussi de comparer les performances des différents systèmes de stockage en fonction de la nature d'application du projet. Pour une autre application que l'électrification des sites isolés, les valeurs de l'indice de performance peuvent être différentes.

5.2. Détermination de l'indice de performance

La détermination de l'indice de performance se fait à l'aide d'une matrice de décision qui permet de pondérer l'importance, par des coefficients variant de 5 à 10%, de chaque caractéristique du système de stockage par rapport aux exigences spécifiques de l'application envisagée. L'élaboration de cette matrice prend en considération l'interaction entre les critères de choix cités précédemment, les données de références de technologies de stockage ainsi que les caractéristiques du SHED et surtout le principal objectif : une technologie qui contribue à une diminution de la consommation du carburant et des émissions de GES.

Dans cette étude, plus d'importance a été donnée au coût, à la contribution à la diminution du carburant et des GES. Un coefficient de pondération de 10% a été attribué alors pour chacun de ces critères. Par contre, la cyclabilité, l'autonomie, l'efficacité, la simplicité ont chacune une pondération égale à 7,5%. Enfin, pour leur importance inférieure, les critères suivants : la sécurité, l'autodécharge, le stockage, la fiabilité-maturité, la souplesse d'exploitation, le contrôle, l'aspect écologique et le temps de réponse ont été pondérés chacun par un coefficient de 5 % (figure 4).

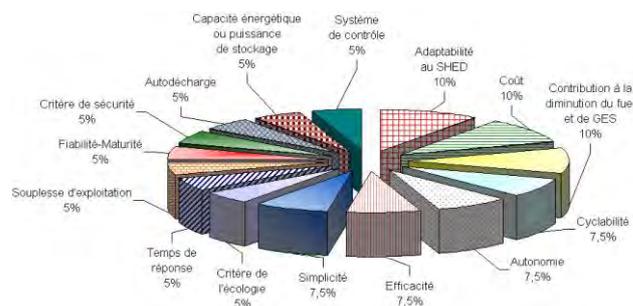


Figure 4. Répartition des critères dans la matrice de décision

La construction de la matrice de décision finale consiste d'abord à construire une matrice élémentaire attribuée à chaque critère où les systèmes obtiennent de valeurs variant entre 0, 0,5 et 1 selon l'état de préférence, basé sur la performance du système comparé par rapport aux autres. Par exemple, le tableau 1 montre, en ce qui concerne le critère de l'adaptabilité au SHED, que le volant d'inertie est en égalité

* auteur correspondant
Adresse électronique : hibrahim@eolien.qc.ca

d'importance avec les batteries, le super-condensateur, la supraconductrice, le stockage thermique et le stockage d'hydrogène. Pour cette raison, lui a été attribué un coefficient de préférence égale à 0.5. Par contre, le volant d'inertie est plus adaptable au SHED par rapport au stockage hydraulique et aux batteries redox, ce qui fait qu'un coefficient de préférence égale à 1 lui a été attribué. Cependant, le stockage d'air comprimé est plus adaptable au SHED par comparaison au volant d'inertie. Ceci permet d'attribuer au stockage cinétique un coefficient de préférence égal à 0. Cette méthode est appliquée sur les autres technologies de stockage d'énergie pour chacun de 15 critères de sélection. En fin de compte, seront obtenues 15 matrices correspondant aux 15 critères cités auparavant. La matrice globale de décision sera construite à l'aide des coefficients de préférence totaux qui étaient attribués pour chaque technologie de stockage et obtenus à partir des 15 matrices de décision élémentaires.

Tableau 1 : Matrice de décision élémentaire pour le critère d'adaptabilité du système de stockage au SHED

Adaptabilité au SHED	Hydraulique	Air comprimé	Cinétique	Batteries	Redox	Hydrogène	Thermique	Super-condensateur	Supraconductrice	Total
Hydraulique	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0.5
Air comprimé	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Cinétique	1	0	0.5	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	4.5
Batteries	1	0	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	4.5
Redox	0.5	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0.5	2
Hydrogène	1	0	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	0.5	3.5
Thermique	1	0	0.5	0.5	1	1	1	1	1	6
Super-condensateur	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	3.5
Supraconductrice	1	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0	0	0.5	3.5

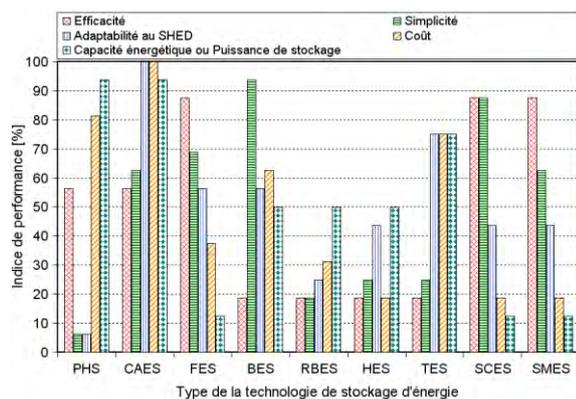


Figure 5. Comparaison des indices de performance élémentaires des systèmes de stockage

À partir de ces matrices élémentaires et globale, des indices de performance élémentaires (figure 5) et global (figure 6) seront déterminés en calculant le pourcentage de la note totale (coefficient de préférence) obtenue par chaque technologie (global) et pour chacun des critères mentionnés (élémentaires) par rapport à la note totale maximale (8) qu'une technologie de stockage pourrait obtenir (figure).

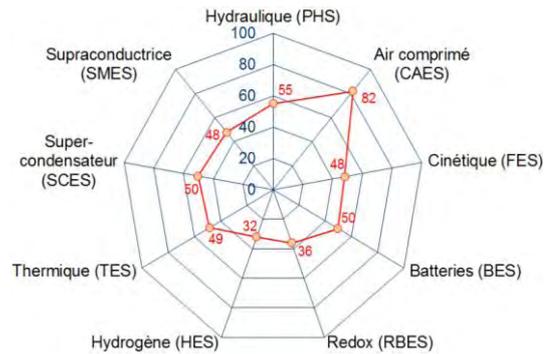


Figure 6. Indice de performance globale

6. CONCLUSION

Une analyse comparative des différentes technologies de stockage actuellement en usage a été réalisée en fonction de plusieurs critères tels que le coût, la densité d'énergie, la puissance spécifique, la cyclabilité, la contribution à la réduction de la consommation du carburant et l'émission de GES, la durée de vie et le rendement énergétique de chaque technologie. Cette analyse a mené à déterminer l'indice de performance de chaque technologie du stockage en fonction de la nature d'application du projet. La détermination de l'indice de performance de chaque technologie représente, malgré sa subjectivité issue de l'utilisation de la matrice de décision, une solution dans les cas où la difficulté du choix réside et où la contrainte du temps ne permet pas de réaliser une modélisation détaillée des systèmes étudiés. Cette méthode a démontré que le SAC répond le plus aux critères de choix avec un indice de performance d'environ 82%. Les autres systèmes sont aussi plus ou moins efficaces mais c'est au niveau du coût, de la simplicité, de l'adaptabilité au système SHED, de la contribution à la diminution de la consommation du carburant et des émissions de GES et de la durée de vie qu'il y a une certaine différence. Pour ces raisons, la technologie de SAC a été adoptée pour l'associer au système hybride éolien-diesel.

RÉFÉRENCES

- [1] ADELAAR, & Ass., Communitech & Ass., Community Specific Energy Supply in the Yukon and Northwest Territories, Gov. of Canada, Dep. of Indian & Northern Aff., Contract N°. 81-117, (1981).
- [2] <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/eolien>
- [3] REID, R., Application de l'éolien en réseaux non reliés, *Liaison Énergie-Francophone*, N° 35/2e Trimestre, (1997).
- [4] REEVES, B., Kotzebue Electric Association Wind Projects, Proceedings of NREL/AWEA 2002 Wind-Diesel Workshop, Anchorage, Alaska, USA, (2002).
- [5] IBRAHIM, H., ILINCA, A., PERRON, J., Energy Storage Systems-Characteristics and Comparisons. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, Issue 5, pp. 1221-1250, (2008).
- [6] IBRAHIM, H., ILINCA, A., PERRON, J., Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés. Rapport interne, UQAR, UQAC, LREE-03, Septembre (2008).

* auteur correspondant

Adresse électronique : hibrahim@eolien.qc.ca