

Stockage d'énergie par air comprimé: un défi pour les circuits d'électronique de puissance.

A. Rufer, S. Lemofouet, Laboratoire d'électronique industrielle, Station 11, EPFL,
CH1015 Lausanne, Suisse

Résumé: Le principe de la compression de l'air peut être utilisé pour le stockage de l'énergie électrique, avec des performances très variables du point de vue du rendement énergétique. Dans le domaine des phénomènes thermodynamiques impliqués, différentes approches et systèmes réalisés amènent à des résultats plus ou moins acceptables. Dans le système hybride étudié par le LEI, Laboratoire d'électronique industrielle de l'EPFL, des principes et stratégies spécifiques ont été retenus, dans le sens d'utiliser des degrés de liberté et flexibilités de grandeurs internes pour atteindre de bonnes performances énergétiques. Cette démarche a abouti à une utilisation intense de convertisseurs de l'électronique de puissance. Dans le cycle complet « aller-retour » du stockage d'énergie, ces conversions multiples ont également leur influence sur le rendement global du système. Un calcul analytique du rendement global d'un tel système est présenté dans cet article.

I. INTRODUCTION

Les moyens modernes de gestion de l'énergie électrique par convertisseurs statiques permettent de par leur grande flexibilité de concevoir de nouveaux équipements de production et de distribution d'énergie jusqu'ici impossible à réaliser. On a pour exemple les micro-turbines utilisant des générateurs à très haute vitesse, ou l'exemple des convertisseurs d'interface utilisés pour convertir des sources non compatibles avec le réseau industriel. On peut citer ici deux cas d'applications classiques, à savoir la conversion continue pour les générateurs photovoltaïques ou les convertisseurs statiques utilisés pour l'adaptation des générateurs éoliens. Un domaine non moins innovant est donné par les installations de stockage d'énergie, où les circuits d'électronique de puissance jouent un rôle primordial, d'autant plus que dans les cycles d'utilisation de ces stockeurs les rendements énergétiques interviennent en général avec leur valeur au carré, de par la bidirectionnalité du flux de puissance.

Dans l'exemple présenté dans cet article, un système de stockage basé sur la compression volumétrique isotherme de l'air utilise un grand nombre de composants interfacés à des circuits de conversion. Ces derniers sont utilisés à des fins diverses, allant de l'entraînement à vitesse variable d'un moteur-pompe hydraulique à un convertisseur continu-continu permettant de recourir à un stockage d'énergie auxiliaire à base de supercondensateurs, jouant le rôle de transformateur de puissance.

Si la complexité et la multitude des conversions statiques entrant en jeu dans un tel système sont dictées avant tout par l'exploitation des équipements thermodynamiques et hydrodynamiques au meilleur de leur performance, la conséquence en est une dégradation inévitable du rendement global par multiplicité des conversions.

Il apparaît ainsi un défi pour les ingénieurs développeurs d'équipements, pour atteindre des

valeurs exceptionnelles de rendement de ces différents équipements. De la machine électrique au convertisseur en passant par une série de composants passifs, chaque élément d'une chaîne complexe de conversion devra être spécifiquement conçu de manière à n'avoir qu'une contribution limitée à la dégradation du rendement global de l'installation.

II. DES APPROCHES DIFFÉRENTES POUR STOCKER DE L'ÉNERGIE PAR COMPRESSION DE L'AIR.

Pour résumer les principaux concepts de stockage par air comprimé réalisés ou étudiés durant les dernières décennies, on a représenté dans la figure 1 quatre configurations différentes, appartenant à des domaines de performances différents. Dans cette figure, on montre d'abord des systèmes utilisant des sources énergétiques multiples, à savoir une combinaison d'apport énergétique électrique et thermique, mettant en jeu un élément de combustion ou de chauffage. L'exemple cité traditionnellement est celui de la centrale de Huntorf en Allemagne, basé sur le cycle d'une turbine à gaz [1], [2]. Ce système représenté à la figure 1a présente le principal désavantage qui est celui de la présence d'une chambre de combustion alimentée par du gaz naturel. Ce système qui consomme de l'énergie primaire fossile n'est donc pas un système de stockage uniquement, et est caractérisé par ses émissions de gaz. Un deuxième système, plus proche du stockage, a été proposé récemment, combinant un élément de stockage pneumatique avec un élément thermique, accumulant en complément de l'air comprimé une certaine quantité d'énergie thermique. Ce système appelé TACAS [3] a le désavantage de consommer en permanence une quantité d'énergie non négligeable pour le maintien de la température du stockage thermique, indépendamment du fait que l'on utilise ou non de l'énergie en sortie.

Par opposition à ces systèmes, un système de stockage utilisant la compression volumétrique uniquement, sans apport énergétique supplémentaire a été étudié [4], [5]. Dans ses deux versions proposées et qui sont représentées à la figure 1c et 1d, ce type de systèmes de stockage possède la propriété de pouvoir stocker de l'énergie sur le long terme, sans pertes significatives à l'état chargé stationnaire, et permet de définir un rendement énergétique du cycle aller-retour similaire à celui d'un accumulateur

électrochimique. Un tel système ne présente qu'un très faible vieillissement, et est de plus réparable « par sous-système ». Il ne présente pas non plus de difficultés majeures lors du recyclage en fin de vie. Si le premier système appelé BOP-A est caractérisé par un faible volume d'air à haute pression (cycle fermé de gaz) et une quantité importante d'huile, la deuxième version appelée BOP-B fonctionnant en cycle ouvert pourra présenter des propriétés bien plus intéressantes du point de vue de la densité énergétique par exemple.

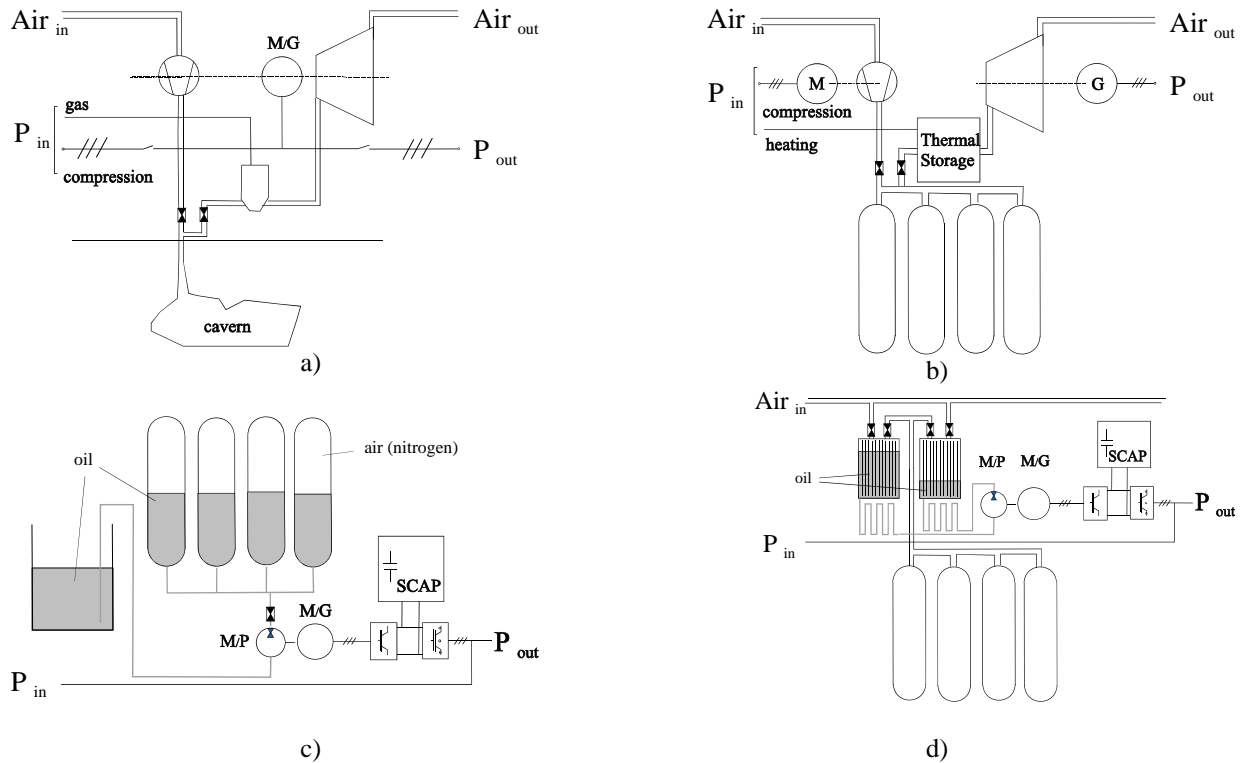


Fig.1. Systèmes de stockage par air comprimé
 a) Système classique CAES (Alstom)
 b) Thermal and compressed air storage (TACAS)
 c) Stockage hydropneumatique isotherme en cycle de gaz fermé (BOP-A)
 d) Stockage hydropneumatique isotherme en cycle de gaz ouvert (BOP-B)

III. UNE STRUCTURE HYBRIDE AVEC STOCKAGE AUXILIAIRE PAR SUPERCONDENSATEURS.

Sur la figure 2, le système appelé BOB – A est représenté. On y distingue les éléments principaux qui sont d'une part le système de stockage principal constitué des éléments thermodynamiques et hydrostatiques, avec l'entraînement à vitesse variable d'un moteur-pompe hydraulique. D'autre part, on peut également distinguer le système de stockage auxiliaire composé d'un banc de supercondensateurs avec son montage hacheur. Ce système de stockage auxiliaire est utilisé pour compenser les fluctuations de puissances causées

par le fonctionnement intermittent du système de stockage principal. Ce fonctionnement intermittent est introduit par un contrôle spécial spéculant sur le fonctionnement optimisé du convertisseur hydrostatique du point de vue de son rendement énergétique (MEPT, Maximum Efficiency Point Tracking), [5]. En effet, avec cette dernière stratégie, le point de fonctionnement à rendement optimisé implique une vitesse de rotation de la pompe bien définie. Pour cette dernière, le niveau de puissance est alors fixé. Le principe de la structure hybride consiste alors à faire fonctionner en régime « tout-ou-rien » le système hydropneumatique, avec un rapport cyclique d'enclenchement permettant de varier la valeur moyenne de la puissance convertie.

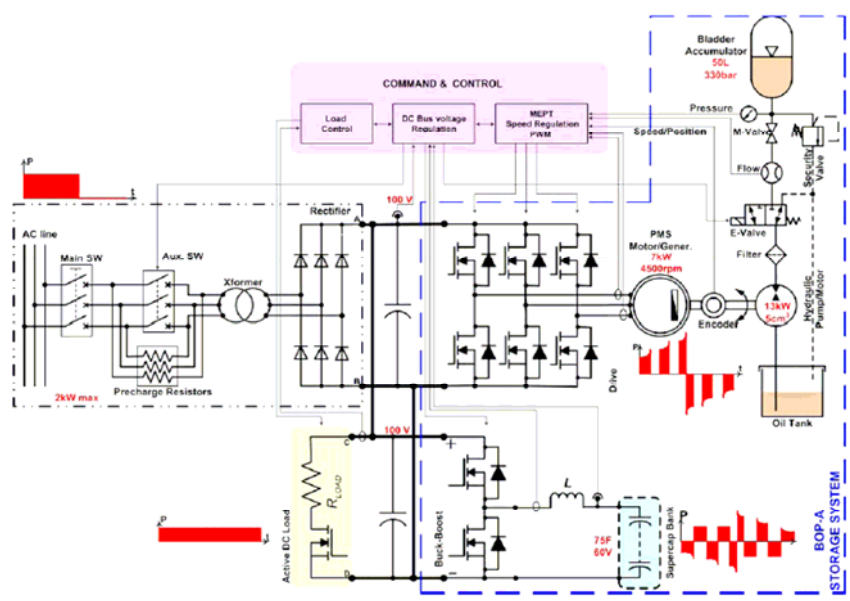


Fig. 2 : Système de stockage hybride basé sur l'air comprimé et stockage auxiliaire par supercondensateurs

La figure 3 illustre le principe de fonctionnement avec les courbes caractéristiques de la conversion intermittente et alternée des éléments principal et auxiliaire. L'état de charge de l'élément principal est illustré par la première courbe de la figure, indiquant le niveau de pression du gaz dans le réservoir fermé. Le mode représenté ici correspond au mode de charge, caractérisé par les montées séquentielles de la pression. La deuxième courbe montre l'état de charge du stockeur auxiliaire, c'est-à-dire les supercondensateurs. Le fonctionnement alterné de cette solution hybride est illustré également par les autres courbes, notamment les puissances aux différents niveaux, de même que la vitesse de rotation de la pompe hydraulique.

IV. EXPRESSION ANALYTIQUE POUR LE RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE GLOBAL DE LA STRUCTURE HYBRIDE.

Le principe de fonctionnement du système hybride est basé sur le fonctionnement intermittent et complémentaire de l'élément principal et du système auxiliaire, et par conséquent un grand nombre de conversions successives sont effectuées, et amènent à une cascade de rendements partiels. Cette cascade est ainsi responsable d'une dégradation du rendement global du système. Cet effet est particulièrement remarquable lors de cycles complets de charge – décharge du système de stockage. Les figures 4a et 4b représentent 3 cycles du fonctionnement alterné décrit ci-dessus, dans le cas d'un fonctionnement à puissance moyenne constante. Pour l'évaluation du rendement, la décharge de l'accumulateur hydraulique sera considérée comme suffisamment lente pour obtenir une détente isotherme du gaz, où la stabilisation de la température peut se faire par

transfert naturel de la quantité de chaleur à partir du milieu extérieur.

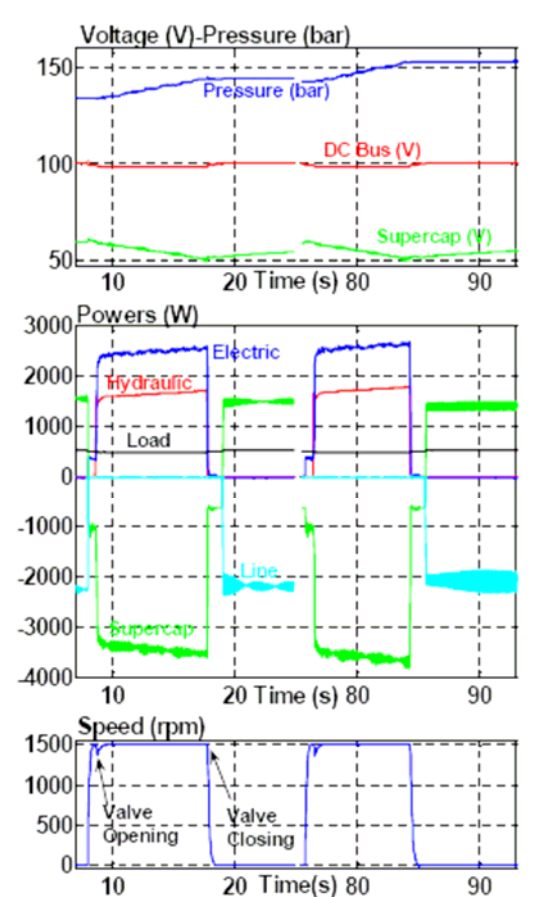


Fig. 3. Courbes caractéristiques du fonctionnement alterné des éléments du système hybride, à savoir le système hydropneumatique et le filtrage de la puissance par stockeur auxiliaire à supercondensateurs.

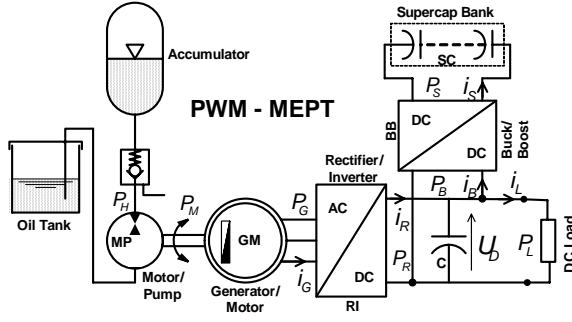


Fig. 4a. Principe de fonctionnement du système BOP A avec convertisseur DC-DC entre le circuit de sortie et le banc de supercondensateurs.

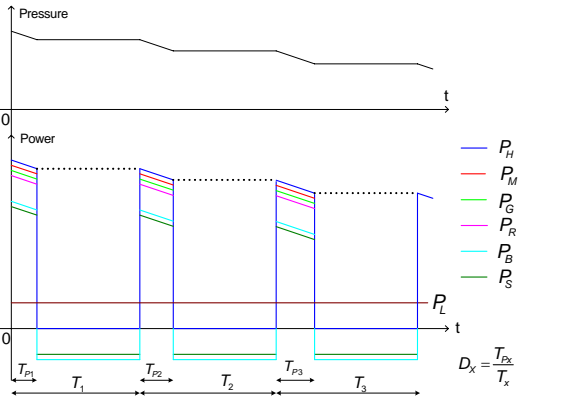


Fig. 4b. Principe de fonctionnement du système BOP A, profils des puissances.

Le paragraphe suivant donne une formulation analytique du rendement global, prenant en compte que plusieurs paramètres peuvent varier fortement, comme par exemple le rapport cyclique d'alternance entre enclenchement du stockeur hydropneumatique et du stockeur auxiliaire.

Les pertes dans la valve électromagnétique de même que l'énergie nécessaire pour l'accélération de la pompe sont considérées comme négligeables. Cette dernière en particulier est récupérée lors des phases d'arrêt. En considérant le temps de conversion d'énergie pneumatique en énergie électrique, T_p comme suffisamment court pour ne pas induire de variation de pression P trop grande, pour que le niveau de la puissance ne varie pas dans cet intervalle, le rendement η pour une période T du cycle est donné par:

$$\eta = \frac{E_L}{E_H} = \frac{P_L T}{P_H T_P} = \frac{P_L}{D P_H} \quad (1)$$

avec

$$D = \frac{T_P}{T} \quad (2)$$

où E_L et E_H sont respectivement les énergies absorbées dans la charge et extraite du système hydro-pneumatique, et D le rapport cyclique d'alternance. Si le système auxiliaire est utilisé pour « filtrer » le niveau de puissance pneumatique intermittent, la valeur moyenne de la tension des supercondensateurs restera constante. L'énergie E_{SC}

stockée dans ces derniers durant le temps d'enclenchement T_P , est restituée presque intégralement durant la durée de déclenchement $T_O = T - T_P$. Appelons η_{SP} le rendement de charge et η_{SO} le rendement de décharge du banc supercapacitif. Pour un taux de décharge donné de ce dernier, on peut écrire:

$$E_{SC} = \eta_{SP} P_{SP} T_P = \frac{P_{SO} T_O}{\eta_{SO}} \quad (3)$$

où P_{SP} et P_{SO} sont respectivement les puissances de charge et de décharge. On a ensuite également les relations suivantes :

a) Durant le temps de charge (des supercondensateurs) T_P :

$$P_R = \eta_M \eta_G \eta_R P_H \quad (4)$$

$$P_{SP} = \eta_{BK} P_{BK} \quad (5)$$

$$P_{BK} = P_R - P_L \quad (6)$$

b) Durant le temps de décharge T_O :

$$P_L = \eta_{BT} P_{SD} \quad (7)$$

où η_M est le rendement du moteur/pompe dans le fonctionnement moteur, η_G celui de la génératrice, η_R celui du redresseur/onduleur en mode redresseur, η_{BK} and P_{BK} sont les rendement et puissance du convertisseur DC-DC en mode abaisseur (Buck) (temps T_P), η_{BT} le rendement en mode élévateur de ce même convertisseur. En combinant ces relations avec (2), on obtient:

$$P_L T_O = \eta_M \eta_G \eta_R \eta_{BK} \eta_{BT} \eta_{SP} \eta_{SO} P_H T_P - \eta_{BT} \eta_{BK} \eta_{SP} \eta_{SO} P_L T_P \quad (8)$$

On peut également introduire la relation:

$$P_L T = P_L T_P + P_L T_O \quad (9)$$

En combinant (1), (8) et (9), on obtient le rendement global en mode générateur de l'ensemble hybride pour une période:

$$\eta = \frac{P_L T}{P_H T_P} = \frac{\eta_M \eta_G \eta_R \eta_{BK} \eta_{BT} \eta_{SP} \eta_{SO}}{1 - D(1 - \eta_{BK} \eta_{BT} \eta_{SP} \eta_{SO})} \quad (10)$$

Cette relation montre bien la sensibilité du système par rapport aux multiples conversions.

Dans un modèle simplifié, où on considère que les différents sous-systèmes sont parfaitement réversibles, ce qui signifie que le rendement est indépendant du mode de fonctionnement, soit pour la charge et pour la décharge. On peut ainsi définir pour le moteur/pompe η_{MP} ; pour le moteur/générateur électrique η_{GM} ; pour le redresseur/onduleur η_{RI} ; pour l'élévateur/abaisseur η_{BB} et pour les supercondensateurs η_{SC} . Ceci amène à une formulation plus simple du rendement global:

$$\eta = \frac{P_L T}{P_H T_p} = \frac{\eta_{MP} \eta_{GM} \eta_{RI} \eta_{BB}^2 \eta_{SC}^2}{1 - D(1 - \eta_{BB}^2 \eta_{SC}^2)} \quad (11)$$

Si on fait la supposition que les rendements partiels des sous-systèmes sont indépendants du rapport cyclique D , on constate que le rendement global augmente avec la valeur du rapport cyclique, ce qui correspond bien à un résultat attendu, par le fait que l'utilisation plus intense du stockeur auxiliaire introduit des pertes supplémentaires.

Pour un cas théorique simplifié où l'on a les conditions $\eta_{MP} = \eta_{GM} = \eta_{RI} = \eta_{BB} = \eta_{SC} = 0.95$, le rendement global est donné par l'expression:

$$\eta = \frac{0.698}{(1 - 0.185D)} \quad (12)$$

La figure 5 montre la variation de η en fonction du rapport cyclique D . D est proportionnel au rapport P_L/P_H , ce qui signifie qu'il augmente avec des conditions de pression basse. Le rendement est alors meilleur dans ces conditions qu'il ne l'est si la pression dans le réservoir est élevée. Ce comportement caractéristique est donné par le fait que si le niveau de la puissance de la source est voisin de celui du niveau de puissance nécessaire à faire fonctionner correctement le système hydropneumatique, le stockeur auxiliaire n'est pour ainsi dire pas utilisé, correspondant à une valeur plus grande du rapport cyclique D . On peut ainsi aussi assimiler à D une valeur représentant la profondeur de décharge du système complet.

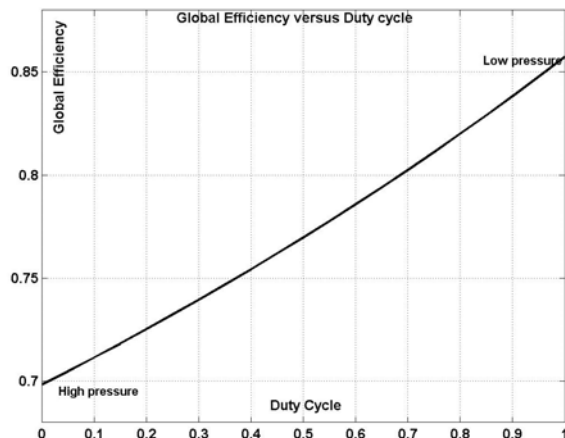


Fig. 5. Valeur théorique du rendement global en fonction du rapport cyclique.

Le rendement global représenté à la figure 7 correspond au rendement énergétique de l'ensemble hybride, cumulant les pertes dans les éléments principal (hydropneumatique) et auxiliaire (supercondensateurs), ainsi que dans les différents convertisseurs d'électronique de puissance. Il tient compte du fonctionnement alterné caractérisé par le rapport cyclique. Cette courbe représente le rendement global calculé dans un mode uniquement, soit la charge, soit la décharge. Pour

caractériser le rendement du cycle aller-retour du système d'accumulation hybride, il faut encore prendre les valeurs de la courbe de la figure 5 au carré. Comme le cycle complet est effectué à pression variable, c'est à dire à rapport cyclique variant fortement, le calcul de rendement d'un cycle complet devra encore introduire des paramètres supplémentaires, à savoir le taux de décharge des supercondensateurs ou les rapports de pression minimal et maximal.

V. CONCLUSIONS

Un système de stockage d'énergie par air comprimé utilise dans une structure hybride un nombre important de conversions par circuits d'électronique de puissance, de par la stratégie d'optimisation du fonctionnement de la machine de compression. Ces conversions multiples aboutissent à un rendement final pouvant être fortement dégradé, si tous les éléments de la chaîne ne sont pas choisis judicieusement ou conçus spécialement. Les avantages de la stratégie initialement choisie ne peuvent ainsi être concrétisés que si l'on conçoit des circuits de conversion présentant des rendements énergétiques les plus élevés possibles. Des travaux sur l'amélioration de rendement de convertisseurs sont actuellement en cours au LEI, de même que des travaux visant à définir une structure alternative qui limite le nombre de conversions successives.

VI. RÉFÉRENCES

- [1] Zaugg, Hoffeins, Brown Boveri air storage gas turbines, Brown Boveri Review, Vol 64, number 1, January 19//
- [2] Van der Linden Septimus, CAES for today's Market "EESAT 02, Conference on Electrical Energy Storage Applications and Technologies," San Francisco, April 2002
- [3] John Sears, Thermal and Compressed-Air Energy Storage (TACAS), Next Energy Storage Storage Technology, ESA, Electricity Storage Association, Annual Meeting 2005, 24-26 May 2005, Proceedings, Toronto, Ontario, Canada.
- [4] A. Reller, I. Cyphelly; "Speicherung gasförmiger energienträger: Eine Bestandsaufnahme", VDE - Berichte 1734, Energiespeicher, p.p. 37 - 45.
- [5] S. Lemofouet, A. Rufer, Hybrid Energy Storage System based on Compressed Air and Supercapacitors with MEPT (Maximum Efficiency Point Tracking), IPEC 2005, International Power Electronics Conference, 4-8 April 2005, Niigata Japan.

