

Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich
Institutsdirektor

**Deutsches Zentrum für Luft-
und Raumfahrt e.V. (DLR)**
Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711/6862-256
E-Mail: horst.friedrich@dlr.de

Falabretti Mario
Teilprogramm Manager

**Schweizerische
Bundesbahnen (SBB)**
Energiemanagement-Traktion
Hilfikerstrasse 3, CH-3000 Bern
Tel.: +41 (0)79/879 02 32
E-Mail: mario.falabretti@sbb.ch

Alternative Antriebskonzepte für Rangier- und Baufahrzeuge der Schweizerischen Bundesbahnen SBB.



Abschlussbericht BAV Vorstudie

Bern, 09.01.2015

Impressum

Studie im Rahmen der Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050)
Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Verkehr (BAV)

Autoren

Mario Falabretti (SBB)
Holger Dittus (DLR)
Marcus Hoffmann (DLR)
Johannes Pagenkopf (DLR)
Mathias Böhm (DLR)

Projektbegleitung BAV

Tristan Chevroulet
Stefan Schnell
Walter Josi
Daniel Kiener

(Das BAV hat die Erstellung der Studie unterstützt.
Sie gibt die Stellung der Autoren – und nicht des BAV – wider.)

Programmausschuss ESÖV 2050

Pieter Zeilstra (Präsident), Abteilungsleiter Sicherheit
Toni Eder, Abteilungsleiter Infrastruktur
Pierre-André Meyrat, Abteilungsleiter Finanzierung
Gery Balmer, Abteilungsleiter Politik

Programmleitung ESÖV 2050

Tristan Chevroulet

PDF-Version

www.bav.admin.ch/energie2050

Zugehörige Dokumente

Forschungsbericht DLR

Executive Summary

Obwohl die SBB über ein vollständig elektrifiziertes Netz verfügt, benötigt der Betrieb und Unterhalt der hochbelasteten Infrastruktur auch zukünftig Fahrzeuge, welche unabhängig von der Energieversorgung durch die Fahrleitung verkehren können.

Bisher wurden Fahrzeuge für diese Einsatzzwecke grundsätzlich mit einem dieselbetriebenen Antrieb beschafft. Begünstigt durch die Tatsache, dass diese Lokomotiven meist auch auf elektrifizierten Streckenabschnitten verkehren, setzen sich vermehrt auch Fahrzeuge mit einem 2-Kraft-Antrieb (elektrischer und thermischer Antrieb) durch. Nach wie vor bestehen aber Rollmaterialgattungen, bei welchen dieses Konzept aus technischen, betrieblichen und insbesondere wirtschaftlichen Gründen nicht umsetzbar scheint.

Mittels dieser durch das BAV geförderten Vorstudie untersuchte die SBB in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), den zukünftigen Einsatz alternativer Antriebskonzepte für nachfolgende Einsatzzwecke zur Reduktion des Energieverbrauches und der damit verbundenen Emissionen:

- Baudienstverkehr
- Rangierdienst (Zerlegen und Neuformieren von Zügen)
- Einzelwagenladungsverkehr (bei SBB Cargo)
- Interventionstätigkeiten (durch die SBB Betriebswehr)

Basierend auf bestehendem Rollmaterial und deren Betriebskonzepte analysierte das DLR mit einem Zeithorizont bis 2020 das Potenzial bekannter, sich in der Entwicklung befindlichen und zukünftigen Antriebstechnologien. Grundsätzlich ergeben die betrachteten Technologien zwei Handlungsansätze:

Verbesserung der Energieeffizienz bestehender Antriebskonzepte

Auf Grund diverser Bedingungen kann kein kompletter Wegfall des Dieselmotors erfolgen. In diesen Fällen ist das bestehende Konzept weit möglichst zu optimieren. Dies kann durch den Einsatz von alternativen Treibstoffen, der Verwendung mehrerer kleinerer Motoren oder Hybridantrieben und der Einführung einer Start/Stop-Funktion realisiert werden.

Ersatz des Dieselantriebes durch alternative Antriebstechnologien

Bei der Substitution des konventionellen Dieselmotors ist die grösste Hürde für die Verwendung alternativer Antriebe das Mitführen und/oder Speichern der benötigten Energiemenge.

Untersucht wurden dabei der Einsatz von Energiespeicher- und Brennstoffzellenantrieben.

Die meisten Technologien lassen sich zudem kombinieren, so dass z.B. der 2-Kraft-Antrieb (elektrisch/ thermisch) zukünftig zu einem 2-Kraft-Antrieb mit Energiespeicher weiterentwickelt werden und der Dieselmotor komplett wegfallen kann (ersetzt durch Energiespeicher).

Nachfolgende Tabelle fasst die Einsatzcharakteristik und die resultierenden Empfehlungen stichwortartig zusammen.

Einsatzzweck	Einsatzcharakteristik	Empfehlung
Baudienst (z.B. Tm 234)	<ul style="list-style-type: none"> fahrleitungsunabhängiger Betrieb geringe Betriebsstunden grösstenteils niedrige Leistungsanforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> weiterhin thermischer Antrieb mit Mehrmotorenkonzept inkl. Start/Stopp-Funktion langfristig: Einsatz Brennstoffzelle
Rangierdienst (z.B. Am 843)	<ul style="list-style-type: none"> je nach Einsatzort hoher Leistungsbedarf (thermisch & elektrisch) zukünftig verschiedenste Einsatzzwecke 	<ul style="list-style-type: none"> kurzfristig: 2-Kraft-Antrieb und Start/Stopp-Funktion für Dieselmotor langfristig: Kombination Fahrleitung/Energiespeicher, Test von Energiespeicher auf Fahrzeugen geringerer Leistungsklassen empfohlen
Einzelwagenladungsverkehr (z.B. Eem 923)	<ul style="list-style-type: none"> geringer Anteil ohne Fahrdraht hohe Betriebsstunden niedrige Leistungsanforderungen thermisch 	<ul style="list-style-type: none"> kurzfristig: 2-Kraft-Antrieb ist sehr gut geeignet langfristig: Traktionsbatterie anstelle vom Dieselmotor
Intervention (z.B. Lösch- und Rettungszug 08)	<ul style="list-style-type: none"> unterschiedlichste Einsatzzwecke hohe technische Komplexität der Fahrzeuge 	<ul style="list-style-type: none"> Ergänzung mit hydromechanischem Getriebe zur Steigerung des Wirkungsgrads Start/Stopp-Funktion für bestehende Dieselmotoren

Als kurz bis mittelfristige Massnahme ist für alle Fahrzeugtypen der Einsatz von Gas- und Biotreibstoffen zu prüfen. Zusätzlich zu den damit reduzierten Energiekosten ist dadurch eine Verringerung der CO₂-Emissionen zu realisieren.

Zu berücksichtigen sind jedoch die fahrzeugseitigen Anpassungen sowie die zusätzliche Infrastruktur für die Betankung von gasförmigen oder flüssigen Treibstoffen.

Generell gilt es, die Fahrzeuge soweit möglich zu elektrifizieren was insbesondere durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energien im SBB Bahnstrom zu grossen Kosten- und Emissionsreduktionen führt.

Beim Einsatz von Brennstoffzellen für den fahrleitungsunabhängigen Betrieb gilt es zu beachten, dass der Wirkungsgrad des eigentlichen Antriebs gesteigert und die direkten Emissionen vermieden werden, aber die indirekten Emissionen für die Gewinnung, den Transport und die Lagerung des Wasserstoffs sich, je nach Erzeugungsart, auch verschlechtern können.

Executive Summary

Bien que les CFF disposent d'un réseau intégralement électrifié, l'exploitation et l'entretien de l'infrastructure fortement sollicitée nécessiteront aussi à l'avenir des véhicules capables de circuler indépendamment de l'alimentation énergétique fournie par la ligne de contact.

Jusqu'ici, les véhicules acquis à cet effet étaient généralement équipés d'un moteur diesel. Mais comme ces locomotives circulent elles aussi, le plus souvent, sur des tronçons de ligne électrifiés, les véhicules dotés de deux types d'entraînement, électrique et thermique, se multiplient.

Cependant, certaines catégories de matériel roulant semblent toujours incompatibles avec ce concept pour des raisons techniques, opérationnelles et surtout économiques.

Par la présente étude préliminaire requise par l'OFT, les CFF ont examiné, en collaboration avec l'institut «Concept de véhicules» du Centre allemand de recherche aérospatiale (DLR), l'utilisation de concepts d'entraînement alternatifs pour les applications indiquées ci-après en vue de réduire la consommation énergétique et, partant, les émissions de gaz polluants:

- Transports du service des travaux
- Service de la manœuvre (dégrouperment et nouvelle formation de trains)
- Trafic par wagons complets isolés (chez CFF Cargo)
- Activités d'intervention (par la défense d'entreprise CFF)

Le DLR a analysé, à l'horizon 2020, le potentiel de technologies d'entraînement connues, en cours d'élaboration et futures en tenant compte du matériel roulant actuellement utilisé et des concepts d'exploitation. Les technologies examinées permettent d'identifier deux axes de travail:

Amélioration de l'efficacité énergétique des concepts d'entraînement existants

La suppression pure et simple des moteurs diesel est impossible pour diverses raisons. Dans ces cas-là, le concept existant doit être optimisé autant que possible, soit par le recours à des carburants alternatifs, soit par l'utilisation de plusieurs moteurs de plus petite taille ou d'entraînements hybrides, soit encore par l'introduction d'une fonction «start and stop».

Remplacement des moteurs diesel par des technologies alternatives

Le principal obstacle à l'utilisation d'entraînements alternatifs, dans le cadre du remplacement des moteurs diesel conventionnels, réside dans le transport et/ou le stockage de la quantité d'énergie requise.

Le recours à des entraînements dotés d'accumulateurs d'énergie et de piles à combustible a ainsi été étudié.

Par ailleurs, les technologies peuvent très souvent être combinées: les véhicules ambimoteurs (entraînement électrique et thermique) pourront par exemple, dans le futur, être aussi équipés d'un accumulateur d'énergie qui remplacera intégralement le moteur diesel. Voici un récapitulatif des caractéristiques d'application et des recommandations qui en découlent:

Application prévue	Caractéristiques d'application	Recommandation
Service des travaux (p. ex. Tm 234)	<ul style="list-style-type: none"> • Exploitation indépendante de la ligne de contact • Peu d'heures de service • Exigences de puissance majoritairement faibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Entraînement thermique à conserver et à associer à un système multi-moteur et à une fonction «start and stop» • À long terme: utilisation de piles à combustible
Service de la manœuvre (p. ex. Am 843)	<ul style="list-style-type: none"> • Selon le lieu d'intervention, exigences de puissance parfois élevées (thermique et électrique) • Diverses applications à l'avenir 	<ul style="list-style-type: none"> • À court terme: véhicules ambimoteurs et fonction «start and stop» pour le moteur diesel • À long terme: association ligne de contact/accumulateur d'énergie, essai de l'accumulateur d'énergie recommandé sur les véhicules aux classes de puissance plutôt faibles
Trafic par wagons complets isolés (p. ex. Eem 923)	<ul style="list-style-type: none"> • Part sans fil de contact faible • Beaucoup d'heures de service • Exigences de puissance faibles (thermique) 	<ul style="list-style-type: none"> • À court terme: véhicules ambimoteurs tout à fait adaptés • À long terme: batterie de traction en remplacement du moteur diesel
Intervention (p. ex. train d'extinction et de sauvetage 08)	<ul style="list-style-type: none"> • Applications des plus variées • Technique très complexe 	<ul style="list-style-type: none"> • Ajout d'une transmission hydromécanique pour augmenter le degré d'efficacité • Fonction «start and stop» pour les moteurs diesel actuellement utilisés

Le recours au gaz et aux biocarburants doit être envisagé comme mesure à court ou moyen terme sur tous les types de véhicules, afin non seulement de limiter les coûts liés à l'énergie, mais aussi de réduire les émissions de CO₂.

Toutefois, il faut aussi tenir compte des modifications à réaliser sur les véhicules et des infrastructures supplémentaires nécessaires à l'alimentation en carburants à l'état gazeux ou liquide.

De manière générale, il convient d'électrifier les véhicules dans la mesure du possible, ce qui permet de réduire largement les coûts et les émissions, notamment en raison de la part croissante des énergies renouvelables dans le courant de traction des CFF.

En cas d'utilisation de piles à combustible dans le cadre d'une exploitation indépendante de la ligne de contact, il faut noter que l'augmentation du degré d'efficacité de l'entraînement et la diminution des émissions directes peuvent toutefois s'accompagner d'une aggravation des émissions indirectes liées à l'apport, au transport et au stockage de l'hydrogène, selon le type de production.

Executive Summary

Although SBB has a fully electrified network, vehicles that can run via the overhead power line independently of the power supply will also be required to ensure that the heavily used infrastructure can be operated and maintained in future.

Previously, the vehicles procured for this purpose have always been diesel-powered. Due to the fact that these locomotives usually also run on electrified sections of track, dual-powered vehicles (with an electric and thermal drive system) are also becoming increasingly prevalent.

However, there are still certain types of rolling stock for which this concept does not appear to be feasible for technical, operational and – in particular – financial reasons.

SBB, in collaboration with the Institute of Vehicle Concepts at the German Aerospace Centre (DLR), used this preliminary study funded by the Federal Office of Transport (FOT) to investigate the possibility of using alternative drive concepts in future for the purposes listed below, with the aim of reducing energy consumption and the associated emissions:

- Construction traffic
- Shunting service (disassembling and re-assembling trains)
- Wagonload traffic (for SBB Cargo)
- Intervention (by the SBB internal fire-fighting and rescue service)

Based on the existing rolling stock and its operational concepts, DLR analysed the potential of established and future drive technologies, as well as those under development, for a time period up to 2020. The technologies examined essentially offer two possible courses of action:

Improving the energy efficiency of existing drive concepts

Various conditions make it impossible to dispense with diesel engines completely. In this case, the existing concept must be optimised as far as possible. This can be done by using alternative fuels, using several smaller engines or hybrid drive systems and introducing a start/stop function.

Replacing the diesel drive system with alternative drive technologies

If conventional diesel engines are replaced, the biggest hurdle standing in the way of using alternative drive systems is the problem of conveying and/or storing the amount of energy required.

The use of drive systems based on energy storage or fuel cells has been investigated in this regard.

Most technologies can also be combined, which means that the dual-powered (electric/thermal) system, for example, could be developed into a dual-powered drive system with energy storage in future and diesel engines could be dispensed with completely (replaced with energy storage systems).

The table below provides a bullet point summary of the usage characteristics and the recommendations based on this.

Purpose	Usage characteristics	Recommendation
Construction service (e.g. Tm 234)	<ul style="list-style-type: none"> • Operation independent of overhead power line • Low number of operating hours • Mostly low power requirements 	<ul style="list-style-type: none"> • Carry on using thermal drive system with multi-engine concept, including start/stop function • Long-term: use fuel cell
Shunting service (e.g. Am 843)	<ul style="list-style-type: none"> • High power requirement (thermal and electric) depending on the place of use • Wide range of uses in future 	<ul style="list-style-type: none"> • Short-term: dual-powered drive system and start/stop function for diesel engines • Long-term: combination of overhead power line/energy storage, testing of energy storage system on vehicles with a low engine-power class recommended
Wagonload traffic (e.g. Eem 923)	<ul style="list-style-type: none"> • Small proportion without contact wire • High number of operating hours • Low thermal power requirements 	<ul style="list-style-type: none"> • Short-term: dual-powered drive system is ideal for this • Long-term: use traction battery instead of diesel engine
Intervention (e.g. LRZ 08 fire-fighting and rescue train)	<ul style="list-style-type: none"> • Wide range of uses • Extremely technically complex vehicles 	<ul style="list-style-type: none"> • Add hydromechanical transmission to improve efficiency • Start/stop function for existing diesel engines

As a short- to medium-term measure, checks are to be carried out on all vehicle types to ascertain whether gas and biofuel can be used. In addition to bringing down energy costs, this is intended to reduce the level of CO₂ emissions.

However, vehicle modifications and the additional infrastructure required for filling up vehicles with gaseous or liquid fuels must be taken into consideration.

In general, it is important to electrify the vehicles as far as possible. The increasing use of renewable energies to power SBB rail operations is a key factor in significantly reducing costs and emissions.

With regard to the use of fuel cells for operations running independently of the overhead power line, it is worth noting that, as well as improving the efficiency of the actual drive system and avoiding direct emissions, the level of indirect emissions resulting from producing, transporting and storing hydrogen could also be reduced depending on the production methods used.

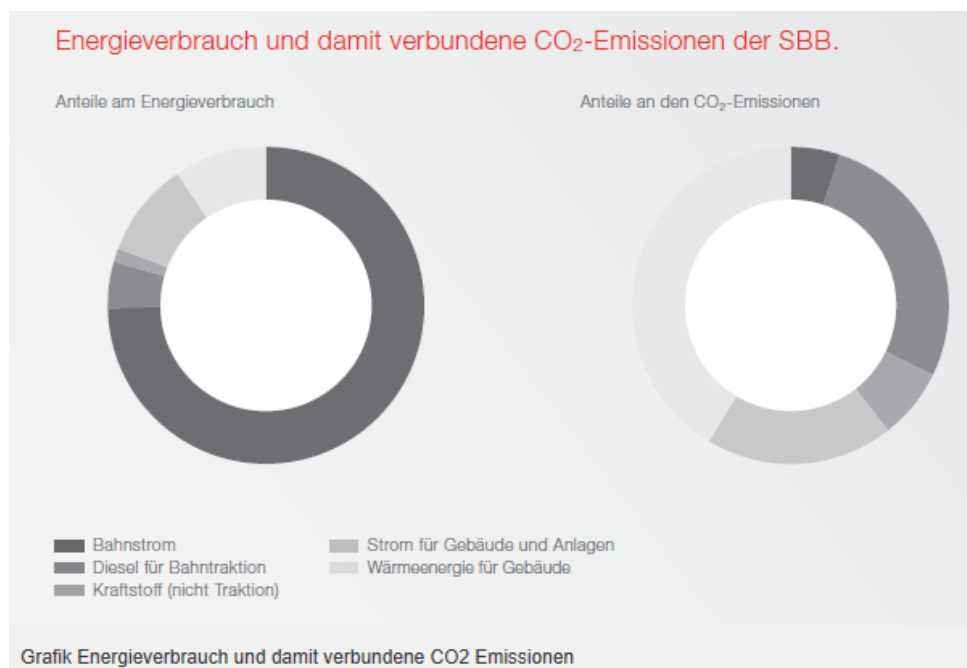
Zusammenfassung

Mit der Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050) durch das Bundesamt für Verkehr (BAV) und der SBB Energiestrategie werden die Ziele der Energiestrategie 2050 des Bundes auf den öV übertragen.

Im Rahmen dieser Zusammenarbeit unterstützt das BAV die SBB bei der Erarbeitung vorliegender Vorstudie „alternative Antriebskonzepte für Rangier- und Baufahrzeuge“. Die Projektleitung erfolgte durch den Bereich Energiemanagement bei SBB Infrastruktur.

Ausgangslage

Bereits heute deckt die SBB rund 90 Prozent ihres Bahnstrombedarfs mit klimafreundlicher Wasserkraft ab. Die grössten Hebel zur Reduktion der CO₂-Emissionen liegen deshalb nicht beim Bahnbetrieb, sondern beim Brennstoffverbrauch von Gebäuden sowie beim Treibstoffverbrauch von Strassen- und Rangierfahrzeugen.



Um den Treibstoffkonsum und damit auch die Emissionen der dieselpbetriebenen Fahrzeuge zu reduzieren setzt die SBB vorläufig auf 2-Kraft-Fahrzeuge und auf die Schulung des Lokpersonals in der „Energiesparenden Fahrweise“.

Obwohl das Fahrverhalten der Triebfahrzeugführenden einen grossen Einfluss auf den Verbrauch des Rollmaterials hat, ist die Auslegung der Fahrzeuge für einen effizienten Einsatz massgebend für die Lebenszykluskosten und die darin enthaltenen Energiekosten.

Mit dieser Vorstudie wird aufgezeigt, welche Technologien bei zukünftigen Rollmaterialbeschaffungen berücksichtigt werden können/sollen um den Dieserverbrauch ganz oder teilweise zu substituieren. Wo möglich werden die Empfehlungen mit einer ersten wirtschaftlichen Betrachtung ergänzt. Abschliessend erfolgen Vorschläge zur weiteren Ausarbeitung der vielversprechendsten Ansätze.

Aus den beschriebenen Lösungen lassen sich teilweise auch Optimierungsmassnahmen für die bestehende Flotte der SBB ableiten. Diese werden bezogen auf typische Fahrzeuge für den jeweiligen Einsatzzweck aufgeführt und auf Grund von Betriebsdaten auf deren Kosten/Nutzen überprüft.

Untersuchungsmethode/ Vorgehen

In einem ersten Schritt sind die Haupteinsatzgebiete der dieselbetriebenen Flotte durch die SBB definiert worden. Diesen ist jeweils ein Fahrzeugtyp mit relevantem Anteil an der Produktionsleistung aus der Bestandsflotte zugeteilt worden. Die Unterteilung wurde für die abschliessende Bewertung der eruierten alternativer Antriebstechnologien durch das DLR übernommen:

- Baudienst Tm 234
- Rangierverkehr Am 843
- Einzelwagenladungsverkehr Eem 923
- Lösch- und Rettungsdienst Lösch- und Rettungszug 08

Die technische Auslegung dieser Fahrzeuge diente dem DLR ebenfalls zur Abschätzung möglicher Anpassungen an den bestehenden Flotten. Massgebend sind dafür insbesondere die Einschränkungen bezüglich Masse (Achslasten) und Volumen einzelner Baugruppen.

Die SBB stellte weiter Betriebsdaten der definierten Fahrzeugtypen für die jeweiligen Einsatzzwecke zur Verfügung. Diese wurden durch das DLR hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften und Energieverbräuche analysiert. Auf Grund unterschiedlicher Fahrzeuggenerationen und deren Ausrüstung bezogen auf die Datenerfassung ist die Datenbasis nicht für alle Typen auf vergleichbarem Niveau. Für die Vertiefung ausgewählter Technologien weist das DLR daher in den weitergehenden Empfehlungen auf die Notwendigkeit detaillierter Messungen hin.

In einem nächsten Schritt beschreibt das DLR den Stand der Technik von Energiespeicher und Energiewandler und zeigt zukünftige Entwicklungsschritte auf. Diese Auflistung erfolgt unabhängig von den definierten Fahrzeugkonzepten. Die Überleitung zur Fahrzeugintegration erfolgt anschliessend mit der daraus abgeleiteten Beschreibung alternativer Antriebskonzepte welche mögliche Anwendungsfälle und deren Funktionsweise im Detail erläutert.

Ergebnisse

Für alle eruierten Technologien (auch Technologiekombinationen) wurde abschliessend geprüft in wieweit sie auf der bestehenden Flotte und bei Neufahrzeugen angewendet werden können und welche Kosten/Nutzen-Effekte zu erwarten sind.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Fahrzeuge sowie der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit sind die Optimierungsansätze für den jeweiligen Einsatz definiert worden.

Das Betriebskonzept für den Bereich der **Bau- und Instandhaltungstätigkeiten** sieht auch zukünftig den Einsatz von zweiachsigen Baudiensttraktoren mit einer Ladebrücke und entsprechendem Ladekran vor. Diese Fahrzeugauslegung begrenzt den nutzbaren Bauraum sowie die zur Verfügung stehende Masse zur Integration alternativer Antriebstechnologien massgebend. Eine 2-Kraft-Variante (thermisch/elektrisch) ist zum Beispiel auf Grund der Achslastüberschreitung nicht realisierbar. Unter diesem Aspekt ist auch mittelfristig ein Wegfall des Dieselantriebes nicht als realistisch zu betrachten.

Für Neufahrzeuge ist die Auslegung der thermischen Antriebsquelle und des Antriebsstranges auf die Betriebsmerkmale des Baudienstes bereits in der Ausschreibung zu berücksichtigen. Ein vielversprechender Ansatz ist das Mehrmotorenkonzept welches es ermöglicht nur die effektiv benötigte Leistung zur Verfügung zu stellen. Diese Technologie ist bereits serienreif und in verschiedenen Modellen bei anderen Bahnen im Einsatz.

Durch die im Vergleich zu Streckenlokomotiven geringeren Betriebsstunden lässt sich ein aufwändiger Eingriff in bestehende Fahrzeuge nicht wirtschaftlich realisieren. Die Vorstudie bestätigt einen Ansatz der SBB zur Optimierung des elektrischen Bordnetzes welche ein vermehrtes Abstellen des Dieselmotors ermöglichen soll.

Die schweren **Rangierfahrzeuge** der SBB werden heute nicht nur in den grossen Rangierbahnhöfen eingesetzt. Vielmehr sind Allzwecklokomotiven gefordert welche auch die Beförderung schwerer Bauzüge oder die Rangiertätigkeiten ausserhalb der Rangierbahnhöfe bewältigen können. Ein fahrleitungsunabhängiger Betrieb über einen längeren Zeitraum und ohne grosse Leistungseinbusse ist somit für diese Fahrzeuge ein wichtiges Kriterium.

Die Vorstudie empfiehlt auch für diese Einsatzzweck den Ansatz der Mehrmotoren um die Betriebszeiten mit reduziertem Leistungsbedarf bis max. 250 kW (ca. 1/3 der gesamten Betriebszeit) mit nur einem aktiven Verbrennungsmotor abzudecken. Weiter lässt sich hierfür der Diesel- mit einem Elektroantrieb über die Fahrleitung kombinieren. Unter der Annahme, dass die Fahrzeuge vermehrt auch auf den elektrifizierten Hauptstrecken zum Einsatz kommen, lassen sich je nach Anteil des Fahrleitungsbetriebes Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus von rund 1,2 Mio. CHF (bei 30%

FL-Betrieb), 2,5 Mio. CHF (bei 60% FL-Betrieb) resp. 3,8 Mio. CHF (bei 90% FL-Betrieb) erzielen. Eine Steigerung des Potenzials lässt sich längerfristig durch den kompletten Ersatz der thermischen Antriebseinheiten durch einen Energiespeicher realisieren (rund 4,2 Mio. CHF ohne Berücksichtigung eines Batterieersatzes). Grosse Unsicherheiten bestehen aber noch bei der Auslegung und den Tauschintervallen der Traktionsbatterie. Auf der bestehenden Flotte sind, wie bereits beim Baudienstfahrzeug, die technischen und wirtschaftlichen Hürden zu gross um nur aus Gründen der Energieeffizienz grosse Änderungen an der Am 843 vornehmen zu können.

Mit der Inbetriebnahme des neuen 2-Kraft-Fahrzeuges des Typs Eem 923 für den **Einzelwagenladungsverkehr** von SBB Cargo ist die konsequente Nutzung des Bahnstroms auf allen Hauptstrecken sichergestellt. In den Bereichen ohne Fahrleitung, welche nur mit reduzierten Geschwindigkeiten befahren werden, wird das Fahrzeug von einem kleiner dimensionierten Dieselgenerator mit Energie versorgt. Auch dieser Einsatzzweck bietet sich für den Ersatz des Dieselmotors durch einen Energiespeicher an. Die Masse- und Bauraumrestriktionen können nur unter Verwendung von NMC-Batterien eingehalten werden. Durch den grossen Anteil an Fahrten auf den elektrifizierten Hauptstrecken kann der Energiespeicher immer wieder aufgeladen werden und entsprechend klein dimensioniert werden. Erste Berechnungen gehen von reduzierten Energiekosten in der Höhe von rund 0,5 Mio. CHF über die Lebensdauer von 30 Jahren aus. Zu berücksichtigen sind die Unsicherheiten bezüglich Auslegung und Tauschintervallen des Energiespeichers.

Bei den **Lösch- und Rettungszügen** welche aus mehreren selbstfahrenden, unabhängigen Modulen bestehen, ist eine umfangreiche Optimierung nur aus Energiespargründen ebenfalls nicht als realistisch zu betrachten. Ein möglicher Ansatz besteht darin, das hydrodynamische durch ein hydromechanisches Getriebe zu ersetzen. Dadurch wird eine Effizienzsteigerung über den Geschwindigkeitsbereichen (inkl. Bremsvorgang) realisiert. Sowohl für bestehende wie auch für neu zu beschaffende Fahrzeuge müsste eine detaillierte Analyse der Einsatzfälle durchgeführt werden um die technische Auslegung und das Energiesparpotenzial eines solchen Umbaus zu definieren.

Bei allen Fahrzeugkonzepten welche nicht für den Fahrleitungsbetrieb geeignet sind, ist der Brennstoffzellenantrieb langfristig die einzige Antriebstechnologie welche einen autarken Betrieb (und zwischenzeitlicher Betankungsmöglichkeit) gewährleisten kann. Vorteile dieser Lösung sind die Vermeidung direkter Emissionen sowie die Reduktion der Energiekosten. Betrachtet werden müssen insbesondere die indirekten Emissionen der Vorkette (Gewinnung/ Speicherung/ Transport), der Aufwand für die Betankungsinfrastruktur sowie ggf. die sicherheitstechnischen Belangen wenn die Technologie unter erschwerten Bedingungen (z.B. in einem Lösch- und Rettungszug) zum Einsatz kommt.

Für alle Antriebskonzepte bei welchen kurz- bis mittelfristig kein kompletter Wegfall des Dieselantriebs erfolgen kann, ist die Verwendung alternativer Kraftstoffe zu prüfen. Insbesondere die Zumischung von Biodiesel verspricht eine Reduktion der Well-to-Whell Emissionen (vom Bohrloch bis zum Rad = über die gesamte Wertschöpfungskette). Zu beachten sind notwendige technische Anpassungen an den Motoren und den Tankeinrichtungen (Biodiesel greift Kunststoffe und gewisse Gummisorten an wodurch Dichtungen, Schläuche, usw. beschädigt werden). Auf Grund der geringeren Energiedichte steigt zudem der Verbrauch um max. 10% an (bei der Verwendung von reinem Biodiesel B100).

Durch den Nachweis der positiven ökologischen Gesamtbilanz inkl. der Vorkette besteht gemäss der Treibstoffökobilanz-Verordnung (TrÖbiV) zudem die Möglichkeit eine Reduzierung oder ein Entfall der Mineralölsteuer bei Einsatz von Kraftstoffen aus erneuerbaren Rohstoffen zu erzielen.

Fazit

Die Vorstudie des DLR ermöglicht einen umfangreichen Überblick über alternative Technologien zur teilweisen oder kompletten Reduktion des Dieserverbrauchs. Die Analysen zu möglichen Anwendungen auf der Flotte der SBB haben aber auch die Grenzen einzelner Technologien aufgezeigt, wie zum Beispiel die Nutzung der Bremsenergie in verschiedenen Speichervarianten oder die Verwendung der Abgaswärme.

Abgeleitet auf die Entwicklung der Flotten im Rangier-, Bau und Interventionsbereich ergeben sich folgende Anwendungsbereiche für die Erkenntnisse aus der Vorstudie:

- **Optimierung Baudiensttraktor Tm 234**
Der bereits eingeschlagene Weg zur geringfügigen Optimierung der Bordnetzversorgung wird von der Studie bestätigt. Durch den bereits gestarteten Pilotbetrieb auf zwei Fahrzeugen wird der Wirkungsnachweis aktuell erbracht um 2015 über die Umsetzung der Massnahme auf der gesamten Flotte entscheiden zu können.
- **Refit Programm Am 843**
Für die Modernisierung des Fahrzeuges werden aktuell verschiedene Lösungsansätze von der aufwändigen Instandsetzung bis zum mehrheitlichen Neuaufbau ausgearbeitet. Die Resultate der Studie können somit in die Auswahl und Bewertung möglicher Varianten zur Verbesserung der Energieeffizienz einschliessen. Insbesondere die Entwicklung der Lebenszykluskosten auf Grund reduzierter Treibstoffverbräuche ist für die Flottenverantwortlichen von grossem Nutzen.
- **Beschaffungsprojekt Rangier- und Streckenlok & Baudiensttraktor**
Die aktuell laufenden Beschaffungen von SBB Infrastruktur wurde in Anlehnung an den Beschaffungsstandard TecRec 100_001 (internationaler Standard zur Beschaffung von energieeffizientem Rollmaterial) vorbereitet und durchgeführt.

Die Resultate der Vorstudie können nun mit den vorgelegten Konzepten verglichen werden und der Einfluss auf die Lebenszykluskosten, welcher ebenfalls für die Bewertung der Angebote relevant ist, ermittelt werden.

- **Erneuerung Flotte Lösch- und Rettungszüge**
Für zukünftige Modernisierungen oder die Beschaffung neuer Züge müssen die Ansätze zur Optimierung der Interventionsfahrzeuge mittels detaillierter Messungen (Erhebung von Betriebsdaten) weiter ausgearbeitet und bewertet werden.
- **Optimierung/ Neubeschaffung Eem 923**
Eine Modernisierung der bis Ende 2013 in Betrieb gestellten Flotte ist momentan noch nicht absehbar. Trotzdem bietet sich mittelfristig die Erprobung der empfohlenen 2-Kraft-Variante mit einem elektrischen Antrieb, der sowohl die Fahrleitung wie auch einen Energiespeicher für das Befahren versorgungsfreier Gleisabschnitte nutzt, mit dieser Fahrzeuggeneration an.
Eine Aufnahme solcher Piloterprobungen müsste ungefähr 5 Jahre vor einer möglichen Neubeschaffung oder Erneuerung der Flotte in Angriff genommen werden (falls von Seiten der Hersteller keine Fahrzeuge zur Serienreife gebracht worden sind).
- **Strategie „Alternative Kraftstoffe“**
An der Nutzung von Treibstoffen innerhalb der SBB sind verschiedenste Stellen beteiligt/ interessiert/ betroffen. Zudem verkauft die SBB mit den eigenen Tankanlagen auch Diesel an Dritte oder kauft Diesel bei Tankanlagen von Dritten. SBB Energiemanagement sieht sich bei der möglichen Umsetzung einer Strategie zum Einsatz alternativer Kraftstoffe in der Rolle als „Befähiger“. Die in der Vorstudie ermittelten Resultate bietet nun eine Diskussionsgrundlage auf deren Basis das Thema weiterverfolgt werden kann.

Mittels der Vorstudie konnten die nachfolgenden Punkte als Klärungsbedarf identifiziert werden:

- die Verwendbarkeit/Zulassungsfähigkeit der Treibstoffe für die bestehende Flotte und die ggf. nötigen Anpassungen an den Fahrzeugen.
- die Integration der Anforderungen in den Beschaffungsprozess von Neufahrzeugen.
- die Einflüsse auf die Unterhaltskosten der Flotte.
- die Verwendbarkeit der Treibstoffe in den Tankanlagen.
- das Potenzial bezogen auf Reduktion der Kosten und Emissionen.
- die Anforderungen beim Bezug Dritter/ beim Bezug bei Dritten.

Die Aufnahme eines konzernweiten Projekts zur detaillierten Klärung möglicher Vorteile sowie zur allfälligen Realisierung und Umsetzung einer Anpassung der Treibstoffstrategie ist somit zu prüfen.

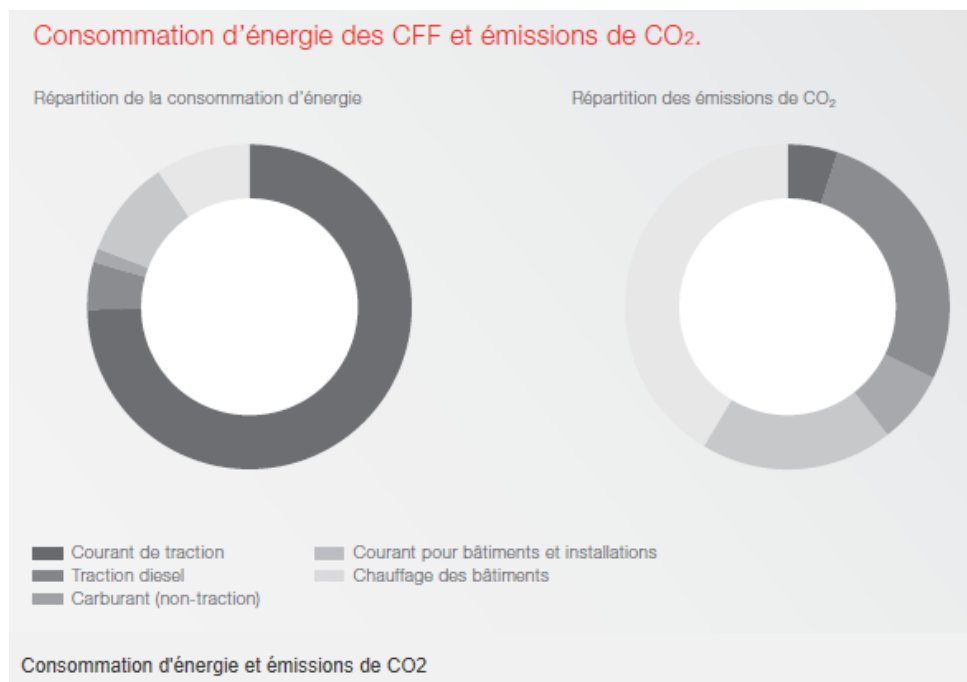
Synthèse

La mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050) par l'Office fédéral des transports (OFT) et de la stratégie énergétique des CFF permet de transposer les objectifs de la stratégie énergétique 2050 de la Confédération aux transports publics.

Dans le cadre de cette collaboration, l'OFT soutient les CFF dans l'élaboration de la présente étude préliminaire consacrée aux concepts d'entraînement alternatifs pour les véhicules des services de travaux et de la manœuvre. L'unité Gestion de l'énergie de CFF Infrastructure a assuré la direction du projet.

Situation initiale

Les CFF couvrent d'ores et déjà près de 90% de leurs besoins en courant de traction à l'aide de l'énergie hydraulique, respectueuse du climat. Par conséquent, le principal axe de réduction des émissions de CO₂ ne réside pas dans l'exploitation ferroviaire, mais dans la consommation en combustible des bâtiments et en carburant des véhicules routiers et de manœuvre.



Afin de réduire la consommation de carburant et, partant, les émissions des véhicules diesel, les CFF investissent pour l'heure dans les véhicules ambimoteurs et la formation du personnel des locs à une conduite propre à économiser l'énergie.

Si le mode de conduite des conducteurs de véhicules moteurs exerce une influence considérable sur la consommation du matériel roulant, la conception des véhicules visant une utilisation efficace sur le plan énergétique est décisive pour limiter les coûts liés au cycle de vie et, ainsi, les dépenses énergétiques.

La présente étude préliminaire expose les technologies qui peuvent/devraient être envisagées dans le cadre d'acquisitions futures de matériel roulant, afin de remplacer les moteurs diesel en partie ou en intégralité. Ces recommandations sont étayées ponctuellement d'une première analyse scientifique. Pour finir, des propositions relatives au futur développement de ces méthodes très prometteuses sont formulées.

Les solutions décrites mettent également au jour certaines mesures d'optimisation du parc de véhicules des CFF. Ces mesures se rapportent à des véhicules utilisés typiquement dans le cadre d'une application précise et leur rapport coût-utilité est analysé sur la base des données d'exploitation.

Méthode d'expertise et démarche

Dans un premier temps, les CFF ont défini les principaux domaines d'application de leur parc de véhicules diesel. Un type de véhicule issu du parc actuel et représentant une part significative de la production a été attribué à chacun de ces domaines. La répartition suivante a été reprise par le DLR dans le cadre de l'évaluation finale des technologies d'entraînement alternatives examinées:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| • Service des travaux | Tm 234 |
| • Service de la manœuvre | Am 843 |
| • Trafic par wagons complets isolés | Eem 923 |
| • Service d'extinction et de sauvetage | Train d'extinction et de sauvetage 08 |

La conception technique de ces véhicules a également permis au DLR d'évaluer diverses modifications des parcs de véhicules existants, tout en tenant notamment compte des restrictions en termes de poids (charges par essieu) et de volume de certains blocs fonctionnels.

Ensuite, les CFF ont fourni les données d'exploitation des types de véhicules définis dans le cadre des applications susmentionnées. Le DLR a alors analysé ces informations, en particulier les propriétés caractéristiques et les consommations énergétiques propres à chaque type de véhicule.

Le volume des données saisies peut cependant varier selon le type de véhicules, en raison des diverses générations de véhicules en service et de leurs différences en matière d'équipement. Par conséquent, le DLR précise, dans les recommandations complémentaires, que des mesures plus détaillées s'imposent pour approfondir les technologies sélectionnées.

Dans un second temps, le DLR décrit l'état de la technique des accumulateurs et convertisseurs d'énergie et expose les futures étapes de développement. Cette présentation est indépendante des concepts de véhicules définis.

Enfin, la transition avec l'intégration des technologies aux véhicules est réalisée par la description des concepts d'entraînement alternatifs, dans laquelle les cas d'application et leur fonctionnement sont expliqués de façon détaillée.

Résultats

La compatibilité des technologies (y compris des associations de diverses technologies) avec le parc des véhicules existants et des véhicules neufs ainsi que le rapport coût-utilité à escompter ont été systématiquement examinés.

Les méthodes d'optimisation ont été définies pour chaque application en tenant compte des exigences imposées aux véhicules et de la faisabilité technique et économique.

Le concept d'exploitation pour les **activités de construction et de maintenance** prévoit également, à terme, le recours à des tracteurs du service des travaux à deux essieux équipés d'un pont de chargement et d'une grue. Un tel équipement limite considérablement l'espace de construction utilisable ainsi que le poids disponible pour intégrer des technologies d'entraînement alternatives. Une variante ambimoteur (thermique et électrique) n'est par exemple pas réalisable, car elle impliquerait le dépassement de la charge par essieu. Ainsi, la suppression des moteurs diesel est jugée impossible, même à moyen terme.

Concernant les véhicules neufs, il faut tenir compte, dès la mise au concours, de la compatibilité de la source de motorisation thermique et de la chaîne d'entraînement avec les caractéristiques d'exploitation du service des travaux. Le concept multi-moteur, qui permet de ne fournir que la puissance effectivement nécessaire, est très prometteur. Cette technologie peut déjà être produite en série et se retrouve dans différents modèles utilisés par d'autres chemins de fer.

Le nombre d'heures d'exploitation de ces véhicules étant moins important que celui des locomotives de ligne, une modification étendue du parc existant ne serait pas rentable. L'étude préliminaire va dans le même sens que l'approche des CFF visant à optimiser le réseau électrique de distribution de bord afin de couper davantage le moteur diesel.

Actuellement, les **véhicules de manœuvre** lourds des CFF ne sont pas seulement utilisés dans les grandes gares de triage. La tendance est davantage à des locomotives polyvalentes capables d'acheminer de lourds trains de chantier ou d'accomplir des activités de manœuvre en dehors des gares de triage. Il est donc essentiel que ces véhicules puissent fonctionner indépendamment de la ligne de contact pendant une période prolongée et sans perte de puissance.

Pour cette application aussi, l'étude préliminaire recommande le recours à une technologie multi-moteur, afin de couvrir les heures d'exploitation présentant des besoins en puissance réduits de 250 kW maximum (soit près d'un tiers du total des heures d'exploitation) au moyen d'un seul moteur de combustion actif.

De plus, la motorisation diesel peut être associée à un entraînement électrique via la ligne de contact. À supposer que les véhicules puissent être de plus en plus utilisés sur les lignes principales électrifiées, on pourrait ainsi, selon la part d'exploitation via la ligne de contact, réaliser des économies sur le cycle de vie complet de près de CHF 1,2 million (en cas d'exploitation à 30% via la LC), de CHF 2,5 millions (en cas d'exploitation à 60% via la LC) ou de CHF 3,8 millions (en cas d'exploitation à 90% via la LC). Ce potentiel d'économies peut être accru à plus long terme via le remplacement intégral des unités d'entraînement thermiques par des accumulateurs d'énergie (env. CHF 4,2 millions sans tenir compte du remplacement des batteries). D'importants doutes subsistent toutefois quant à la conception et aux intervalles de remplacement des batteries de traction. Comme pour les véhicules du service des travaux, les obstacles techniques et économiques que présente l'actuel parc d'Am 842 sont trop importants pour que des modifications majeures puissent être réalisées sur ces véhicules uniquement afin d'améliorer leur efficacité énergétique.

La mise en service du nouveau véhicule ambimoteur de type Eem 923 pour le **trafic par wagons complets isolés** de CFF Cargo garantit l'utilisation systématique du courant de traction sur toutes les lignes principales. Dans les zones sans ligne de contact, qui ne peuvent être franchies qu'à vitesse réduite, le véhicule est alimenté en énergie via un générateur diesel compact.

Cette application se prête au remplacement du moteur diesel par un accumulateur d'énergie. Les restrictions en termes de poids et d'espace de construction ne peuvent être respectées qu'en cas d'utilisation de batteries NMC. Vu le grand nombre de trajets réalisés sur les lignes principales électrifiées, l'accumulateur d'énergie peut se recharger en continu et, ainsi, être de taille réduite. Selon de premières estimations, les coûts énergétiques pourraient donc baisser de CHF 0,5 million sur une durée de vie de 30 ans. Il faut toutefois noter certaines incertitudes quant à la conception et aux intervalles de remplacement de l'accumulateur d'énergie.

Pour ce qui est des **trains d'extinction et de sauvetage**, composés de plusieurs modules autonomes et indépendants, une optimisation complète ne semble, là encore, pas réaliste dans un simple objectif d'économie d'énergie. Il pourrait être utile de remplacer la transmission hydrodynamique par une version hydromécanique, afin d'augmenter l'efficacité énergétique des véhicules dans toutes les plages de vitesse (y compris lors du freinage). Une analyse détaillée de chaque cas d'application devrait être menée pour les véhicules existants comme pour les véhicules à acquérir afin de définir la conception technique et le potentiel d'économie d'énergie d'une telle transformation.

Pour tous les concepts de véhicules non compatibles avec une exploitation via la ligne de contact, un entraînement par pile à combustible se révèle être, à long terme, la seule technologie capable de garantir une exploitation autonome (et une possibilité d'alimentation intermédiaire). Les avantages de cette solution résident dans l'absence d'émissions directes et la réduction des coûts énergétiques. Il faut notamment tenir compte des émissions indirectes en amont (production, stockage et transport), des coûts liés à l'infrastructure d'alimentation et, le cas échéant, des aspects sécuritaires si la technologie doit être utilisée dans des conditions difficiles (p. ex. dans un train d'extinction et de sauvetage).

L'utilisation de carburants alternatifs doit être envisagée pour tous les concepts d'entraînement qui ne permettent pas une suppression complète de la motorisation diesel à court et moyen terme. L'adjonction de biodiesel promet notamment une réduction des émissions dites «well-to-whell» (du puits à la roue, c'est-à-dire tout au long de la chaîne de création de valeur).

Il convient de tenir compte des modifications techniques nécessaires des moteurs et installations d'alimentation (le biodiesel attaque le plastique et certaines sortes de caoutchouc, d'où l'endommagement éventuel de joints, tuyaux, etc.). Vu la faible densité énergétique, la consommation augmente en outre de maximum 10% (en cas d'utilisation de carburant 100% biodiesel, B100).

Étant donné la preuve du bilan écologique global positif (y compris en amont), il est en outre possible, en vertu de l'Ordonnance sur l'écobilan des carburants (OEcoBiC), de réduire ou de supprimer l'imposition sur les huiles minérales en cas d'utilisation de carburants à base de matériaux renouvelables.

Bilan

L'étude préliminaire du DLR offre une vue d'ensemble complète des technologies alternatives permettant de réduire partiellement ou intégralement la consommation de diesel. Les analyses relatives aux applications possibles sur le parc de véhicules des CFF ont également mis au jour les limites de chaque technologie, comme l'utilisation de l'énergie de freinage dans diverses variantes d'accumulation ou celle de la chaleur des gaz de combustion.

Étant donné l'évolution des parcs de véhicules dans les domaines de la manœuvre, des travaux et de l'intervention, les domaines d'application suivants ont été identifiés:

- **Optimisation du tracteur du service des travaux Tm 234**

L'étude confirme l'intérêt des mesures déjà engagées en vue d'optimiser légèrement l'alimentation du réseau de distribution de bord. L'exploitation pilote déjà lancée sur deux véhicules fournit la preuve de l'efficacité de cette méthode afin de pouvoir prendre une décision en 2015 quant à sa mise en œuvre sur tout le parc de véhicules.

- **Programme de refit des Am 843**

Diverses solutions de modernisation des véhicules, d'une remise en état coûteuse à la production de nouveaux modèles, sont en cours d'élaboration. Les résultats de l'étude peuvent donc être intégrés au choix et à l'évaluation de méthodes visant l'amélioration de l'efficacité énergétique. Le développement des coûts liés au cycle de vie suite à une réduction de la consommation de carburant est notamment d'une grande utilité pour les responsables du parc de véhicules.

- **Projet d'acquisition de locomotives de manœuvre et de ligne ainsi que de tracteurs du service des travaux**

Les achats actuellement réalisés par CFF Infrastructure ont été préparés et engagés en vertu de la norme d'acquisition TecRec 100_001 (norme internationale d'acquisition de matériel roulant efficace sur le plan énergétique). Il est désormais possible de comparer les résultats de l'étude préliminaire aux concepts présentés et de chiffrer l'influence sur les coûts liés au cycle de vie, critère également pertinent pour évaluer les offres.

- **Renouvellement du parc de trains d'extinction et de sauvetage**

Les solutions d'optimisation des véhicules d'intervention doivent être approfondies et évaluées à l'aide de mesures détaillées (recensement de données d'exploitation) en vue de moderniser ultérieurement le parc existant ou d'acquies de nouveaux trains.

- **Optimisation/acquisition d'Eem 923**

La modernisation du parc mis en service jusqu'à fin 2013 n'est pour l'instant pas envisagée. Néanmoins, la variante ambimoteur recommandée, avec un entraînement électrique utilisant à la fois la ligne de contact et un accumulateur d'énergie pour franchir des tronçons de voie non alimentés, peut être testée avec cette génération de véhicules à moyen terme.

Le lancement de tels essais pilotes devrait intervenir environ cinq ans avant toute nouvelle acquisition ou tout projet de rénovation du parc de véhicules (si le fabricant n'a pas produit de véhicules en série).

- **Stratégie relative aux carburants alternatifs**

Divers services sont impliqués, intéressés ou concernés par l'utilisation de carburants au sein des CFF. De plus, les CFF vendent du diesel à des tiers à l'aide de leurs propres dépôts ou en achètent à des tiers via les dépôts de ces derniers. L'unité Gestion de l'énergie des CFF fournit fait en sorte que la mise en œuvre d'une stratégie visant à utiliser des carburants alternatifs soit possible.

Les résultats obtenus à l'issue de l'étude préliminaire offrent désormais une base permettant d'approfondir ce sujet.

D'après les résultats de l'étude préliminaire, les points suivants doivent encore être analysés:

- l'aptitude à l'emploi et à l'homologation des carburants pour l'actuel parc de véhicules et les modifications éventuellement nécessaires des véhicules;
- l'intégration des exigences au processus d'acquisition de véhicules neufs;
- l'influence sur les coûts d'entretien du parc de véhicules;
- l'aptitude à l'emploi des carburants dans les dépôts de combustibles ou de carburants;
- le potentiel en termes de réduction des coûts et des émissions;
- les exigences en cas d'achats de tiers/auprès de tiers.

Le lancement, à l'échelle du groupe, d'un projet d'analyse détaillée des éventuels avantages et d'une éventuelle réalisation et mise en œuvre d'une modification de la stratégie en matière de carburants doit donc être envisagé.