



## **Mesures différenciées de l'énergie des équipements des véhicules de transports publics urbains**

Connaître et maîtriser la consommation d'énergie des éléments non dédiés à  
la traction des véhicules.

**Rapport de synthèse des résultats 2014-2015 et des pistes d'amélioration**

# Table des matières

<b><u>1</u></b>	<b><u>Introduction</u></b> .....	<b><u>5</u></b>
1.1	Contexte.....	5
1.2	Projet.....	5
1.3	Organisation.....	5
<b><u>2</u></b>	<b><u>Système de mesure</u></b> .....	<b><u>6</u></b>
2.1	Caractéristiques du véhicule équipé .....	6
2.2	Description .....	6
2.3	Installation .....	6
2.4	Programme d'analyse et de mesure 2014-2015 .....	7
<b><u>3</u></b>	<b><u>Résultats</u></b> .....	<b><u>7</u></b>
3.1	Modélisation EPFL (Février 2014 – Annexe 2) .....	7
3.2	Modélisation HSLU (Avril 2014 – Annexe 3).....	7
3.3	Mesures 2015 (Tableaux 1 et 2) .....	7
<b><u>4</u></b>	<b><u>Pistes d'amélioration</u></b> .....	<b><u>11</u></b>
4.1	<b>Inventaire</b> .....	11
4.1.1	Améliorer l' <b>isolation</b> de la caisse du véhicule (vitres, soufflet d'articulation, partie latérale du toit) .....	11
4.1.2	Diminuer les pertes d'énergie du <b>chauffage</b> .....	11
4.1.3	Améliorer le système de <b>ventilation</b> .....	11
4.1.4	Diminuer les pertes d'énergie dans la <b>résistance</b> lors du freinage.....	11
4.1.5	Pompe à chaleur air-air.....	11
4.2	<b>Gains attendus</b> .....	12
4.3	<b>Synthèse des pistes d'optimisation</b> .....	12
<b><u>5</u></b>	<b><u>Discussion et conclusion</u></b> .....	<b><u>12</u></b>
<b><u>6</u></b>	<b><u>Recommandations</u></b> .....	<b><u>13</u></b>
<b><u>7</u></b>	<b><u>Annexes</u></b> .....	<b><u>13</u></b>

## Résumé sommaire

Le trolleybus représente une composante historique importante du réseau des transports publics à Lausanne. C'est donc naturellement que les tl ont souhaité mieux comprendre comment se répartissent les consommations d'énergie sur ce type de véhicule et améliorer les connaissances dans ce domaine.

Dans le cadre des appels à idée de projets de la stratégie énergétique 2050 des transports publics, les tl ont donc proposé d'étudier la consommation d'énergie électrique des équipements d'un trolleybus non dédiés à la traction (chauffage, climatisation, etc.). Un système de mesures développé par l'Université de Bâle a été installé sur un véhicule de type Swisstrolley 4 de la flotte tl de trolleybus dans ce but. L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et la Hochschule de Lucerne (HSLU) ont complété ces mesures par des analyses plus approfondies, dont en particulier celle de l'enveloppe thermique du véhicule.

Après une année de mesures, il ressort que la consommation d'énergie électrique de ces éléments non dédiés à la traction, ainsi que les pertes dans la résistance ou dans la ligne de contact peuvent représenter jusqu'à environ la moitié de l'énergie utilisée par le trolleybus. Le chauffage en hiver représentant le poste de consommation le plus important.

Des pistes d'amélioration sont proposées sur la base des résultats, dont certaines sont testées par les tl en vue de réduire la consommation d'énergie électrique du trolleybus.

## Kurzfassung

Der Trolleybus ist ein wichtiges Element in der Geschichte des öffentlichen Verkehrs von Lausanne. Deshalb haben die tl entschieden, den Energieverbrauch dieses Fahrzeugs besser verstehen zu wollen und die Kenntnisse zu diesem Thema zu vertiefen.

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr haben die tl vorgeschlagen, den Energieverbrauch der HKL (Heizung, Kühlung, Lüftung) zu messen. Die Universität Basel hat ein Messsystem entwickelt, das auf ein Trolleybusmodell Swisstrolley 4 der tl Fahrzeugflotte installiert wurde. Das Swiss Institute of Technology in Lausanne (EPFL) und die Hochschule Luzern (HSLU) haben diese Messungen durch vertiefte Analysen, insbesondere der Wärmedämmung, vervollständigt,

Die Messungen aus einem Jahr zeigen, dass der Verbrauch durch die HKL sowie die Verluste durch Widerstand und Schienenkontakt bis zu 50% des Energiebedarfs ausmachen können. Die Heizung im Winter hat den grössten Anteil am Verbrauch.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse sind Verbesserungsvorschläge gemacht worden. Einige werden bereits vom tl geprüft, um den Stromverbrauch des Trolleybusses zu reduzieren.

## Executive Summary

The trolleybus represents historically a significant part of the public transport in Lausanne. Therefore the public transport company of Lausanne (tl) decided to seek better understanding of the energy consumption of this type of vehicle and to improve the knowledge around this topic.

Within the framework of the Energy strategy for Public Transport 2050, tl offered to analyse the energy consumption of the trolleybus's equipments not devoted to traction (heating, cooling, etc.). A measurement system developed by the university of Basel was implemented in a vehicle of the tl-fleet (model Swisstrolley 4). The Swiss Institute of Technology in Lausanne (EPFL) and the Luzern University of Applied Science and Arts (HSLU) supplied additional analysis, such as a test of the thermal wrap of the vehicle.

The measurements over a year showed that the energy consumption of the equipments not devoted to traction added to the energy loss in the resistance and the power line represent up to 50% of the energy used by the trolleybus. The heating in winter is the most important part.

Based on the results of this research, some means to improve the energy efficiency of trolleybuses have been identified, some already being tested by tl.

## Zusammenfassung der Resultate

### Modellierung EPFL (Februar 2014)

1. Heizung  
Das Heizsystem (Heizboiler und Wasserkreislauf) befindet sich an der Aussenseite des Fahrzeugs und sind wenig isoliert.
2. Lüftung  
Der Energieverbrauch der Heizung ist bei eingeschalteter Lüftung um 20-30% höher als ohne.
3. Türöffnung  
Die regelmässige Türöffnung lässt den Energieverbrauch der Heizung um lediglich 1- 4% steigen

### Modellierung HSLU (April 2014)

1. Lufterneuerung  
Die Rate der ursprünglichen Lufterneuerung ohne Lüftung von 1.4 Liter pro Stunde ist ziemlich hoch.
2. Qualität der Wärmedämmung  
Mit einem Wert U von 3.4 W/m<sup>2</sup>K ist die Wärmedämmung ziemlich niedrig.

### Massnahmen 2015

1. Hauptresultat  
Der Energieverbrauch der Heizung/Kühlung/Lüftung, der Verlust im Bremswiderstand und in der Fahrleitung bis 50% der totale Energieverbrauch ist.
2. Sonderausstattungen  
Der Energieverbrauch des Luftkompressors, der Lüftung und der Beleuchtung ist jeden Monat etwa 10%.  
Verlust im Bremswiderstand  
Wenn der Trolleybus Fahrer bremst, Energie ist der Fahrleitung benützt oder im Widerstand verliert. Weniger im Winter, weil einen Teil dieser Energie benützt ist, das Wasser des Boilers zu heizen. Im Sommer braucht der Boiler keine Energie, deshalb mehr Energie in der Fahrleitung abgeschickt ist.
3. Heizung  
Der Energieverbrauch der Heizung ist hoch, bis zum 40% der totale Energieverbrauch im Winter. An diese Periode, benützt der Trolleybus so viele Energie zu fahren als für die Heizung. Noch im Frühling ist der Energieverbrauch bis 15%.
4. Kühlung  
Der Energieverbrauch der Kühlung ist tief, bis zum 10% der totale Energieverbrauch im Sommer. Trotzdem der Sommer 2015 wärmer als der Durchschnitt der gewöhnlichen Temperaturen.

### Verbesserungsmöglichkeiten

	tl Auswahl	Nicht ausgewählt
<b>1. Wärmedämmung</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Fenster-und Wärmedämmung verbessern</li> <li>- Sonnenfilter auf die Fensterscheiben anbringen</li> <li>- Sonnengläser der letzten Generation verwenden</li> <li>- Sonnenschutzmalereien letzter Generation benutzen</li> </ul>
<b>2. Heizung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Den Durchlauf des Warmwassers am Dach abschalten (2016)</li> <li>- Der Boiler isolieren (2016)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Anzeigen von Temperatur im Steuerhaus optimieren</li> <li>- kühle Luft</li> <li>- vorheizen</li> </ul>
<b>3. Lüftung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Lüftungsgeschwindigkeit reduzieren (2016)</li> </ul>	
<b>4. Widerstand</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elektrische Hilfsmotore mit Batterien testen</li> </ul>	

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

L'Office fédéral des transports (OFT) a reçu la mission de concrétiser et de mettre en oeuvre, dans le cadre de ses compétences, le volet Transports publics de la nouvelle stratégie énergétique du Conseil fédéral. Sa tâche est de concevoir et de mener à bien la Stratégie énergétique 2050 des transports publics (SETP 2050).

L'objectif stratégique de la SETP 2050 est de faire des entreprises de transports publics des acteurs du changement. Pour ce faire, l'OFT favorise le dialogue et encourage l'innovation au travers d'études et de projets-pilote avec des entreprises de transports publics. Dans ce cadre, l'OFT a sollicité les tl en mars 2013, qui ont répondu favorablement, en proposant le projet décrit dans ce rapport. Soit l'analyse des équipements non dédiés à la traction d'un trolleybus. Le choix s'est porté sur le trolleybus, car il représente historiquement une composante importante du réseau tl, ceci depuis 1932, date de la mise en service de la première ligne. Ce qui est toujours valable aujourd'hui, puisque le trolleybus représente près de la moitié de la flotte de véhicules route des tl en 2015. Par ailleurs, il est chargé de desservir les lignes du centre-ville, les plus fréquentées du réseau.

## 1.2 Projet

Un transport public (TP) attractif passe par l'installation dans les véhicules d'équipements, qui ne sont pas nécessaires à la conduite. Ces équipements sont entre autre liés au confort thermique (chauffage et climatisation) ou à l'information des voyageurs. Ces divers éléments peuvent, selon les premières estimations, consommer jusqu'à 40 % de l'énergie dont le véhicule a besoin, en fonction de son degré d'équipement, le reste étant dédié à la traction de ce véhicule.

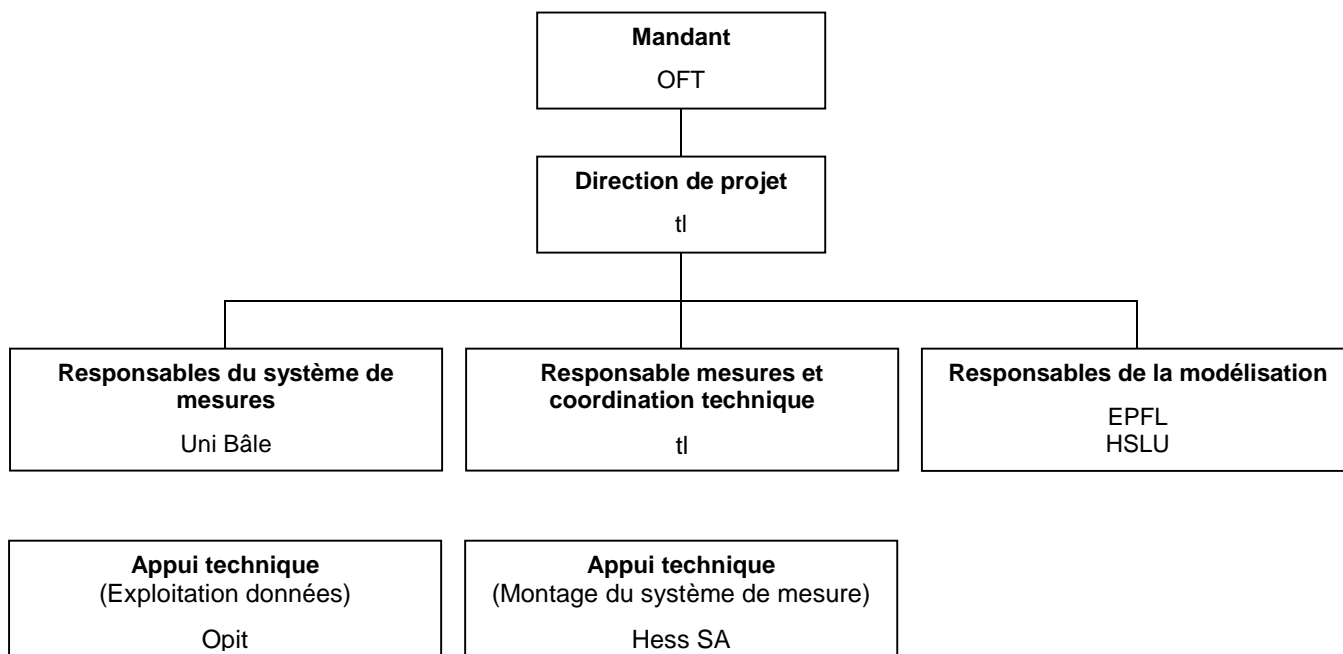
L'entreprise tl a ainsi proposé d'étudier en détail la consommation de ces éléments non dédiés à la traction (éléments non-traction), afin d'isoler les plus gros consommateurs et de proposer ensuite des pistes d'amélioration de l'efficacité énergétique ciblées.

L'étude a été menée sur un trolleybus de type « Swisstrolley 4 » du constructeur HESS. Les tl ont choisi ce véhicule, car les trolleybus représentent historiquement une composante importante du réseau tl.

**L'objectif du projet** est ainsi d'une part de mesurer, d'analyser et de référencer, afin d'améliorer les connaissances sur les consommations réelles des différents équipements d'un trolleybus, et d'autre part d'apporter les éléments nécessaires à l'élaboration de pistes d'amélioration.

## 1.3 Organisation

Les tl se sont appuyés sur des partenaires, qui les ont aidés à réaliser ces objectifs. Le constructeur HESS, ainsi que l'université de Bâle, l'EPFL et la haute école de Lucerne (HSLU) sont parties prenantes dans ce projet mandaté par l'OFT, selon l'organisation ci-dessous :



## 2 Système de mesure

### 2.1 Caractéristiques du véhicule équipé

Le système a été installé sur un trolleybus articulé du constructeur HESS SA.

Type : Swisstrolley 4

Mise en circulation en 2013

Système de traction provenant du fournisseur Vossloh Kiepe

Chauffage par échangeur huile eau alimenté en 600 DC

Deux groupes climatisations sur le toit alimentés en 400 VAC

Traction sur les essieux 2 et 3 avec chacun un moteur de 120 kW. Alimentés en 400 VAC

### 2.2 Description

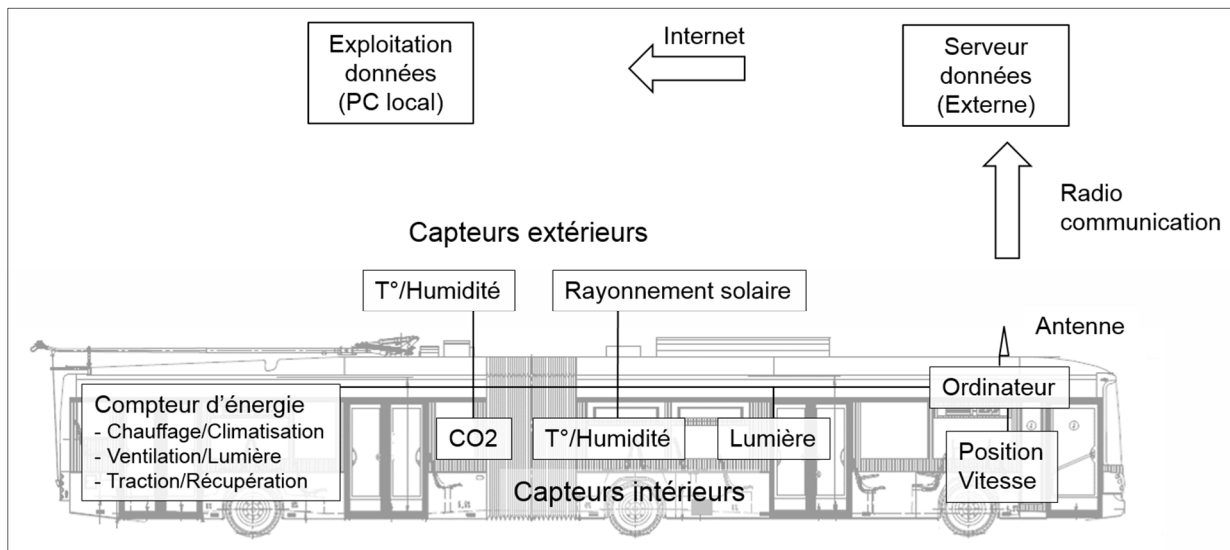
Le système installé sur le trolleybus n°871 a été développé par le département de physique de l'université de Bâle, dans le cadre d'un autre projet « Energieeffizienz von Heizung, Lüftung und Kühlung im Öffentlichen Verkehr ». Le système de mesures proposé est fiable, car déjà éprouvé sur des véhicules ferroviaires. Il est simple à installer et adaptable à différents types de véhicules. Les appareils ne prennent que peu de place, comme le montrent les photos de l'annexe 1. Aucune perturbation en cours d'exploitation n'est à relever après deux ans de fonctionnement sur le trolleybus. Il permet de mesurer les éléments listés ci-dessous :

- |   |  |  |
|---|--|--|
| • | Température/humidité                               | Intérieur (3), air frais (2), extérieur (2)      |
| • | Détecteur de gaz                                   | CO2, COV permet d'évaluer le nombre de passagers |
| • | Rayonnement solaire                                | Gauche et droite (2)                             |
| • | Position, vitesse                                  | GPS  |
| • | Etat des portes                                    | Ouvert/fermé (4 portes)                          |
| • | Energie ventilateurs d'évaporateurs (Climat 1+2)   | Mesure courant (2) et tension (2), 24V           |
| • | Energie ventilateurs de condensateurs (Climat 1+2) | Mesure courant (2) et tension (2), 24V           |
| • | Energie compresseurs (Climat 1+2)                  | Compteur d'énergie (2), 3x400V, 50Hz             |

Des appareils Vossloh-Kiepe déjà intégrés au trolleybus permettent de compléter les mesures :

- |   |   |                                |
|---|---|--------------------------------|
| • | Energie totale/Récupération/Générateur diesel   | Mesure d'énergie (3), 600V     |
| • | Energie du chauffage                            | Mesure d'énergie, 600V         |
| • | Energie des 2 moteurs                           | Energie consommée et restituée |
| • | Energie dissipée dans la résistance de freinage | Mesure d'énergie (3)           |
| • | Energie du convertisseur statique à l'entrée    | Mesure d'énergie, 600V         |
| • | Energie du réseau 24V                           | Mesure d'énergie, 24V          |

Schéma 1 : principes généraux du système de mesures, avec l'échange de données informatisées



### 2.3 Installation

Le véhicule a été arrêté trois semaines au total, afin de procéder à l'installation des équipements. La pose du câblage a pris le plus de temps. L'ensemble de l'installation a été réalisé avec l'approbation et sous supervision du constructeur. Ceci dans le but d'apporter toutes les garanties nécessaires en termes de sécurité. Les personnes

de l'Université de Bâle, qui ont développé le système, ont également participé à l'installation, apportant leur expertise et leur grande expérience. Ils ont également réalisé un gros travail en amont, afin d'adapter leur système au Swisstrolley 4, et pris en charge les tests de fonctionnement (voir Annexe I).

## 2.4 Programme d'analyse et de mesure 2014-2015

### 1. Analyse de la structure du véhicule

Impact de la ventilation et de l'ouverture des portes	EPFL	26-28.02.2014
Taux de renouvellement d'air et qualité enveloppe thermique	HSLU	22-25.04.2014

### 2. Installation des appareils de mesures

Pré-cablage sur TBA n°871	Hess	11-18.08.2014
Montage des appareils de mesure	Uni Bâle/Hess	01-12.09.2014
Mise en service du système de mesure	Uni Bâle/Hess/ Kiepe/Opit	13-17.10.2014
Stabilisation du système de mesure	Uni Bâle	Décembre 2014

### 3. Mesure des consommations d'énergie

Relevés des mesures « hiver » (période de chauffage)	Déc-février 2015
Relevés des mesures « hors saison » (référence)	Mars-mai 2015
Relevés des mesures « été » (période de climatisation)	Juin-août 2015
Relevés des mesures « hors saison » (référence)	Sept-novembre 2015

## 3 Résultats

Les résultats principaux de la modélisation et des mesures sont présentés ici. Les méthodologies utilisées et les résultats détaillés sont consultables dans les études spécifiques, référencées en fin de rapport.

### 3.1 Modélisation EPFL (Février 2014 – Annexe 2)

#### 1. Système de chauffage

Les éléments de stockage, de circulation et de chauffage de l'eau sont situés à l'extérieur du véhicule et faiblement isolés.

#### 2. Effet de la ventilation

La consommation d'énergie de chauffage d'un trolleybus avec la ventilation est plus élevée de 20-30% qu'un trolleybus sans ventilation.

#### 3. Effet de l'ouverture des portes

L'ouverture régulière des portes augmente la consommation d'énergie de chauffage du trolleybus de seulement 1-4%.

### 3.2 Modélisation HSLU (Avril 2014 – Annexe 3)

#### 1. Renouvellement d'air

Le taux de renouvellement d'air mesuré sans ventilation mécanique de 1.4 l/h est plutôt élevé.

#### 2. Qualité de l'enveloppe thermique

L'isolation thermique du TBA, dont la valeur U moyenne est de 3.4 W/m<sup>2</sup>K, est relativement faible.

### 3.3 Mesures 2015 (Tableaux 1 et 2)

Les tableaux 1 et 2 présentent les résultats des mesures effectuées durant l'année 2015. Le tableau 1 montre la proportion des différents consommateurs d'énergie du trolleybus mesurés. Le tableau 2 montre la consommation d'énergie de ces différents consommateurs du véhicule rapportée au nombre de kilomètres parcourus. Les résultats sont donnés par mois pour l'ensemble des consommateurs. La température moyenne mensuelle est également indiquée.

Le résultat principal des mesures effectuées en 2015 montre que l'énergie électrique utilisée pour la fonction première du trolleybus, soit la traction, ne dépasse pas la moitié de l'énergie totale. L'autre partie de l'énergie est

utilisée par les autres consommateurs d'énergie utiles au confort des passagers (chauffage, climatisation, éclairage, ventilation) ou sortie du système trolleybus. Cette sortie d'énergie s'effectue sous forme de perte dans la résistance ou par injection dans la ligne aérienne de contact.

Le moteur électrique a un rendement élevé, l'énergie dévolue à la traction est donc déjà optimisée. En revanche, des améliorations peuvent vraisemblablement être apportées aux autres consommateurs électriques du trolleybus (voir ch. 4 Pistes d'amélioration).

Les autres résultats des mesures effectuées en 2015 sont les suivants :

1. Accessoires

L'énergie utilisée pour alimenter les accessoires (compresseur air, éclairage et ventilation) est relativement constante au fil des mois, à environ 10%.

2. Energie de freinage, perdue dans la résistance ou réinjectée dans la ligne aérienne

Lorsque le chauffeur du trolleybus freine, l'énergie de freinage est d'abord réinjectée dans la ligne aérienne, si aucun consommateur n'est sur le secteur pour réceptionner cette énergie, elle est dissipée dans la résistance de freinage.

Cette énergie fluctue en fonction des saisons, car une partie est utilisée pour chauffer l'eau du boiler durant la saison froide. De l'énergie est perdue dans la résistance aussi en hiver, car la puissance du boiler, alimenté par cette source, est de 60kW et ne peut pas absorber toute la puissance de freinage fournie. En été, le boiler n'a pas besoin d'être chauffé, c'est pourquoi cette part d'énergie est plus élevée durant cette période.

3. Energie pour le chauffage

La consommation d'énergie pour le chauffage est plus élevée que prévu, avec jusqu'à 40% de l'énergie totale utilisée les mois les plus froids. Même à l'entre-saison, cette consommation peut encore atteindre 15% (avril). Le chauffage présent durant les mois d'été provient probablement de l'activation du dégivrage, qui enclenche également le chauffage.

4. Energie pour l'air réfrigéré

La consommation d'énergie de la climatisation est plus faible qu'attendu, malgré un été 2015 très chaud. Elle représente en effet 3-10% de l'énergie totale durant les mois d'été, avec les consommations les plus élevées en juillet et août. La climatisation peut être utilisée de manière ponctuelle en avril ou mai déjà ou plus tard dans l'année en septembre, mais avec à chaque fois des consommations très faibles.



Tableau 1 : Bilan 2015 de la répartition des consommateurs d'énergie du véhicule en %

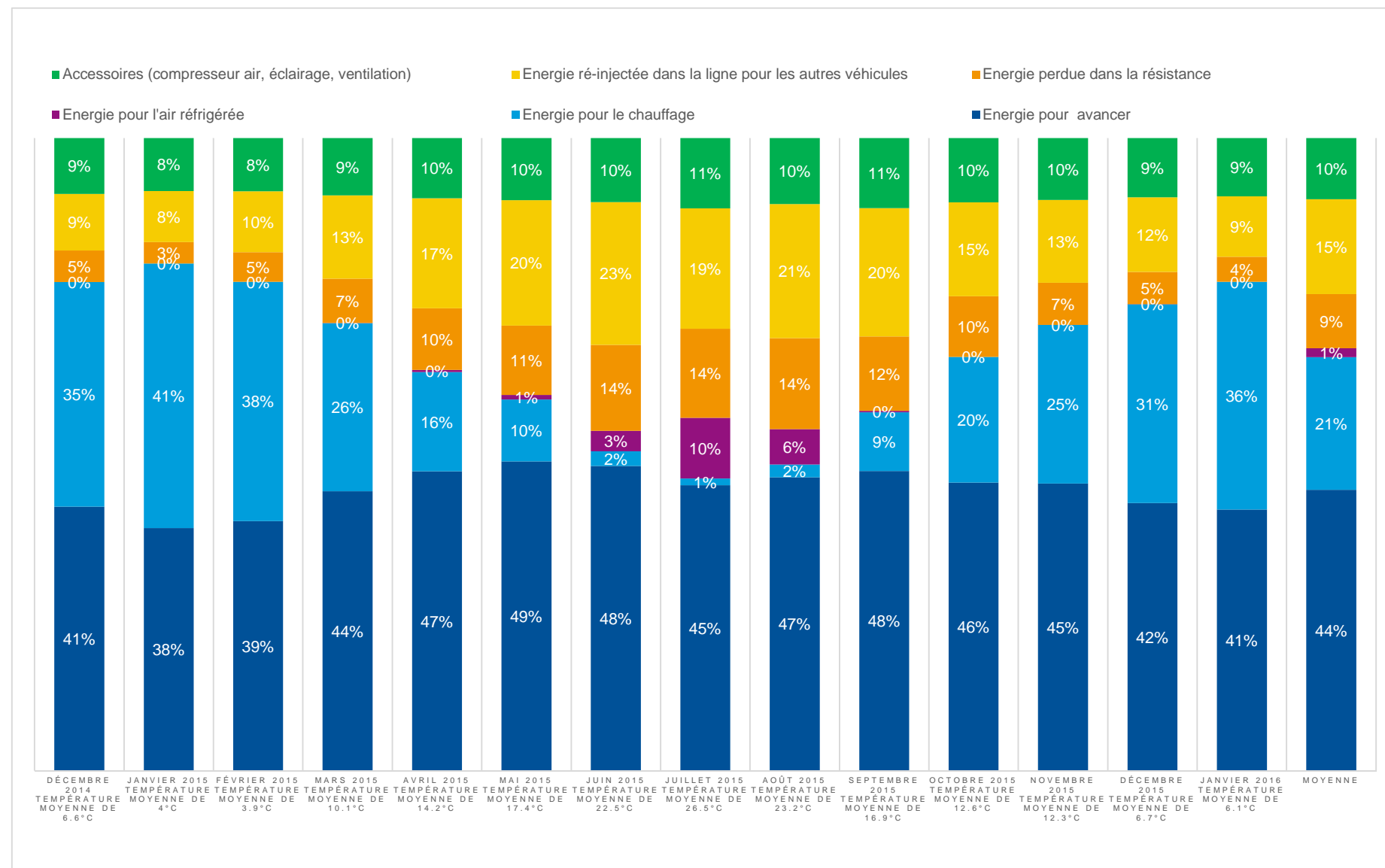
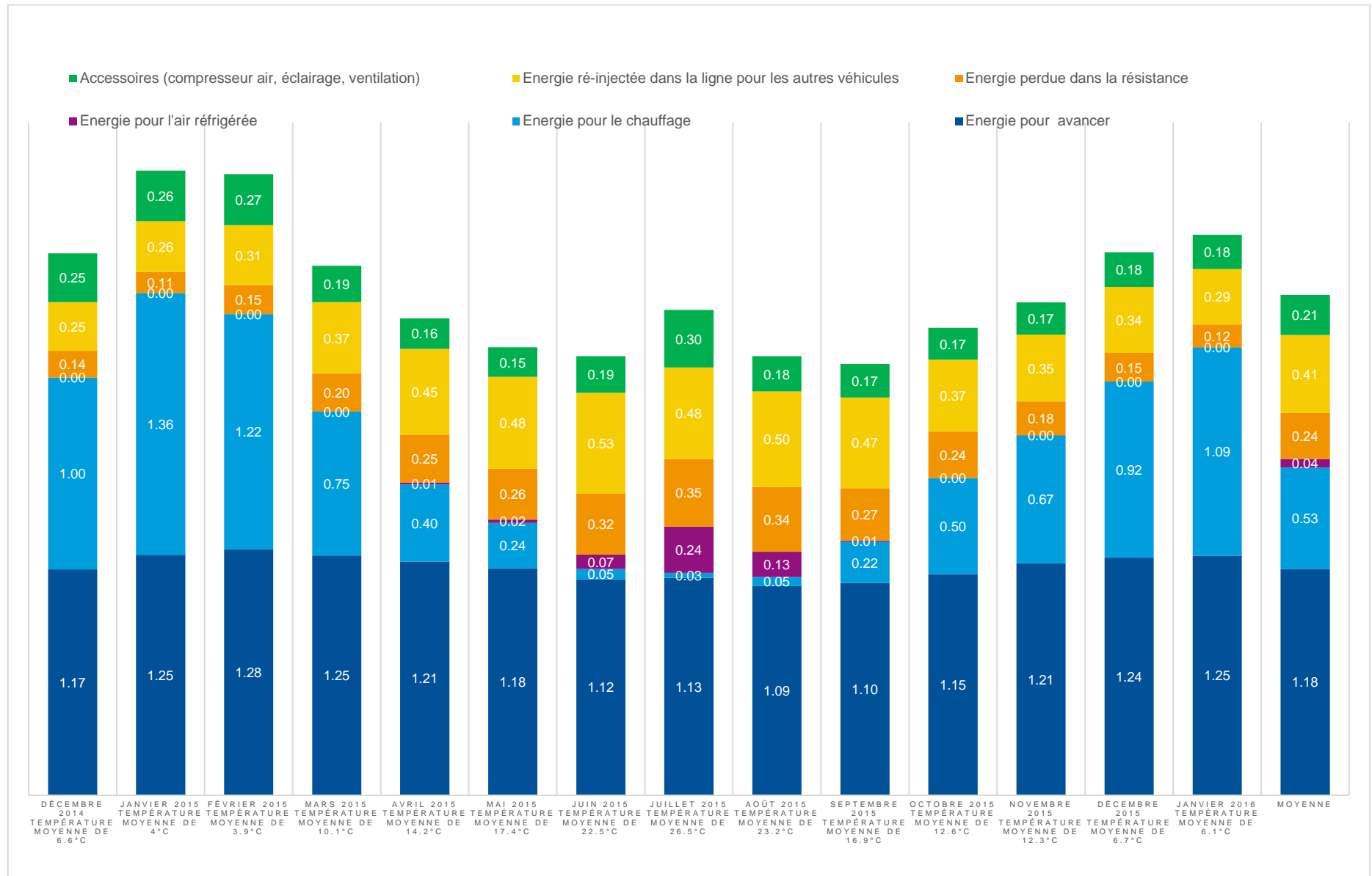


Tableau 2 : Bilan 2015 des consommateurs d'énergie du véhicule en kWh/km



## 4 Pistes d'amélioration

Sur la base de l'ensemble des résultats, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être identifiées. Le présent chapitre en énumère certaines, sans être exhaustif.

### 4.1 Inventaire

#### 4.1.1 Améliorer l'**isolation** de la caisse du véhicule (vitres, soufflet d'articulation, partie latérale du toit)

La thermographie montre clairement un déficit d'isolation du trolleybus, notamment au niveau des caissons latéraux supérieur au sein desquels est diffusé l'air chaud. Certaines raisons techniques propres à l'exploitation peuvent l'expliquer, comme le besoin de pouvoir briser les vitres en cas d'accident, ces dernières faisant office de sortie de secours. Les doubles vitrages et films de protection solaires doivent être homologués avant installation sur le véhicule. De même, une isolation plus importante alourdirait le véhicule, ce qui augmenterait la consommation d'énergie de la traction.

Cette piste ne sera pas privilégiée dans l'immédiat par les tl, car trop contraignante au niveau technique, ainsi qu'en terme de sécurité et de délai de mise en œuvre. Elle demande également des analyses complémentaires de faisabilité.

Les tl encouragent les constructeurs à rechercher des solutions, afin de produire des véhicules mieux isolés, tout en respectant les critères d'exploitation.  
A noter que le milieu de la recherche développe des verres et des peintures isolants de dernière génération, qui demanderaient à être testés en exploitation.

#### 4.1.2 Diminuer les pertes d'énergie du **chauffage**

Des consignes de chauffage automatiques existent déjà dans chaque véhicule tl. Dès lors, il n'est pas possible de gagner beaucoup en efficacité sur les réglages du chauffage dans l'habitacle pour ce qui concerne les tl. De même, une possibilité d'amélioration serait de préchauffer l'air froid arrivant de l'extérieur, avec l'air chaud de l'intérieur via un échangeur de chaleur. Les tl ne vont toutefois pas s'engager dans cette direction pour le moment sur la flotte existante, mais étudions les possibilités dans le cas de nouvelles acquisitions. Des améliorations sont par contre possibles sur le système d'alimentation en eau du chauffage.

Les tl et Hess mènent un test en 2016, qui consiste à couper l'arrivée de l'eau chaude du chauffage sur le toit, afin de vérifier son impact sur la consommation. De même, l'emplacement du boiler sera fermé par une tôle équipée d'une natte d'isolation.

#### 4.1.3 Améliorer le système de **ventilation**

En mode chauffage, les ventilateurs de toit peuvent fonctionner jusqu'à 40% de vitesse, ce qui est élevé. La ventilation pourrait être réduite, mais vraisemblablement pas supprimée, en raison des problèmes de condensation sur les vitres que cela générerait.

Les tl et Hess testent en 2016 l'effet de la diminution de la ventilation du toit sur la consommation d'énergie, par l'installation d'un interrupteur. Celui-ci permettra de choisir entre différents modes de ventilation (20%, 10% ou 0% de vitesse).

#### 4.1.4 Diminuer les pertes d'énergie dans la **résistance** lors du freinage

L'énergie de la résistance qui n'est utilisée ni pour chauffer l'eau dans le boiler, ni pour une réinjection dans la ligne aérienne est pour l'heure perdue. Une solution pour récupérer cette énergie est de la stocker dans des batteries. Par contre, les batteries ajoutent du poids au véhicule et posent des problèmes au niveau de leur élimination.

Les tl vont effectuer des tests en remplaçant sur un trolleybus le moteur auxiliaire thermique, par une batterie et un convertisseur électrique. L'énergie excédentaire aujourd'hui dissipée dans la résistance pourra y être partiellement stockée.

#### 4.1.5 Pompe à chaleur air-air

D'autres types de chauffage plus efficaces pourraient également être testés, tel le système de pompe à chaleur air-air. Cette piste doit toutefois faire l'objet d'analyses et de recherches plus approfondies.

## 4.2 Gains attendus

Les possibilités d'économie d'énergie sont difficilement quantifiables sans test préalable. Les premiers résultats des tests effectués en 2016 (points 4.1.2 et 4.1.3) donnent un potentiel d'économie de 3-6%, plus faible qu'attendu. Dans le détail, l'action sur la ventilation semble apporter les meilleurs résultats. Les résultats de ce test ne font toutefois pas partie du périmètre de ce rapport.

A ce stade, il n'est donc possible que d'évoquer des pistes d'amélioration, sans se prononcer sur les gains potentiels.

## 4.3 Synthèse des pistes d'optimisation

	Retenu par tl	Non-retenu par tl
<b>1. Isolation</b>		<ul style="list-style-type: none"><li>- Renforcer l'isolation de la caisse et des vitres</li><li>- Poser des films solaires pour vitres</li><li>- Installer des verres solaires de dernière génération</li><li>- Utiliser des peintures solaires de dernière génération</li></ul>
<b>2. Chauffage</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Couper l'arrivée d'eau chaude sur le toit (2016)</li><li>- Isoler le boiler (2016)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Optimiser les consignes de température dans l'habitacle</li><li>- Préchauffer l'air arrivant de l'extérieur</li></ul>
<b>3. Ventilation</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Diminuer la vitesse de ventilation du toit (2016)</li></ul>	
<b>4. Résistance</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Tester l'installation des moteurs auxiliaires électriques avec batteries.</li></ul>	

## 5 Discussion et conclusion

Les différentes analyses effectuées sur le trolleybus n°871 modèle Swisstrolley 4 de la flotte des tl apportent des connaissances importantes sur le détail des consommations d'énergie par les différents équipements du véhicule, ce qui était un des objectifs de départ de l'étude.

Les résultats des analyses montrent néanmoins différents problèmes, qui influent fortement sur la consommation d'énergie des équipements liés au confort des passagers de celui-ci. Un système de chauffage mal isolé, une mauvaise qualité de l'enveloppe thermique ou un renouvellement d'air trop important en sont quelques exemples. En découle une forte consommation d'énergie pour le chauffage en hiver notamment.

Certains choix de conception fondamentaux sont en opposition avec une meilleure efficacité énergétique, parce qu'ils répondent à d'autres besoins ou impératifs. Un équilibre doit, par exemple, être trouvé entre poids du véhicule et isolation renforcée.

Des mesures d'efficacité énergétique sont déjà intégrées au véhicule, par exemple la récupération de l'énergie de freinage pour chauffer le boiler. Des améliorations peuvent également être apportées relativement facilement au système, dont l'optimisation des consignes de température dans l'habitacle, déjà réalisé par les tl. D'autres sont plus compliquées à mettre en place, comme la pose de films solaires. En effet, ces films sont généralement non homologués et posent des problèmes de sécurité en cas d'évacuation du véhicule.

Les aspects d'efficacité énergétique devraient donc être pris en compte dès la conception du véhicule, car il n'est pas toujours facile d'effectuer des modifications après coup.

Pour l'heure, les tl testent les pistes d'amélioration en lien avec le chauffage (couper l'arrivée d'eau chaude sur le toit et isolation du boiler) et la ventilation (diminution de la vitesse de ventilation sur le toit). L'ensemble des pistes sera néanmoins repris pour des éventuels tests à plus long terme ou comme base de discussion avec le fournisseur.

## **6**      **Recommandations**

L'étude présentée ici vient compléter une autre menée par l'université de Bâle sur du matériel utilisé par les chemins de fer. Les autres véhicules utilisés par les entreprises de transport public, comme les bus à moteur thermique, le tramway ou le métro, devraient faire l'objet d'analyses identiques, afin de mieux connaître le détail de la répartition des consommations d'énergie des équipements. Puis ces informations partagées entre les entreprises de TP et les fabricants, dans le but d'appliquer des solutions de réduction de consommation d'énergie.

Dans ce sens, il serait judicieux d'installer dans ces véhicules le même système de mesures proposé par l'Université de Bâle, afin de permettre une bonne comparaison des résultats. Nous recommandons toutefois la supervision de l'installation par le constructeur, afin d'éviter tout risque au niveau de la sécurité lors de l'exploitation.

Il n'en reste pas moins que cette question de l'efficacité énergétique des véhicules devrait être intégrée déjà au moment de la conception de nouveaux véhicules par les constructeurs ou tout du moins que les entreprises de TP et les collectivités prennent en compte ce critère dans leurs appels d'offres.

La difficulté pour le secteur du trolleybus réside dans la petitesse de son marché. Les procédés de fabrication sont développés à beaucoup plus petite échelle que ceux des bus à moteur thermique. Le prix de ces véhicules est dès lors beaucoup plus élevé et ce marché ne bénéficie pas du même financement pour le développement.

Des subventions ou des incitations pourraient peut-être favoriser la recherche dans ce secteur.

De manière générale, des études telles que celle-ci devraient être favorisées, car elles permettent de rassembler les différents acteurs et partenaires du transport public pour réfléchir ensemble à des solutions sur la problématique de l'énergie.

## **7**      **Annexes**

1. Installation du système de mesures, Tonin A., Uni Basel, novembre 2014
2. Measurements trolleybus TBA Hess-tl (Bouvard O., Schüler A., EPFL/LESO-PB, mars 2014)
3. Mesures du taux de renouvellement d'air et de la qualité de l'enveloppe thermique d'un trolleybus des tl (Vetterli N. et Sidler F., HSLU, septembre 2014)