



Systèmes hybrides de type : Éolien-Air Comprimé

Hussein IBRAHIM

Rafic YOUNÈS

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

hussein.ibrahim@uqar.qc.ca

ryounes@ul.edu.lb

Alep, Syrie, 22-25 octobre 2007

Plan de la présentation

- 1 - Stockage sous forme d'air comprimé (CAES) - Principe
- 2 - Stockage sous forme d'air comprimé (CAES) - Historique
- 3 - Stockage sous forme d'air comprimé (CAES) - Caractéristiques
- 4 - Stockage sous forme d'air comprimé (CAES) - Avantages
- 5 - Types de réservoirs pour stocker l'air comprimé
- 6 - Systèmes hybrides de type : Éolien-Air Comprimé : Principe et avantages

Plan de la présentation

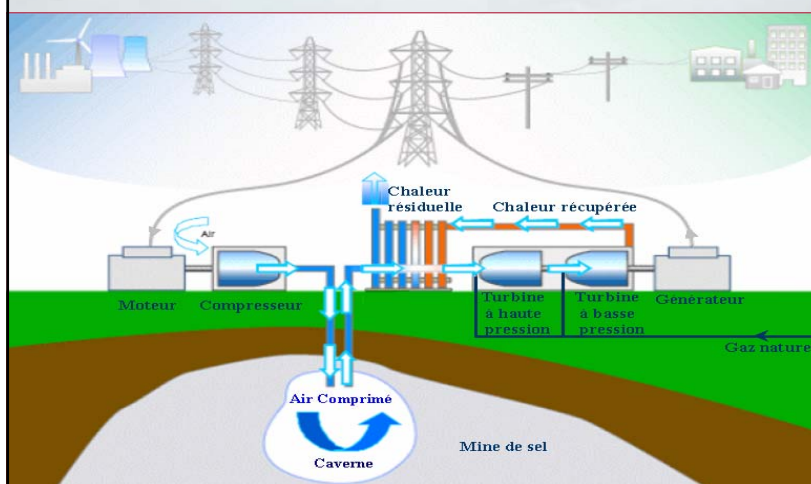
- 7 - Application à grande échelle : Éolien – CAES
- 8 - Application à petite échelle : Éolien – Diesel – Air Comprimé
- 9 - Application à moyenne échelle : Éolien – Diesel – Air Comprimé (JEDSAC)
- 10 - Conception de l'hybridation : JEDSAC
- 11 - Intérêts économiques du JEDSAC
- 12 - Avantages techniques du JEDSAC
- 13 - Résultats attendus du système JEDSAC
- 14 - Conclusion

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Principe

- ◇ Utilisation de l'électricité des heures creuses (stockage) pour comprimer l'air via un compresseur



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Principe

- ✧ Stockage de l'air comprimé dans des grandes cavernes, anciennes mines de sel ou cavités de stockage de gaz naturel souterraines
- ✧ Production de l'électricité (déstockage) après avoir relâché l'air comprimé, le chauffé et le détendu dans une turbine couplé à un générateur
- ✧ La chaleur résiduelle de la fumée est récupérée et utilisée pour chauffer l'air
- ✧ Pression de stockage : 40 – 70 bars
- ✧ Température de stockage : ambiante (23 à 25 C)

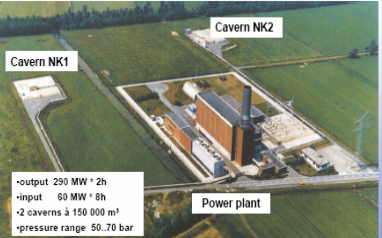
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Historique

- ✧ CAES == Compressed Air Energy Storage : une technologie déjà mature avec plusieurs réalisations de grande puissance.
- ✧ La première centrale à Huntorf en Allemagne utilise un réservoir souterrain d'air comprimé en fonctionnement depuis novembre 1978
- ✧ L'air est stocké à une pression entre 50 et 70 bars dans deux cavernes de 150000 m³ chacune creusées dans le sel à une profondeur de 700 m

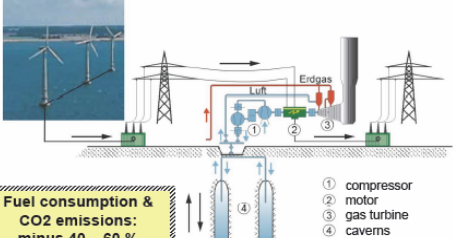
EON 290 MW CAES power plant in Huntorf



Cavern NK1
Cavern NK2
Power plant

- output 290 MW * 2h
- input 60 MW * 6h
- 2 caverns à 150 000 m³
- pressure range 50..70 bar

Compressed air energy storage



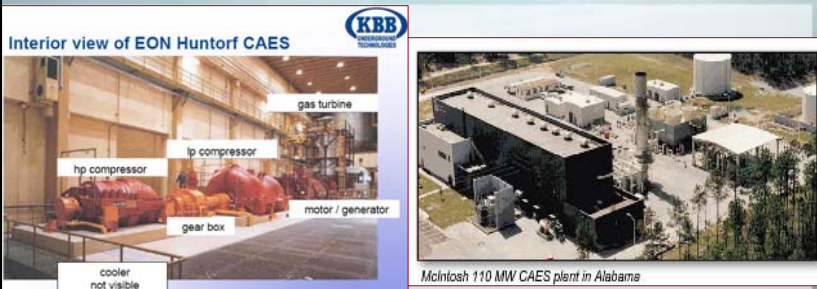
Fuel consumption & CO2 emissions: minus 40 .. 60 %

- ① compressor
- ② motor
- ③ gas turbine
- ④ caverns

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Historique

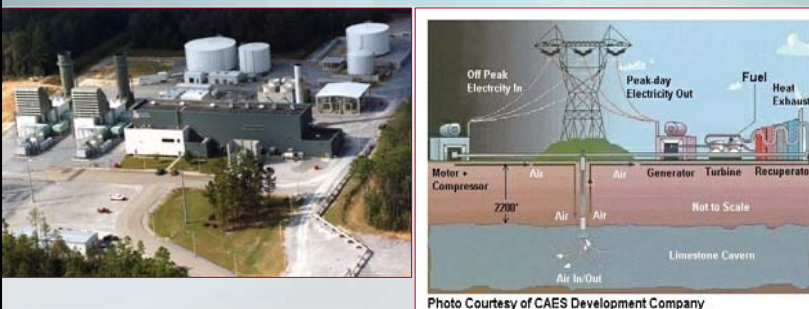


- ◇ La puissance électrique est de 290 MW, tandis que la durée de fonctionnement est de 2 heures
- ◇ Une centrale (CAES) Américaine situé sous le mont de Macintosh dans l'Alabama est en fonctionnement depuis septembre 1991
- ◇ Elle délivre une puissance de 110 MW pendant 26 heures

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Historique



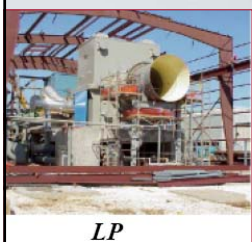
- ◇ L'air ambiant est comprimé entre 40 et 70 bars et stocké dans une caverne de 2555000 m³ à une profondeur de 700 m
- ◇ Durant l'été, le système produit de l'énergie 10 heures par jour en dehors des week-ends
- ◇ La compagnie recharge partiellement la caverne de stockage les nuits du lundi au vendredi et la recharge complète s'effectue le week-end
- ◇ Ce système fonctionne 1770 heures par an

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Historique

- ◇ Une centrale Américaine en construction au Norton, Ohio :
- 1 - La plus grande centrale (CAES) que jamais était construite.
- 2 - La puissance de cette centrale sera de l'ordre de 2700 MW.
- 3 - Elle comportera 9 unités de production (compresseurs - turbines)
- 4 - L'air sera comprimé à une pression de l'ordre de 100 bars
- 5 - Le réservoir du stockage est une caverne formée de roche de nature calcaire, située à 670 m de profondeur



LP



HP



CAES plant in Ohio (CAES Development Company L.C.C.)

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Caractéristiques

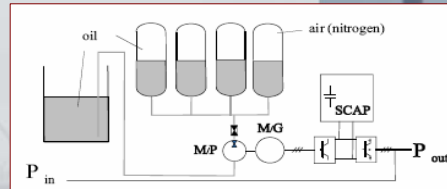
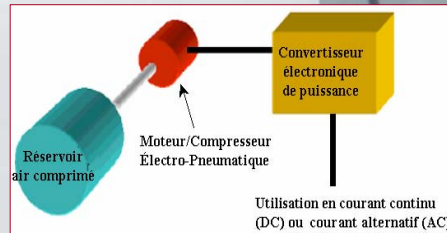
- ◇ Densité d'énergie : 12 kWh/m³ de caverne à 100 bars
- ◇ Rendement : 70% (50% avec l'apport de gaz)
- ◇ Puissance de 100 à quelques milliers de MW
- ◇ Capacité : 0.1 GWh à quelques dizaines de GWh
- ◇ Pour restituer 1 kWh au réseau, il faut absorber 0,7 à 0,8 kWh d'électricité pendant (heures creuses) pour la compression de l'air et absorber 1,22 kWh de gaz naturel durant la restitution (heures de pointe)
- ◇ Nécessité de disposer d'une géologie favorable (mines de sel, champs pétroliers épuisés, nappes aquifères, par exemple)

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Caractéristiques

- ◇ Densité d'énergie : 6 Wh/l de bouteille à 200 bars
- ◇ Rendement : 50% (en fonction de la puissance de charge et de décharge)
- ◇ Nombre de cycles limité par la fatigue mécanique du réservoir (qq 10000 cycles)
- ◇ Possibilité d'associer cette technologie à un groupe électrogène diesel pour augmenter sa puissance
- ◇ L'air comprimé peut être stocké dans des tubes métalliques enfouis sous la surface du sol (Plusieurs projets de ce type sont proposés aux USA pour assurer un soutien temporaire à un réseau)



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Avantages

- ◇ Une centrale de production d'électricité avec une turbine à gaz classique utilise près de deux tiers de la puissance disponible sur l'arbre pour la compression de l'air de combustion
- ◇ Production d'une puissance trois fois plus importante pour la même consommation de combustible en réchauffant l'air déjà comprimé et stocké (CAES) dans une chambre de combustion avant de le détendre dans la turbine
- ◇ La période de stockage la plus longue due au fait que ses pertes sont très petites
- ◇ Un système de CAES peut être employé pour stocker l'énergie pour plus qu'une année

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Stockage d'énergie sous forme d'air comprimé – Avantages

- ❖ Pas besoin des installations énormes et coûteuses (dans le cas de disponibilité d'une géologie favorable)
- ❖ Possibilité d'être installé sur des terres habitables
- ❖ Faible temps pour mettre en disposition l'énergie stockée de CAES : 9 mn dans le cas de secours et environ 12 mn dans des conditions normales (une centrale conventionnelle a besoin de 20 à 30 mn pour délivrer de l'énergie)
- ❖ Augmentation du taux de pénétration des énergies renouvelables (éolienne, solaire, ...)

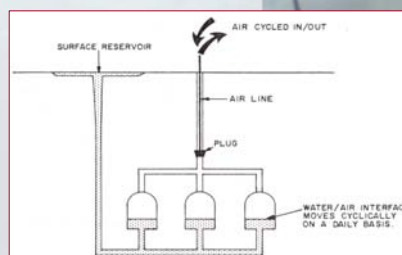
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

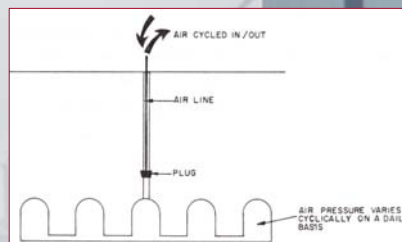
Types de réservoirs pour stocker l'air comprimé

❖ L'air est stocké dans : réservoirs soit à pression constante ou à volume constant.

❖ Réservoirs à pression constante : la pression est maintenue stable à l'aide d'un système hydrostatique qui joint un réservoir supérieur d'eau avec la caverne de stockage d'air afin de compenser hydrauliquement les fluctuations de pression pendant la charge et la décharge.



❖ Réservoirs à volume constante : la pression varie en fonction de la charge ou la décharge de la caverne en ou d'air comprimé; le taux de variation de la pression dépend de la capacité de stockage de caverne et de la quantité déchargée d'air comprimé.



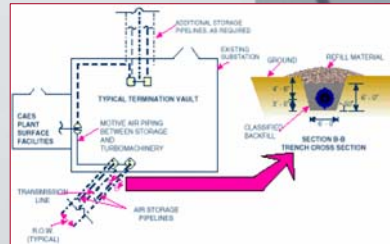
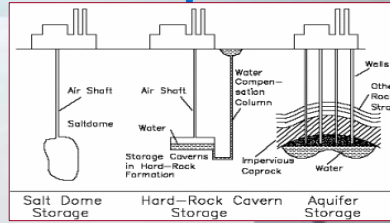
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Types de réservoirs pour stocker l'air comprimé

✧ Les méthodes du stockage d'air comprimé peuvent être classées en huit catégories principales :

1. Stockage en cavernes creusées ou cavités minées,
2. Stockage en mines abandonnées,
3. Stockage en cavités salines (mines de sel),
4. Stockage en anciens gisements de pétrole ou de gaz,
5. Stockage en nappes aquifères,
6. Stockage sous forme liquide cryogénique,
7. Stockage en accumulateurs sous pression,
8. Stockage en cavités formées suite à des explosions nucléaires,



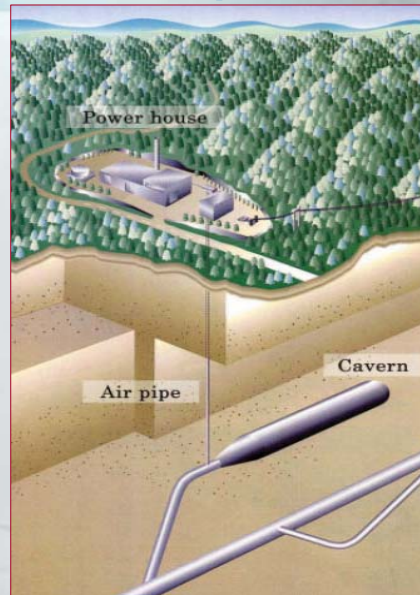
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Types de réservoirs pour stocker l'air comprimé

✧ Les grandes cavernes situées à grande profondeur et constituées de roche de très bonne qualité ou les anciennes mines de sel ou cavités de stockage de gaz naturel souterraines représentent les meilleurs réservoirs de stockage pour l'air comprimé. Elles bénéficient de pressions géostatiques et par conséquent elles facilitent le confinement de la masse d'air stockée

✧ Des nombreuses études ont indiqué que l'air pourrait être comprimé et stocké dans des tuyauteries souterraines à haute pression (20 - 100 bars). Cette méthode permettra d'éliminer le critère de la géologie favorable et rendre le système plus simple à être exploiter.



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Principes et Avantages du CAES

- ✧ Un système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables.
- ✧ La combinaison de plusieurs sources d'énergies surtout les renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique.
- ✧ Les principaux concepts possibles d'hybridation qui couplent l'éolien et le stockage d'air comprimé, appartenant à des domaines de performances différents, peuvent être classés, selon leur nature d'application, en 3 catégories :
 - 1 – à grande échelle, 2 – à moyenne échelle, 3 – à petite échelle.

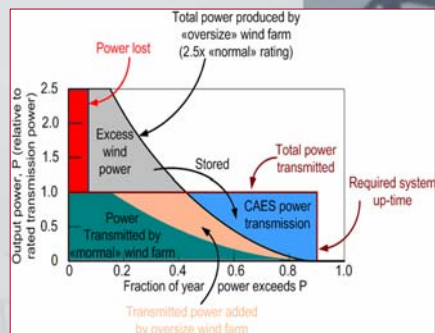
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Principes et Avantages du CAES

- ✧ Le CAES permet une augmentation significative du TPE, à un niveau proche de 100%.
- ✧ À titre d'exemple, le fait d'augmenter la puissance éolienne à un niveau 2.5 fois plus élevé que celui de la charge maximale permet de passer à une valeur près de 60% du taux de pénétration en puissance de l'énergie éolienne (TPP), le CAES assurant le reste

✧ L'idée fondamentale de l'hybridation éolien-CAES consiste à transférer l'énergie éolienne produite durant les périodes venteuses ($TPP > 1$) aux périodes d'une demande élevée ou moins venteuses ($TPP < 1$), en utilisant seulement une fraction du combustible qui serait consommée par la machine standard de production (turbine à gaz, moteur thermique)

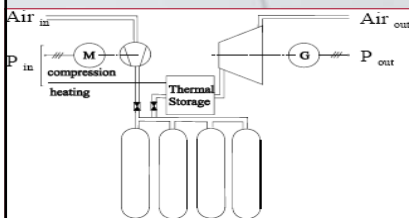
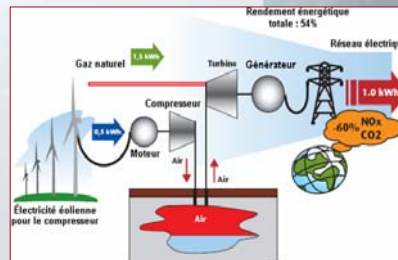


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Application à grande échelle : Éolien - CAES

- ◇ C'est le cas des grands parcs éoliens raccordés au réseau d'électricité : (Milliers à centaines de MW)
- ◇ Cette configuration présente l'inconvénient de la présence d'une chambre de combustion alimentée par du gaz naturel.
- ◇ Une autre configuration appelée (TACAS : Thermal And Compressed Air Storage), plus proche du stockage, comporte de plus un élément thermique et elle peut être plus efficace que la première.

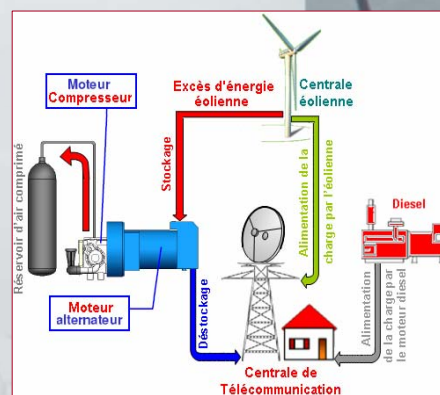


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Application à petite échelle : Éolien - CAES

- ◇ C'est le cas, par exemple, des stations de télécommunications ou des sites isolés alimentés par diesel (centaines à dizaines de KW).
- ◇ Il permet de diminuer la consommation en carburant et remplacer le démarrage intermittent du groupe électrogène ce qui diminuera l'usure du moteur diesel et les frais d'entretien.

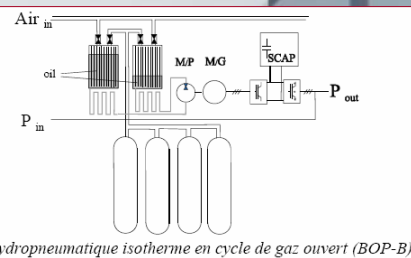
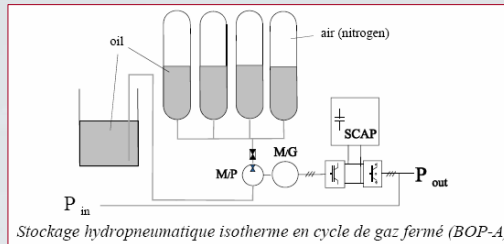


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Application à petite échelle : Éolien - CAES

- Le moteur à air comprimé pourrait être remplacé par des batteries oléopneumatiques (dispositif de stockage de type «tampon» qui met rapidement en disposition l'énergie stockée).



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

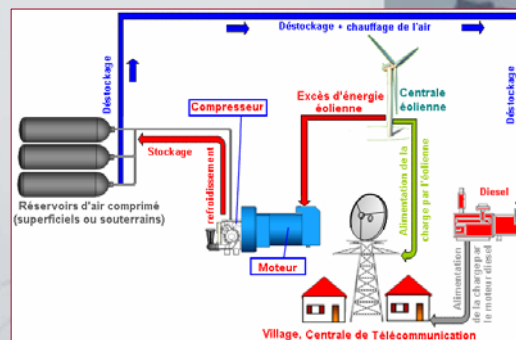
Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Application à moyenne échelle : Éolien - CAES

(milliers kW à centaines kW)

- C'est le cas des régions éloignées, qui ne sont pas situées à proximité des réseaux publics d'électricité et qui sont fréquemment alimentées par l'électricité fournie par des génératrices au diesel. Cela a des coûts prohibitifs en raison du prix élevé du transport du carburant

- L'idée consiste à utiliser le jumelage éolien-diesel avec stockage sous forme d'air comprimé (JEDSAC), qui, combiné avec une suralimentation des moteurs diesel (déjà sur place) aura comme effet l'augmentation du taux de pénétration de l'énergie éolienne (TPE).



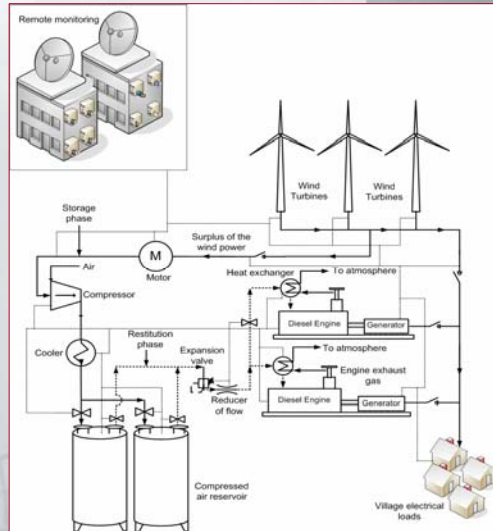
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Application à moyenne échelle : Éolien - CAES

(milliers kW à centaines kW)

✧ Durant les périodes de haute pénétration ($TPP > 1$), l'énergie éolienne excédentaire est utilisée pour comprimer l'air avec un compresseur et le stocker dans des tuyauteries souterraines à haute pression (20–100 bars). Cette méthode élimine le critère de la géologie favorable et rend le système plus simple à être exploité. L'air comprimé sert ensuite à suralimenter le moteur diesel qui fonctionnera durant les périodes de faible pénétration ($TPP < 1$).



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception du JEDSAC : Montée en pression

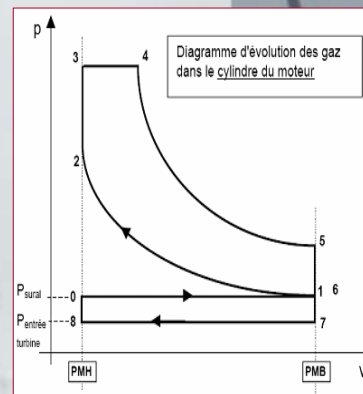
✧ L'augmentation de la pression à l'admission peut permettre une diminution de la quantité de fuel injectée en conservant la même pression maximale dans le cylindre du moteur (points 3-4 sur le cycle)

Conséquences :

✧ Augmentation de la pression moyenne effective = augmentation de la puissance spécifique par litre de cylindrée moteur

★ Compensation des pertes de remplissage du cylindre en s'approchant du remplissage complet (100%)

★ Augmentation de la quantité du mélange fraîche (air) fournie au moteur

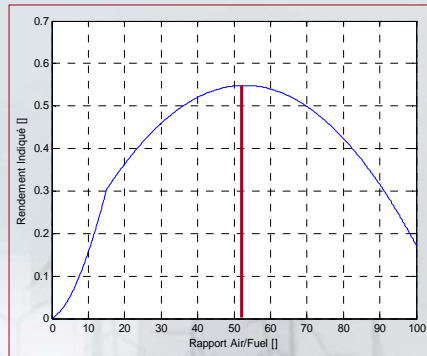


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception du JEDSAC : Montée en débit

✧ L'idée consiste à augmenter le débit d'air comprimé (à pression constante) à l'entrée du moteur dans le but d'obtenir un rapport constant air/fuel qui correspond au rendement maximal, ce qui permet une diminution importante de la consommation

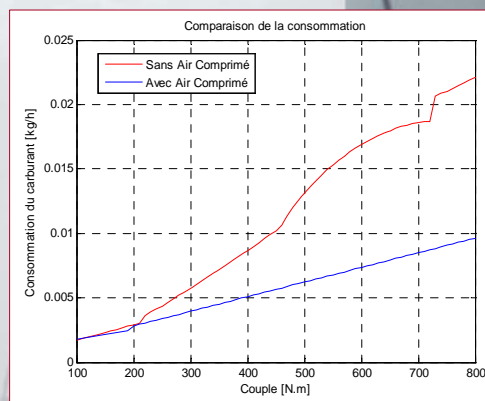
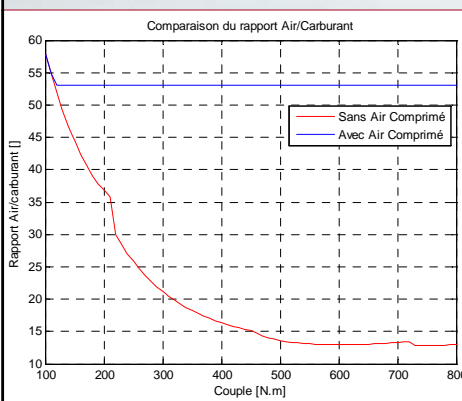


Modèle du rendement indiqué en fonction du rapport air/fuel

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception du JEDSAC : Montée en débit



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception de l'hybridation JEDSAC

Montée en pression

Montée en débit

bloquage sonique au niveau des soupapes d'admission peut avoir lieu

Limitations mécaniques et thermiques du Diesel

Nécessite une modélisation physique du phénomène en définissant les conditions aux limites convenables

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

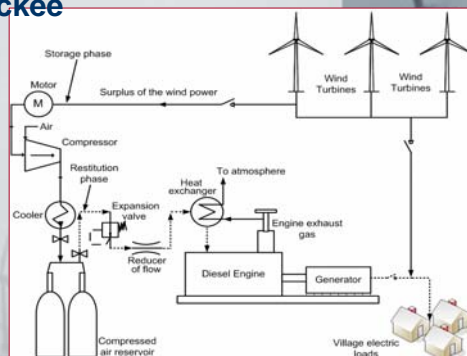
Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception de l'hybridation JEDSAC

1. **Haut taux de pénétration de l'éolienne** → diesel arrêté, compresseur en marche (phase de stockage), l'éolienne alimente la charge et le système de stockage

2. **Moyen taux de pénétration de l'éolienne** → fonctionnement intermittent du diesel selon l'état du vent, décharge intermittente de l'énergie stockée

3. **Faible taux de pénétration de l'éolienne** → éolienne arrêtée, diesel est en mode continu du fonctionnement, décharge totale de l'énergie stockée (suralimentation par l'air comprimé)



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception de l'hybridation JEDSAC

❖ Il existe 7 façons pour concevoir notre système afin de mieux pouvoir améliorer le rendement indiqué du moteur et augmenter sa puissance. Ces méthodes sont :

1. **Système 1** : Utilisation d'une turbine en série sur l'axe du turbocompresseur,
2. **Système 2** : Double étage de suralimentation,
3. **Système 3** : Suralimentation de type hyperbar,
4. **Système 4** : Admission en amont du compresseur,
5. **Système 5** : Suralimentation avec le cycle de LENOIR pressurisé,
6. **Système 6** : Admission directe dans le moteur,
7. **Système 7** : Suralimentation avec downsizing.

❖ Dans toutes les méthodes, nous introduisons un extenseur sur le circuit de la décharge d'air comprimé sortant du réservoir. Ceci permettra de diminuer la pression de l'air comprimé afin qu'il soit adaptable au niveau du système d'admission du moteur.

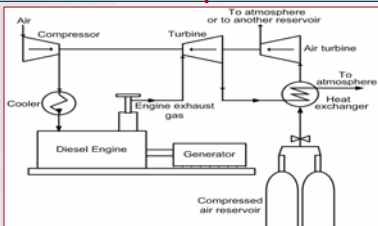
❖ À la sortie du détendeur, l'air comprimé subira une grande chute de la température. Cela nécessitera un préchauffage, en utilisant les gaz d'échappement récupérés du moteur, afin d'éviter la formation du givre.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

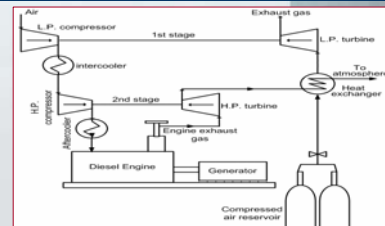
Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception de l'hybridation JEDSAC

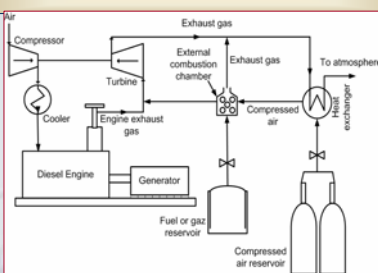
Système 1 : turbine en série sur l'axe du turbocompresseur



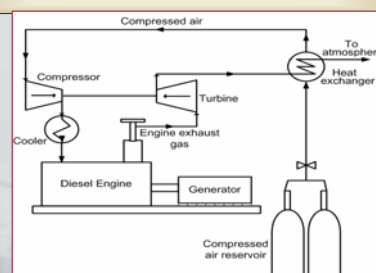
Système 2 : double étage de suralimentation



Système 3 : suralimentation de type hyperbar



Système 4 : Admission en amont du compresseur

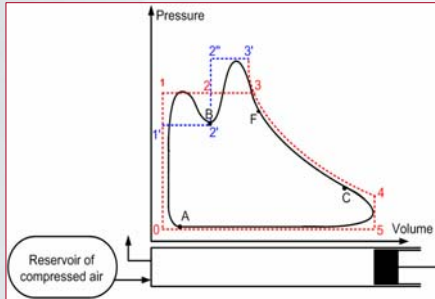


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

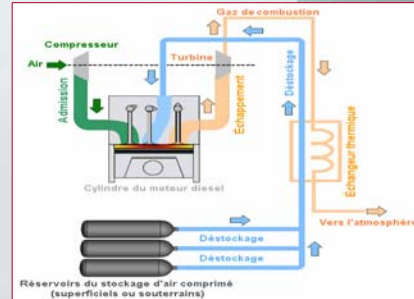
Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception de l'hybridation JEDSAC

Système 5 : suralimentation avec le cycle de LENOIR pressurisé



Système 6 : Admission directe dans le moteur



Critère de sélection	Importance	Système 1	Système 2	Système 3	Système 4	Système 5	Système 6	Système 7
Efficacité	3	3	3	2	3	3	3	3
Simplicité	2	3	2	2	3	2	2	3
Adaptabilité avec le moteur diesel	3	3	2	3	2	2	2	1
Coût	3	3	2	1	3	1	1	3
Système de Contrôle	3	3	2	2	3	2	2	3
Totale	15	15	11	10	14	10	10	13

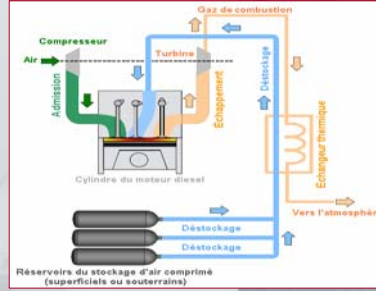
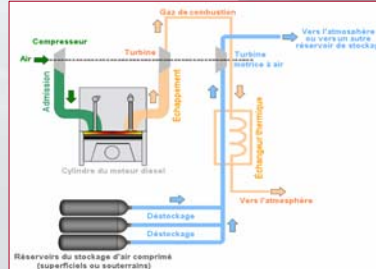
Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conception de l'hybridation JEDSAC

Conception du JEDSAC : 1 et 6

- ✦ La première méthode consiste à injecter l'air comprimé chauffé dans une turbine motrice à air, qui, associée à l'arbre du turbocompresseur, permettra d'augmenter la vitesse de rotation du turbocompresseur, surtout dans le cas de bas régime du moteur et augmenter, par conséquent, le débit d'air fourni au moteur.
- ✦ La sixième méthode consiste à injecter l'air comprimé venant du réservoir de stockage dans les cylindres du moteur ou dans le collecteur d'admission où l'air sera mélangé avec celui venant de turbocompresseur avant d'entrer au moteur.



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Intérêts économiques du JEDSAC

- ◇ Le jumelage éolien-diesel avec stockage d'air comprimé (JEDSAC), n'a jamais fait l'objet d'une application commerciale et il n'existe pas dans la littérature scientifique des études faisant état de la conception ou des performances d'un tel système.
- ◇ Le JEDSAC présente un potentiel commercial très important pour les régions isolées du Canada et ailleurs dans le monde puisqu'il utilise des génératrices diesel déjà en place.
- ◇ Comme le manque d'informations sur la rentabilité économique, sur les performances et la fiabilité de JED est actuellement le frein principal à l'acceptation du déploiement éolien dans les régions isolées, ce projet se propose de répondre à ces interrogations.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Intérêts économiques du JEDSAC

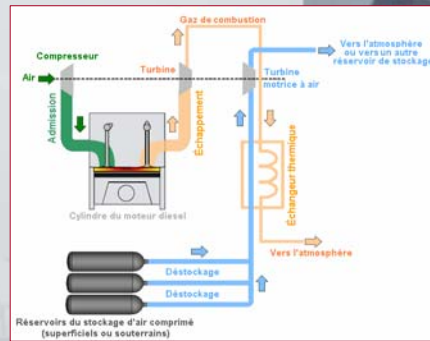
- ◇ À l'aide des informations disponibles, et des analyses de l'augmentation des performances, nous estimons que sur un site à bon potentiel éolien, le délai de récupération de l'investissement pour une telle installation se situe entre 2 et 5 ans, en fonction des coûts de transport du combustible.
- ◇ Pour des sites accessibles seulement en hélicoptère, ce délai peut descendre en dessous d'une année.
- ◇ Cette analyse ne tient pas compte de l'augmentation du prix du carburant, ni des éventuelles crédits pour la réduction des GES qui ne font que réduire le délai de récupération.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Avantages techniques du JEDSAC

- ✧ Dans notre projet, la première méthode a été adoptée en raison de sa simplicité et son efficacité et parce qu'elle ne nécessite pas une intervention intérieure sur le moteur.
- ✧ L'avantage de la première méthode par rapport aux autres est qu'on n'aura pas besoin d'adapter le système d'admission ainsi que celui de l'injection avec les nouveaux paramètres concernant la température, la pression et le débit d'air comprimé entrant dans les cylindres.
- ✧ Elle permet aussi à la boucle de suralimentation de fonctionner indépendamment du moteur grâce à l'énergie fournie par l'air comprimé détendu dans la turbine à air.
- ✧ Ce système permet en outre d'augmenter la puissance d'un facteur 5 et par conséquent le rendement indiqué du moteur.

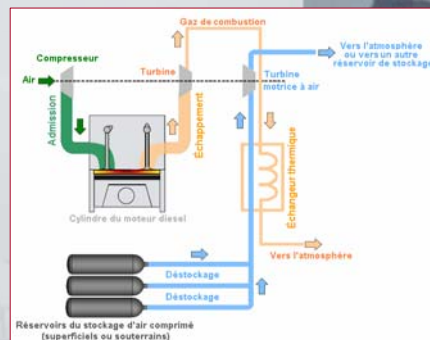


Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Avantages techniques du JEDSAC

- ✧ La conception de ce système permet de répondre à la charge demandée en profitant au maximum de l'hybridation, ce qui revient à utiliser au mieux la puissance disponible au sein des deux turbines à gaz et à air pour améliorer le remplissage du Diesel.
- ✧ Ce système peut représenter l'équivalence d'un système Hyperbar au niveau de l'augmentation du rendement et de la puissance sans avoir besoin de recourir auprès une chambre à combustion supplémentaire.



Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Avantages techniques du JEDSAC

✧ Le système 1 peut être mis en service dans les conditions suivantes :

- 1) **bas régimes-fortes charges**, pour lesquels l'énergie disponible dans les gaz d'échappement serait sinon trop faible pour atteindre une pression de suralimentation suffisante;
- 2) **bas régimes-faibles charges**, de manière à créer les conditions thermodynamiques (température et pression) nécessaires à l'initiation de la combustion, que le faible rapport volumétrique de compression du moteur ne permet pas d'assurer.
- 3) **démarrage pneumatique**, où l'air comprimé, venant du réservoir de stockage, pourrait être injecté directement dans les cylindres, par by-pass sans passer par la turbine à air, à une pression comprise entre 20 et 30 bar. Cet air comprimé assure la mise en rotation du groupe par action sur les pistons du moteur. L'injection d'air est arrêtée sur détection d'une vitesse de rotation du moteur assez élevée.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Résultats attendus du JEDSAC

1. Augmenter la puissance et le rendement duiesel.
2. Diminuer la consommation en carburant du diesel.
3. Diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES).
4. Diminuer les déficits des réseaux autonomes.
5. Diminuer le coût d'achat de diesel (dans le cas du remplacement) car cette technologie permet d'utiliser des moteurs à petite cylindrée, ce qui permet de diminuer le délai de récupération d'investissement.
6. Compenser le retard du couple en régime transitoire dans le cas d'une suralimentation ordinaire.
7. Mettre en disposition instantanément un couple maximum, ce qui diminue le temps de réponse du moteur et lui permet de répondre aux besoins plus rapidement

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conclusions

- ✧ Le système hybride éolien-CAES à grande échelle permet de passer d'une valeur TPE de 30% pour une simple centrale éolien-gaz naturel (sans stockage) à une valeur de TPE proche de 100%.
- ✧ Il produit une puissance 3 fois plus qu'une centrale conventionnelle pour la même consommation de gaz.
- ✧ Ce système participe au réglage secondaire du réseau grâce à une possibilité de variation de puissance de l'ordre de 50 MW/min et à son bon rendement conditionné par la récupération de la chaleur résiduelle de la fumée pour préchauffer l'air ou par l'association d'un stockage thermique.
- ✧ L'humidification de l'air comprimé provenant du stockage permet d'améliorer le rendement et diminuer la consommation, où la vapeur produite dans les chambres de combustion sera utilisée pendant la détente dans une turbine à gaz à humidification de l'air pour augmenter la puissance électrique produite. Ce principe permet aussi de diminuer l'émission de GES et de NOx.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conclusions

- ✧ L'hybridation à petite échelle éolien-diesel-moteur à air comprimé permet de diminuer la consommation en carburant et remplacer le démarrage intermittent du groupe électrogène ce qui diminuera l'usure du moteur diesel et les frais d'entretien.
- ✧ La possibilité d'accoupler mécaniquement les moteurs à air comprimé permet de répondre à des besoins différents en termes de puissance sur des gammes allant jusqu'à une centaine de kilowatts.
- ✧ Les batteries oléopneumatiques peuvent remplacer le moteur à air comprimé. Ces dispositifs de stockage, de type «tampon», permet de stocker l'énergie à l'échelle locale et la mettre rapidement en disposition.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conclusions

- ✧ L'hybridation à moyenne échelle JEDSAC présente un intérêt économique, écologique et énergétique.
- ✧ Elle aura comme effet l'augmentation du (TPE), la puissance et le rendement du moteur diesel et ainsi diminuer la consommation en combustible
- ✧ Ce système est conçu pour répondre à la charge demandée en profitant au maximum de l'hybridation, ce qui revient à utiliser au mieux la puissance disponible au sein des deux turbines à gaz et à air pour améliorer le remplissage du Diesel
- ✧ Le JEDSAC présente un potentiel commercial très important pour les régions isolées du Canada et ailleurs dans le monde puisque la technologie utilise des génératrices diesel déjà en place.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS

Conclusions

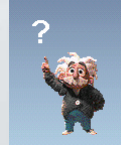
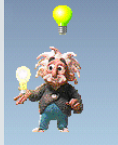
- ✧ Il est évident qu'une conclusion définitive concernant le système JEDSAC impose une réalisation d'un prototype permettant de valider nos résultats.
- ✧ Cependant, des études théoriques préliminaires montrent que le gain en consommation de carburant pouvant atteindre 50% et qu'il augmente avec la charge (avec la stratégie de la montée en débit); de plus la pression d'admission pouvant atteindre dans certains cas la valeur de 10 bars (avec la stratégie de la montée de pression) et nous faire profiter de tous les avantages d'une suralimentation semblable à ceux de type hyperbare. ainsi que l'hybridation (turbine à air – turbocompresseur) permette d'avoir une marge d'utilisation de cette hybridation assez importante en fonction de la charge imposée.

Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE)

Hussein IBRAHIM, Rafic YOUNÈS



Merci pour votre attention



Références

- [1] : Hussein Ibrahim, Rafic Younès, Adrian Ilinca, Jean Perron, Investigation des générateurs hybrides d'électricité de type éolien-air comprimé, Colloque international des énergies renouvelables, 04-05 mai 2007, Oujda, MAROC
- [2] : Hussein Ibrahim, Rafic Younès, Adrian Ilinca, Optimal Conception of a Hybrid Generator of Electricity, Reference Number : CANCAM07-ETS-39, le 21ième congrès canadien de mécanique appliquée, Toronto, Canada, 3-7 juin 2007.
- [3] : H. Ibrahim, A. Ilinca, R. Younès, J. Perron, T. Basbous, Study of a Hybrid Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage, IEEE Canada, Electrical Power Conference 2007, "Renewable and Alternative Energy Resources", EPC2007, Montreal, Canada, October 25-26, 2007 (PID465044-Accepted)