

Utilisation du stockage supercapacitif dans le domaine traction

Assistance énergétique pour une locomotive diesel-électrique avec un stockage supercapacitif

Le système de traction diesel-électrique est très répandu dans le domaine ferroviaire et plus précisément dans des régions à faible potentiel de trafic. Dans ces conditions, ce choix est retenu pour son coût plus faible qu'une technologie électrique standard. L'inconvénient le plus important de cette technologie est l'évolution du prix d'achat du diesel. Il est donc important de développer de nouvelles stratégies pour augmenter le rendement d'un système diesel-électrique. Pour atteindre ce but, un système de stockage supercapacitif sera proposé dans ce rapport. Les questions de coût de construction et d'exploitation sont également étudiées dans ce travail. La solution dans ce travail doit donc proposer un système de réduction de la consommation de carburant tout en étant une solution viable financièrement. En plus de la baisse de la consommation, les rejets polluants seront également diminués.

Bien que cette étude ne concerne pas un véhicule approvisionné directement par l'énergie électrique, la démarche montre qu'il y a des potentiels importants d'amélioration de la propulsion électrique en général, ce qui représente un

Blaise Destraz

élément fondamental pour que les techniques de la traction électrique puissent être maintenues, surtout en milieu urbain et interurbain de courtes distances.

Les supercapacités sont de nouveaux composants utilisés dans le domaine de l'électronique de puissance [1]. Ils permettent de résoudre certains problèmes liés au stockage d'énergie de type conventionnel. En effet, ils offrent en même temps les avantages du stockage capacitif standard et des batteries. Ces composants trouvent leur place dans un grand nombre d'applications industrielles nécessitant un stockage d'énergie, et en

particulier dans le domaine des transports.

La figure 1 représente les différences (énergie stockée) entre une capacité de type classique (figure 1a) et un supercondensateur (figure 1b). La densité de puissance (W/kg) est comparable entre un condensateur classique et un supercondensateur. Toutefois, la densité en énergie stockée (Wh/kg) est beaucoup plus importante pour le cas des supercondensateurs. Il s'agit donc bien de composants permettant un stockage d'énergie.

Dans l'exemple de la figure 1 un supercondensateur de 600 Farads a été retenu. Toutefois, les fabricants de supercondensateurs, tel que Maxwell Technologies¹⁾ proposent des supercondensateurs de valeurs plus élevées dont les plus grosses sont de 2600 Farads; leur poids étant de 525 grammes et leur volume de 0,42 litres.

La densité d'énergie pouvant être stockée dans des supercondensateurs n'est pas comparable avec celle qui peut



Figure 1 Comparaison entre un condensateur standard et un supercondensateur

Figure 1a: Condensateur électrolytique 100 000 μF /16 V, $W = 12,8$ Joules; Figure 1b: Condensateur électrolytique 800 F/2,5 V, $W = 2500$ Joules

être stockée dans un système de batteries standard; le facteur est d'environ 10. Toutefois, cette densité énergétique est compatible pour une multitude d'applications industrielles nécessitant de fortes contraintes en puissance; contraintes qui ne peuvent pas être fournies avec un rendement optimal par des batteries standard. Ces caractéristiques sont donc tout à fait adaptées pour une utilisation dans les transports où les demandes en puissances sont très élevées lors des phases d'accélération. Un autre avantage non négligeable est la durée de vie de ces composants: elle est de 500 000 cycles pour des supercondensateurs et d'environ 1000 pour des batteries standard. La durée de vie du produit ainsi construit sera donc plus grande et nécessitera moins d'entretien; les coûts d'exploitation seront ainsi réduits par rapport à une solution classique.

Le tableau I présente les principales différences entre un système de stockage d'énergie à base de supercondensateurs ou à base de batteries standard. Les autres solutions de stockage d'énergie élec-

Performance	Accumulateur	Supercapacité
Energie spécifique [Wh/kg]	10–100	1–10
Nombre de cycles	1000	>500000
Puissance spécifique [W/kg]	<1000	<10000

Tableau I Différences entre les batteries standard et les supercondensateurs

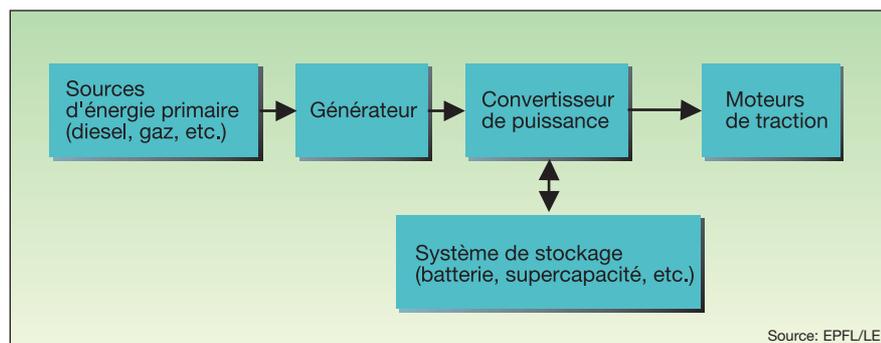


Figure 2 Principe de fonctionnement d'un véhicule hybride

trique, sous forme chimique ou mécanique, sont explicitées dans [1] et dans [2].

Le but de cet article est de présenter une solution permettant d'augmenter le rendement d'une locomotive diesel-électrique par l'ajout d'un système de stockage d'énergie à base de supercondensateurs. Deux systèmes différents seront étudiés pour atteindre ce but²⁾:

- Récupération de l'énergie de freinage; dans une locomotive diesel-électrique standard, cette récupération est impossible. Toute l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur.
- Augmentation du rendement énergétique du moteur diesel; la commande de ce moteur sera modifiée pour garantir un fonctionnement en permanence à son point de fonctionnement optimal.

Principe de fonctionnement d'un véhicule hybride

Le principe de fonctionnement d'un véhicule hybride [3] est résumé dans la figure 2. Ce véhicule contient une, voire dans certains cas plusieurs sources d'énergie primaire. Ces sources sont de type moteur diesel, à gaz ou autres. Elles sont connectées à un ou dans certains cas, plusieurs générateurs. Leur rôle consiste alors à transformer l'énergie mécanique

produite par le moteur primaire en énergie électrique. Cette dernière est alors transmise aux moteurs de traction et transmet l'effort de traction nécessaire aux roues. Tous les flux d'énergie dans le système sont gérés à l'aide de circuits logiques.

Ce type de transmission d'énergie entre les sources primaires et les roues possède un grand nombre d'avantages, dont les principaux sont [4]:

- Une récupération de l'énergie de freinage est possible. Dans ce cas, le moteur de traction fonctionne en mode génératrice. L'énergie de freinage est alors transformée en énergie électrique qui peut être stockée. Elle pourra ensuite être réinjectée dans le système de traction dans la suite du parcours. Le rendement du système complet sera donc augmenté.
- Une transmission mécanique et rigide entre le moteur primaire et les roues n'est plus nécessaire. Les contraintes mécaniques sont donc beaucoup plus faibles et laissent une liberté supplémentaire pour le design final du véhicule; les différents organes de transmission pouvant être intégrés de façon libre dans le véhicule.
- La taille du moteur primaire peut être réduite. Dans un véhicule standard, sans stockeur d'énergie, la taille du moteur primaire est définie pour ré-

pondre à la plus grande demande en puissance. Dans le cas d'un véhicule avec stockeur d'énergie, les pointes en puissance, notamment lors des accélérations peuvent être couvertes par le système de stockage. Ceci implique que le moteur primaire peut être réduit tout en gardant les mêmes caractéristiques dynamiques du véhicule (vitesse, accélération, etc.).

Dans le cas où un véhicule hybride possède un système de stockage d'énergie embarqué, il est possible de définir plusieurs modes de fonctionnement. Dans les cas d'un véhicule diesel-électrique, ils sont [5]:

- Mode diesel-électrique: L'énergie est transmise directement entre le moteur diesel et les moteurs de traction électriques.
- Mode électrique: Le moteur diesel ne fonctionne pas. L'énergie nécessaire pour la traction est prélevée dans le système de stockage d'énergie électrique (batteries, supercondensateurs etc.).
- Mode de génération constant: Le moteur diesel délivre un couple constant et fonctionne dans sa plage à meilleur rendement. Le rôle du système de stockage d'énergie est d'agir comme un tampon d'énergie entre le moteur primaire et les moteurs de traction.

Lors de ce travail, dont le but est d'augmenter le rendement énergétique d'un train diesel, le choix a été fait de ne pas modifier le type de la source primaire, le moteur diesel est donc conservé. La solution d'utiliser une autre source d'énergie primaire (pile à combustible, turbine à gaz ou autre) aurait pu être faite. Toutefois le moteur diesel est conservé dans la solution proposée dans ce rapport. En effet, il a les avantages suivants: le prix du carburant est faible, les coûts d'exploitation d'un tel moteur sont réduits, la connaissance de ce type de moteur est bonne pour toute la chaîne d'exploitation (de la fabrication à l'entretien), la densité énergétique de ce carburant est élevée, etc. Le type de stockage d'énergie qui a été retenu sera expliqué dans la suite de cet article.

Parcours type

Pour proposer une solution pour l'augmentation du rendement d'un train diesel-électrique et principalement pour pouvoir effectuer un dimensionnement des différents organes, un parcours type doit être défini. Les résultats obtenus dans cette étude seront donc seulement validés pour ce parcours, mais la même



Figure 3 Carte du parcours pour le trajet type retenu

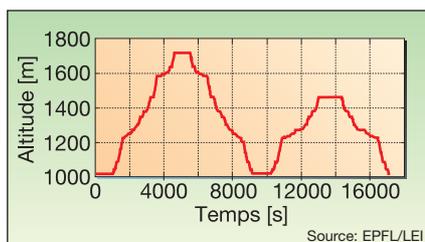


Figure 4 Profil de l'altitude lors du parcours type

méthode de calcul peut être faite pour tout autre parcours.

Le parcours type retenu doit être représentatif d'une utilisation rationnelle d'un train de type diesel. Ce type de propulsion est choisi notamment pour des solutions de transport dans des régions périphériques, où le nombre de passagers est limité, et qui ne justifie pas une électrification classique de la ligne (solution très coûteuse). Un lieu tout indiqué pour l'exploitation de train diesel se trouve donc en région montagneuse. Un autre avantage, en plus du prix, est la plus faible atteinte au paysage qu'une solution électrique, dû à l'absence de caténaires.

Le parcours retenu se situe sur la ligne Merano–Malles, situé en région montagneuse au nord de l'Italie (figure 3). Les pics de puissance nécessaires lors des accélérations en montée sont donc très importants. Il s'agit donc d'un cas très probable de l'exploitation d'un train diesel au lieu d'un train électrique.

Le profil de l'altitude de ce parcours en fonction du temps est représenté dans la figure 4. Cette course type retenue correspond à une montée (train direct), une pause, une descente (train direct), une pause, une montée (train régional), une pause et une descente (train régional).

Le parcours retenu correspond à une ligne en voie de rénovation dont il est prévu de faire circuler des trains standard diesel–électrique³. Il s'agit de rames de la série GTW⁴ et les caractéristiques principales sont:

- Poids total (sans charge): 67 t
- Poids total (pleine charge, toutes les places étant occupées): 84 t
- Puissance des moteurs diesel: 2 × 380 kW
- Puissance max. aux roues: 620 kW
- Vitesse maximale: 140 km/h

La figure 5 représente le train qu'il est projeté de construire pour cette ligne. Il s'agit de deux voitures passagères accouplées à leur centre par un module moteur. La solution proposée dans la suite de ce travail devra avoir les mêmes caractéristiques dynamiques (accélération, vitesse etc.) que le train projeté.

Train actuel

Le schéma bloc du train GTW diesel–électrique qui est actuellement en cours de réalisation pour la ligne Merano–Malles est donné sur la figure 6. Dans ce système, de type GTW, la source d'énergie primaire est composée de deux moteurs diesel de 380 kW chacun. L'énergie mécanique ainsi produite est transformée en énergie électrique à l'aide de deux générateurs asynchrones de 400 kW chacun. Un convertisseur statique est ensuite utilisé pour convertir les niveaux de tension alternatifs en tension continue, tension présente sur le bus intermédiaire de la locomotive. Cette tension continue est ensuite convertie en signaux alternatifs pour l'alimentation des moteurs de traction (2 moteurs asynchrones de 350 kW chacun). En parallèle, un système convertisseur–résistances est présent pour assurer la dissipation de l'énergie de freinage qui ne peut être stockée dans le cas de fonctionnement actuel.

Les différents flux d'énergie présents dans le système GTW sont représentés dans la figure 7. Dans cette figure, toutes les pertes sont représentées (convertisseurs, machines et mécaniques). Les échelles ne sont pas respectées dans cette figure. La source d'énergie primaire (moteur diesel dans le cas du GTW) est représentée au haut de la figure. Au bas est représenté l'énergie entrante et sortante des moteurs de traction (respectivement

lors des phases d'accélération ou de freinage). Le flux d'énergie est unidirectionnel, du moteur diesel vers les moteurs de traction, le moteur diesel ne pouvant pas fonctionner en mode inverse. Dans le système actuel de train GTW, il n'est donc pas possible de récupérer l'énergie de freinage, et elle doit ainsi être détruite dans les résistances de freinage disposées sur le toit.

Améliorations proposées pour augmenter le rendement énergétique du système

Le principe de fonctionnement de base d'une locomotive diesel–électrique est donné dans la figure 8. Dans ce cas, toute l'énergie de freinage est dissipée sous forme de chaleur au travers d'un hacheur de freinage placé sur le toit du train. Dans ce type de fonctionnement, toute énergie produite par le moteur diesel est directement consommée par les moteurs de traction. Les courbes de puissance des moteurs de traction et celles des moteurs diesel sont identiques, la seule différence est due au rendement non unitaire des convertisseurs.

Dans le but d'augmenter le rendement énergétique d'une locomotive diesel–électrique, deux améliorations – la récupération de l'énergie de freinage et le changement de la gestion du moteur diesel – seront présentées dans la suite.

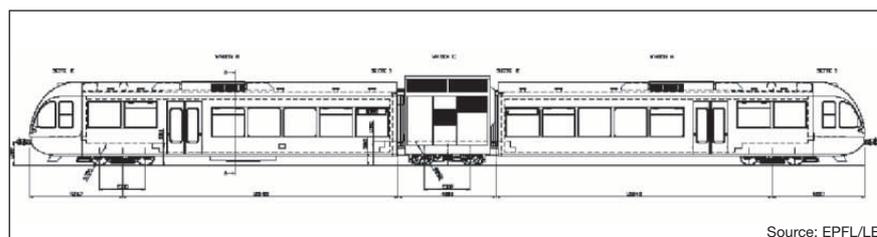


Figure 5 Train GTW

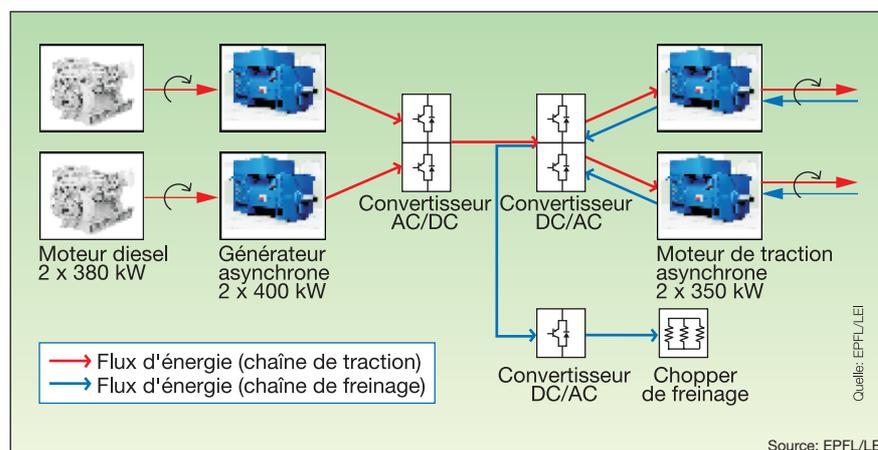


Figure 6 Schéma du train actuel

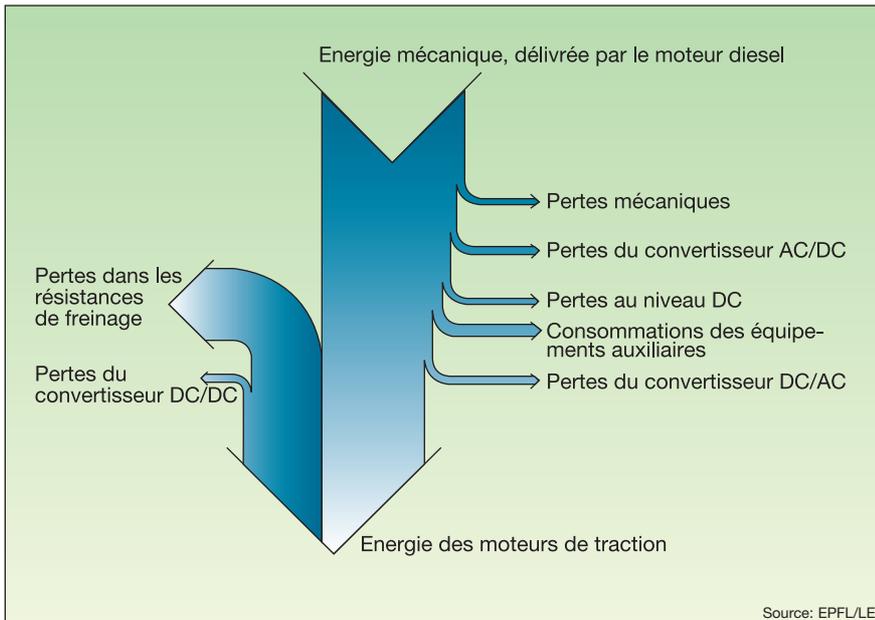


Figure 7 Transferts d'énergie dans la locomotive diesel – électrique actuelle

Récupération de l'énergie de freinage

Le système de freinage d'un train diesel est composé de deux sous-systèmes principaux: le freinage électrodynamique et le freinage mécanique. Dans un système récent, la part de freinage élec-

trique est beaucoup plus importante que la part mécanique. Ceci est principalement dû au fait de l'absence d'usure de ce système de freinage et donc un entretien réduit.

Le principe du freinage électrodynamique est de faire fonctionner les moteurs de traction comme générateurs. Ainsi, l'énergie de freinage est convertie en énergie électrique qui est dissipée sous forme de chaleur dans des résistances. Dans un train diesel, la part la plus importante de l'effort de freinage est assurée par le système électrodynamique. Le système mécanique est utilisé seulement en cas de nécessité. Dans la suite de ce projet, l'hypothèse a été faite que toute l'énergie de freinage est transformée en énergie électrique et peut donc être récupérée.

Dans la solution proposée, la récupération de cette énergie peut se faire par l'ajout d'un élément stockeur d'énergie dans la locomotive (avec les différents éléments nécessaires à son pilotage).

Le type du stockeur retenu pour cette application est le supercondensateur. Ce choix a été fait en raison des fortes sollicitations en puissance qui sont demandées aux éléments. De plus, cette solution a l'avantage d'avoir une durée de vie du stockeur plus élevée que la solution batteries et nécessitera donc moins d'entretien.

Le stockeur peut être connecté de deux façons dans la locomotive: branchement série ou parallèle. La solution retenue est le branchement du stockeur d'énergie en parallèle. En effet, cette solution a un

meilleur rendement énergétique que la solution série. Le schéma bloc correspondant à la solution choisie est représenté dans la figure 9.

Dans une réalisation pratique, il n'est néanmoins pas possible de supprimer le hacheur de freinage: le banc supercapacitif étant de taille finie. Pour des questions de sécurité, le train doit avoir les mêmes caractéristiques de freinage dans tous les cas de fonctionnement. En particulier, lorsque le stockeur est complètement chargé, il faut pouvoir dissiper l'énergie de freinage qui ne peut plus être stockée.

Changement de la gestion du moteur diesel

Suite à l'ajout du système de stockage d'énergie décrit dans le paragraphe précédent, il est possible de modifier la gestion énergétique du moteur diesel. Dans ce cas, deux sources d'énergie sont disponibles pour assurer les efforts de traction: Les moteurs diesel et le banc supercapacitif.

Le moteur diesel possède un point de fonctionnement optimal du point de vue de son rendement énergétique. De plus, les rejets de gaz polluants sont minimum lorsque le moteur fonctionne dans ce mode. La commande du moteur diesel sera donc réalisée pour qu'il fonctionne en permanence soit dans ce régime, soit à l'arrêt. Dans ce cas, l'énergie moyenne nécessaire pour la traction sera délivrée par les moteurs diesel et toutes les fluctuations seront assurées par les supercondensateurs.

Cette méthode de commande s'appelle lissage de la puissance délivrée par les moteurs diesel [6]. Il est possible de distinguer deux cas de lissage différents: le lissage accélération-freinage et le lissage montée-descente.

Lissage accélération-freinage

Le parcours type défini dans cette étude comporte une grande quantité de phases d'accélération-freinage, comportement très typique dans le domaine des transports publics. Les figures 10 et 11 présentent le principe de lissage des flux d'énergie au niveau des phases accélération-freinage.

La figure 10 présente le concept de récupération de l'énergie de freinage, énergie qui est réinjectée dans le système de traction lors de la prochaine accélération (pointe de puissance suivante). La réduction des pointes de puissance à fournir par le moteur diesel est représentée dans cette figure.

Dans une seconde approche, il est possible de faire fonctionner les moteurs diesel lorsque la locomotive est en train de

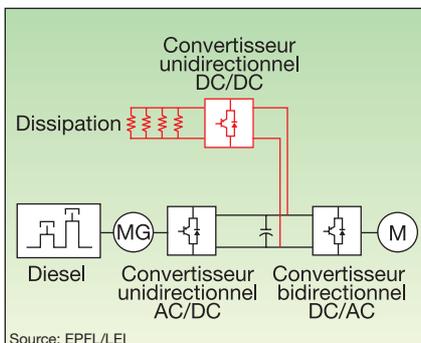


Figure 8 Principe de fonctionnement du train GTW actuel

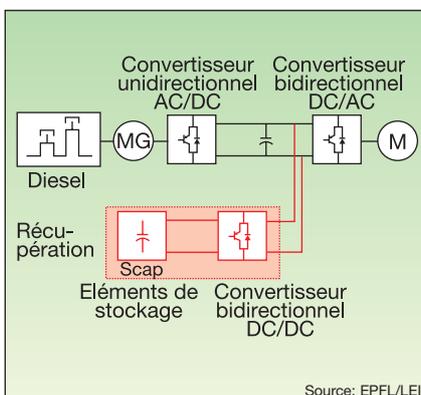


Figure 9 Principe de fonctionnement du train diesel – électrique tel que proposé dans ce travail

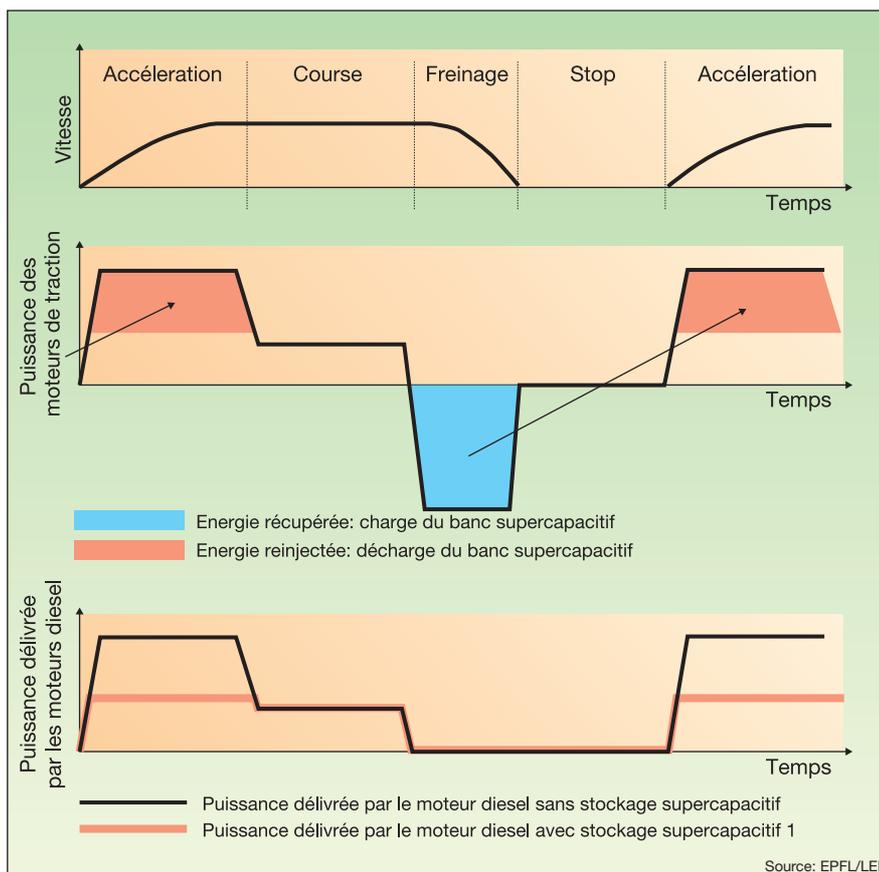


Figure 10 Lissage 1 (accélération - freinage)

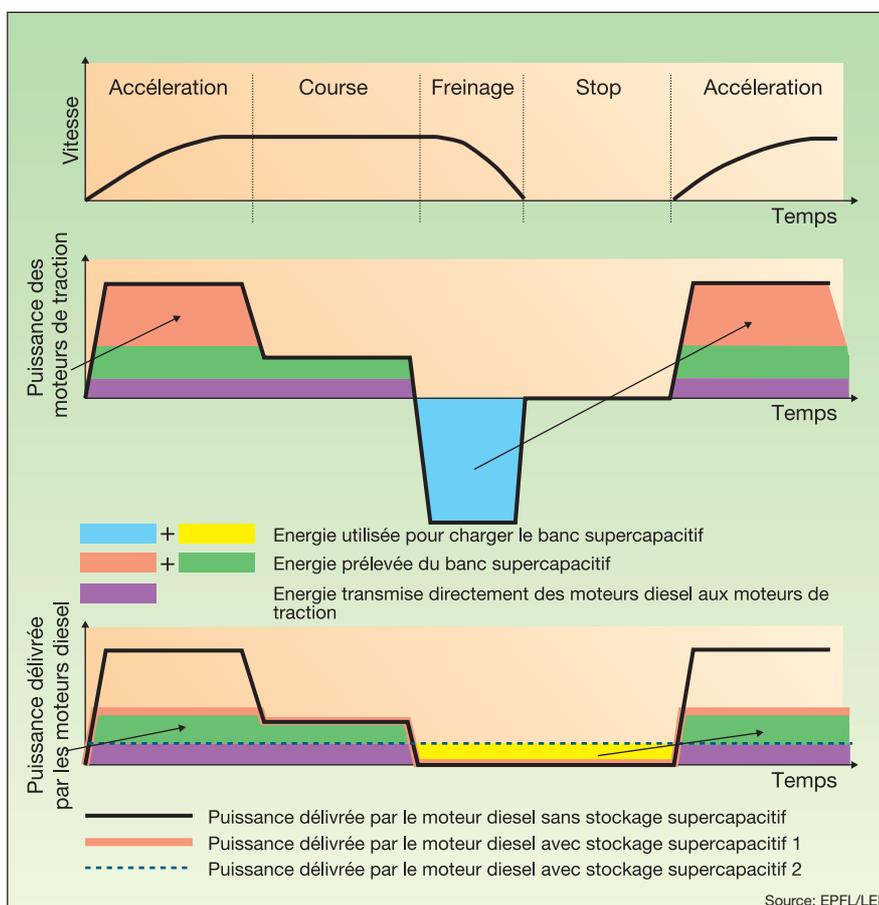


Figure 11 Lissage 2 (accélération - freinage)

freiner ou qu'elle est à l'arrêt. L'énergie excédentaire délivrée par le moteur diesel pendant ces phases de fonctionnement est accumulée par les supercondensateurs et est réinjectée dans le système dès que la demande en puissance est plus élevée que celle fournie par le moteur diesel. Ce principe est expliqué dans la figure 11.

La solution décrite dans ce chapitre permet un lissage de la puissance délivrée par le moteur diesel entre deux arrêts. Elle correspond à la valeur moyenne de la puissance sur les moteurs de traction entre ces deux arrêts. Il s'agit maintenant de prendre en considération que chaque parcours (entre deux haltes) possède ses propres caractéristiques (longueur, dénivellation, etc.). Il est possible d'effectuer un lissage de cette puissance sur un parcours de mêmes contraintes (montée ou descente).

Lissage montée-descente

Le concept de lissage lors d'un parcours montée (respectivement descente) a été expliqué dans les paragraphes précédents. Il s'agit de définir maintenant un lissage de la puissance délivrée par les moteurs diesel sur le parcours complet. Ce principe est résumé dans la figure 12.

Suite à ces trois lissages, la puissance à délivrer par le moteur diesel est constante sur tout le parcours type. La figure 13 présente le calcul de la puissance moyenne sur ce parcours. Il en découle qu'un moteur de 45 kW délivrant en permanence (montée, descente, pause) cette puissance est suffisante pour atteindre les mêmes performances dynamiques que le train actuel avec 2 moteurs diesel de 380 kW chacun.

Cette solution correspond au cas optimum du rendement qu'il est possible d'atteindre avec une réduction de la puissance du moteur diesel. Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un nombre trop grand de supercondensateurs et ne peut pas être viable économiquement.

Il apparaît très rapidement que cette solution est éloignée de la réalité financière d'un projet de ce type. En effet, lors de ces calculs, la supposition a été faite que le système de stockage d'énergie était de taille infinie. En cas de choix du moteur optimal, il faudrait utiliser un banc stockeur d'énergie de taille maximale (cf. chapitre suivante *dimensionnement du banc supercapacitif*). En effet, l'énergie nécessaire lors des phases de montées est produite lors de la descente précédente et doit être stockée pendant un temps maximal dans le banc stockeur et donc augmentera sa taille.

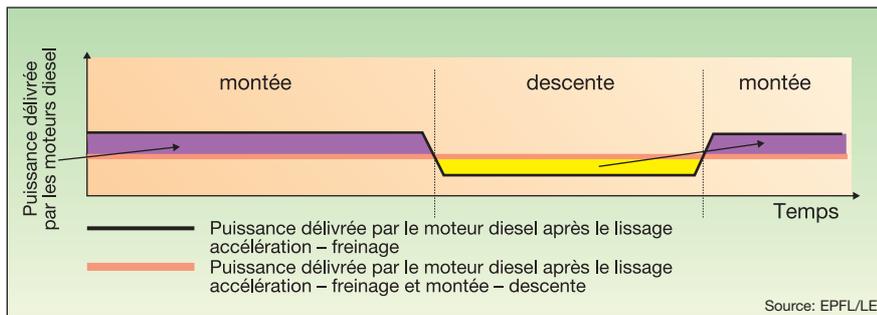


Figure 12 Lissage 3 (montée - descente)

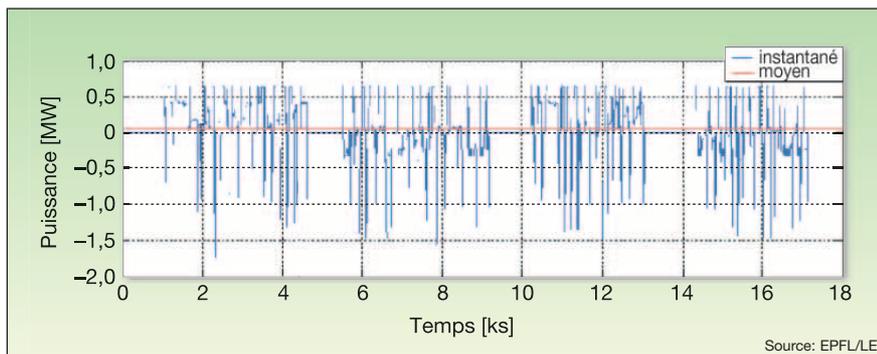


Figure 13 Puissance moyenne délivrée par le moteur diesel (pour assurer les efforts de traction)

En plus du prix d'achat des supercondensateurs, les variables de volume et de poids sont importantes dans ce projet. Elles seront introduites lors du calcul du gain énergétique en fonction du prix qui sera fait dans la suite de ce travail.

Il sera donc nécessaire de prendre en considération des cas moins extrêmes et de trouver l'équilibre entre gain sur le rendement et coût de réalisation du projet. Le choix final ne sera fait qu'à la fin de ce projet, après avoir chiffré les gains sur la consommation de carburant en fonction du prix de construction du banc stockeur.

Dimensionnement du stockeur d'énergie supercapacitif

Le modèle de supercondensateurs retenu dans ce projet est BCAP0010 de Maxwell Technologies. Il s'agit du modèle le plus performant, du point de vue de la valeur de la capacité, proposé par cette entreprise. Sa capacité nominale est de 2600 Farads et la tension maximale admissible à leurs bornes est de 2,5 Volts.

Pour le calcul du nombre de supercondensateurs nécessaire, le coefficient de décharge de ces dernières doit encore être défini. Plus ce coefficient est élevé, plus l'énergie qu'il est possible de stocker par élément est importante; mais plus faible sera leur durée de vie. Il s'agit donc de trouver le meilleur compromis entre ces

deux contraintes pour déterminer le facteur de décharge. Dans ce projet, il a été choisi égal à 0,5 car il s'agit du meilleur compromis pour des applications de ce type [7].

Le nombre de supercapacités nécessaire est calculé à partir de l'excursion maximum de la variation de l'énergie aux bornes du stockeur d'énergie. Pour obtenir un minimum de supercondensateurs, il est donc nécessaire de réduire au maximum l'excursion de cette variation d'énergie. Ce calcul a été fait en considérant plusieurs types de moteurs diesel (du plus faible possible au cas actuel). Le moteur possède deux points de fonctionnements possibles pour ce calcul: fonctionnement à régime optimal ou arrêté. Une stratégie d'optimisation a été définie pour minimi-

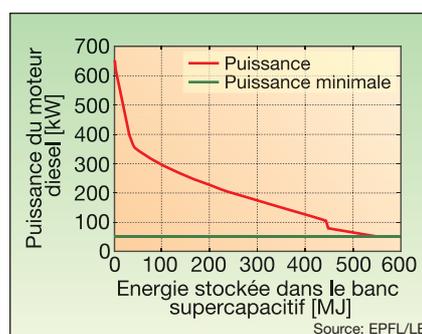


Figure 14 Réduction de la puissance maximale délivrée par le moteur diesel en fonction de la taille du stockeur supercapacitif

Puissance du moteur diesel [kW]	Nombre de Supercapacité [-]	Volume [l]	Poids [kg]
45	100878	42369	52961
50	99772	41847	52309
75	83772	35185	43981
100	81141	34079	42599
125	72296	30365	37956
150	62574	26574	32851
175	53422	22437	28047
200	44561	18716	23395
225	36579	15364	19204
250	28919	12146	15183
275	22690	9530	11913
300	17457	7332	9165
325	12280	5158	6448
350	8202	3445	4306
400	5726	2405	3006
450	4457	1872	2340
500	3246	1365	1704
550	2410	1012	1265
600	976	410	513
640	51	22	27
680	0	0	0

Tableau II Nombre de supercondensateurs en fonction de la puissance délivrée par le moteur diesel

ser la variation de l'énergie au niveau du banc stockeur [8].

Le résultat de cette optimisation est donné dans la figure 14. La réduction de la puissance du moteur diesel est représentée en fonction de la taille du stockeur d'énergie. Il est intéressant de remarquer qu'un stockeur de petite taille se traduit par une importante réduction de la puissance nécessaire sur le moteur diesel.

Le nombre effectif de supercondensateurs (2600 Farads) est donné dans le tableau II. Lors de ce calcul, le rendement des phases charge-décharge, le type de charge (courant constant ou puissance constante) ont été pris en compte. Le nombre de supercapacités varie entre 0 (cas de la locomotive sans stockage supercapacitif) à environ 100 000 (cas avec un moteur diesel de 45 kW). Sans prendre en compte les considérations de prix, le meilleur choix du point de vue écologique correspond au cas comportant 100 000 supercondensateurs. Dans la suite de ce travail, il s'agira de trouver le meilleur compromis entre le coût de réa-

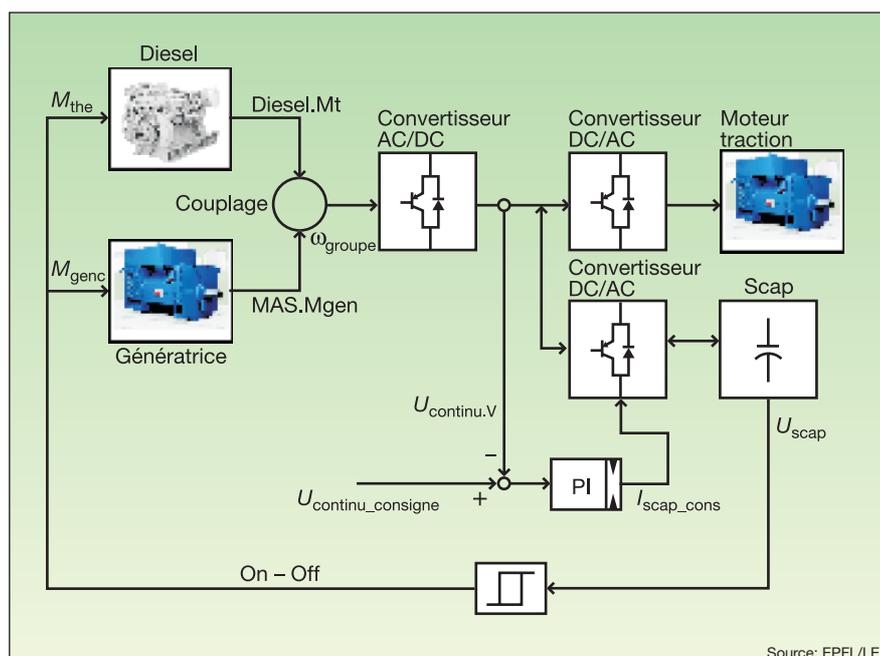


Figure 15 Régulation utilisée pour le moteur diesel

lisation et le gain en rejets d'émissions polluantes.

Régulation des flux d'énergie dans le train à stockage supercapacitif

Dans le système de train à stockage supercapacitif, il y a deux sources d'énergie disponibles pour la traction: Le moteur diesel et le banc de stockage supercapacitif.

Dans le but d'augmenter le rendement énergétique du train diesel, la stratégie de commande du moteur diesel est la suivante: toute fluctuation de l'énergie nécessaire au niveau des moteurs de traction est directement prélevée sur le banc stockeur. Le moteur diesel fonctionne alors seulement pour recharger les supercondensateurs.

Ainsi, le moteur diesel est complètement découplé des moteurs de traction et peut ainsi être commandé indépendamment de l'énergie consommée par les moteurs de traction. La stratégie de commande retenue pour le moteur diesel est donc réalisée en tout ou rien, c'est-à-dire soit le moteur fonctionne à son point de fonctionnement correspondant à son meilleur rendement, soit le moteur est à l'arrêt.

Lors des phases de fonctionnement, le moteur diesel délivrera un couple constant avec une vitesse de rotation fixe. Cette commande sera directement calculée à partir de l'état de charge du banc stockeur d'énergie. Du fait que le moteur

diesel fonctionnera en permanence à son meilleur point de fonctionnement, le rendement énergétique du système sera augmenté.

La tension aux bornes du banc stockeur correspond à l'image de l'état de charge de ce dernier. Cette tension sera alors prise comme référence pour la détermination des moments de fonctionnement des moteurs diesel. Comme la consigne nécessaire se limite à une consigne ON-OFF, un simple comparateur avec hystérèse pourra être utilisé pour la régulation du système complet. Le schéma du régulateur retenu est donné dans la figure 15.

Simulation et résultats

Des simulations du train à stockage supercapacitif ont été effectuées dans le but de valider les différents concepts qui ont été définis dans ce rapport. Elles ont été faites en prenant comme base des études qui ont été faites par Stadler Rail pour le parcours considéré. Elles permettent notamment de déterminer la puissance consommée par les moteurs de traction lors de ce parcours. Ce résultat correspondra à la charge appliquée au système proposé.

Les simulations ont été faites en modélisant la totalité de la chaîne de puissance, c'est-à-dire de la production d'énergie mécanique par le moteur diesel aux moteurs de traction. Les différents régulateurs pour la gestion de l'énergie ont également été implémentés.

Pour pouvoir comparer la solution du train diesel avec stockage supercapacitif avec la solution classique, une simulation du train actuel a également été faite. Ainsi, les mêmes hypothèses ont été prises pour le système proposé et la référence. Les comparaisons seront ainsi plus correctes.

Le poids du stockeur supercapacitif a été introduit dans les modèles simulés à l'aide du logiciel Simplorer⁵. Les résultats de ces simulations sont donnés en détails dans [8]. Les résultats sur le gain de consommation de diesel sont résumés dans le tableau III pour trois cas différents (la référence correspond au train actuel).

Pour définir quelle est la solution la plus rentable, un calcul des coûts d'exploitation du train a été fait pour ces différents cas. En prenant l'hypothèse que la durée de vie d'un train de ce type est de 25 ans, le meilleur compromis est trouvé par l'utilisation d'un moteur diesel de 380 kW; soit la moitié de la taille du moteur actuel. Le banc supercapacitif est alors composé de 15 000 éléments de 2600 Farads. Le gain sur la consommation de carburant diesel est de 50%. Ce gain sur la consommation de diesel est obtenu sans pertes de performances du train (accélération, vitesse maximale), etc.).

Bien que le prix d'achat des supercondensateurs soit élevé, la solution du train avec stockage supercapacitif est rentable par rapport à l'exploitation d'un train diesel-électrique standard après 10 années d'exploitation [8].

Références

- [1] R. G. V. Hermann: High performance double-layer capacitor for power electronic applications. In Second Boostcap meeting, Montena Components SA, Fribourg, Switzerland, 2001.
- [2] S. M. Schoenung, C. Burns: Utility energy storage applications studies. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 11, no. 3, pp. 658-665, 1996.
- [3] R. G. R. Kötz, P. Barrade: Supercapacitors for peak-power demand in fuel-cell-driven cars.
- [4] A. D. Richard Smokers, R. Winkel: Worldwide developments and activities in the field of hybrid

Puissance du moteur diesel [kW]	Gain sur la consommation de diesel [%]
760	0
470	35
380	50
300	58

Tableau III Gains sur la consommation de carburant

road-vehicle technology ; annex vii : Hybrid vehicles overview report 2000. IEA International Energy Agency, 2000.

- [5] S. Ruppert, E. Holl: Drive and power control in hybrid electric city buses. 2001.
- [6] A. Rufer, P. Philippe: A supercapacitor-based energystorage system for elevators with soft commutated interface. IEEE Transactions on industry applications, vol. 38, no. 5, pp. 1151–1159, 2002.
- [7] P. Barrade, A. Rufer: High-power fast energy exchange between storage system: Supercapacitors as energy buffer in transportation systems. International Congress Centre (ICC), Berlin, Germany, 2001.
- [8] B. Destrax: Travail de diplôme: Assistance énergétique pour un véhicule à base de stockage supercapacitif. EPFL – LEI, Lausanne, Switzerland, 2003.

Littérature

- J. D. Boyes, N. H. Clark: Technologies for energy storage flywheels and super conducting magnetic energy storage. IEEE, 2000.
- P. Barrade: Series connexion of supercapacitors: comparative study of solutions for the active equalization of the voltage. Ecole de Technologie Supérieure (ETS), Montréal, Canada, 2002.

Informations sur l'auteur

Blaise Destrax est ingénieur EPFL en électricité. Il a obtenu son diplôme en 2003 à l'EPFL, au laboratoire d'électronique industrielle (LEI), sur le sujet de l'assistance énergétique pour une locomotive diesel-électrique avec un stockage supercapacitif. Il est actuelle-

ment collaborateur au laboratoire d'électronique industrielle.

EPFL-STI-ISE-LEI, Laboratoire d'électronique industrielle, CH-1015 Lausanne, blaise.destrax@epfl.ch

¹ Maxwell Technologies: CH-1728 Rossens, www.maxwell.com

² Ce travail fait partie d'un ensemble d'études et recherches conduites au Laboratoire d'électronique industrielle (LEI) de l'EPFL, et a été effectué lors d'un travail

de diplôme. Le travail a été encadré par le Prof. A. Rufer et M. P. Barrade.

³ Les données numériques nécessaires pour le dimensionnement concret de cette étude ont été mises gracieusement à disposition du LEI par Stadler Rail AG, en Suisse. www.stadlerail.com

⁴ GTW: Gelenktriebwagen

⁵ Simplorer est un logiciel de simulation utilisé dans les domaines de l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique de puissance, et les systèmes d'entraînements électriques, www.ansoft.com.

Einsatz von Super-Kondensatoren im Traktionsbereich

Energiespeicherung für diesel-elektrische Lokomotiven dank Super-Kondensatoren

Das diesel-elektrische Traktionssystem ist in der Eisenbahntechnik vor allem in Gebieten mit schwachem Verkehrsaufkommen weit verbreitet. Dort bietet dieses System Kostenvorteile gegenüber der rein elektrischen Traktion. Der Hauptnachteil dieser Technologie hängt jedoch mit der Entwicklung des Dieselölpreises zusammen. Es gilt also, durch die Entwicklung neuer Strategien die Effizienz diesel-elektrischer Traktionssysteme zu verbessern. Dazu wird im vorliegenden Artikel ein super-kapazitives Speichersystem vorgeschlagen und gleichzeitig werden Fragen zu Bau- und Betriebskosten durchleuchtet. Es wird ein System vorgestellt, das den Ölverbrauch verringert und dabei eine finanziell vertretbare Lösung darstellt. Neben dem verminderten Verbrauch ist zu erwähnen, dass auch eine Reduktion des Schadstoffausstosses erzielt wird.