

Électricité et magnétisme (PHY 332)



Photo :

<http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/758766/hydro-quebec-pylones-acier-contrats-acier-entreprises-quebecoises>

Laboratoire :

L'efficacité dans le transport d'électricité

1 Introduction

Le transport de l'énergie sous forme électrique ne se fait pas sans pertes. Depuis les débuts du transport de l'électricité, vers la fin du 19^e siècle, l'augmentation du potentiel électrique est pratique courante. Aujourd'hui, Hydro Québec possède plusieurs lignes de transport fonctionnant à 735 kV. Ailleurs dans le monde, certaines lignes fonctionnent à des potentiels (tensions) supérieurs à 1 MV. Tous ces efforts pour augmenter la tension ont pour effet d'augmenter l'efficacité dans le transport de l'énergie électrique. Ce laboratoire vous propose d'étudier ce principe à plus petite échelle.

L'objectif de l'expérimentation est de fournir une puissance d'environ 1 W à un élément résistif de façon la plus efficace possible, en utilisant le matériel mis à votre disposition. L'élément résistif est composé de deux résistances et doit être situé à environs 150 m de la source de tension. Le fil dont vous disposez est de calibre 22 AWG, et pour les raisons pratiques, devra demeurer enroulé.

Dans le cadre de cette étude, la source variable servira à fixer la tension dans la ligne, et du côté de la charge, un convertisseur de tension (aussi nommé convertisseur DC-DC) servira à abaisser la tension. Un objectif secondaire de cette étude sera d'estimer la résistance de la ligne de transport en utilisant différentes méthodes.

2 Matériel

Voici le matériel requis pour réaliser l'expérimentation (figure 1) :

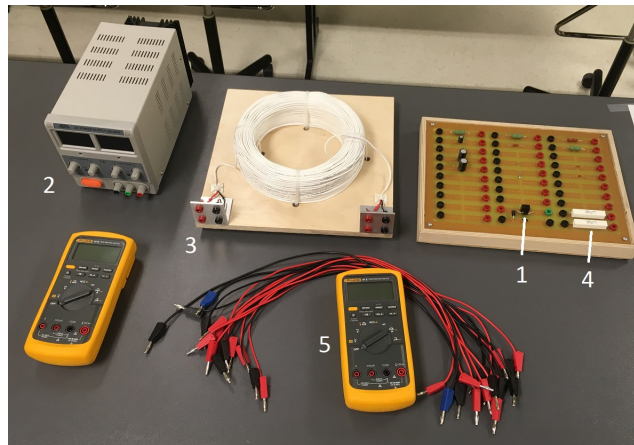


Figure 1 Matériel requis.

1. Convertisseur DC-DC Recom R-783.3-0.5 (petit boîtier noir, avec diodes de protection) ;
2. Une source de tension ajustable 0 à 30 V ;
3. Une bobine de fil de cuivre 22/2 d'environ 500 pieds (152,4 mètres) ; “22/2” signifie : calibre 22 AWG¹, 2 conducteurs ;
4. Deux résistances de 5,1 Ω ;
5. Un multimètre et des fils de branchement.

Vérifiez vos branchements et vos réglages avant d'alimenter votre circuit. Le convertisseur de tension et le multimètre peuvent être endommagés s'ils ne sont pas branchés correctement. De plus, un circuit incorrectement branché pourrait faire chauffer les résistances de puissance !

¹. Voir l'Annexe D pour le diamètre de la section des conducteurs.

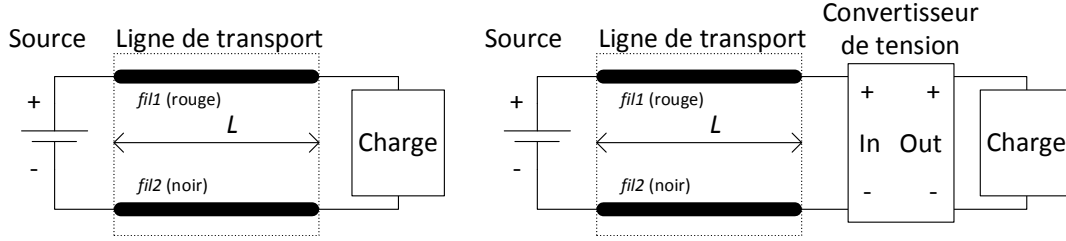


Figure 2 Schéma général de l'expérimentation sans convertisseur (à gauche) et avec convertisseur (à droite). Concernant la résistance totale de la ligne de transport, posons $R_{fils} = R_{fil1} + R_{fil2}$, et concernant les autres fils de branchement, supposons leurs résistances négligeables.

3 Cadre Théorique

La charge à alimenter est composée de deux résistances, qui peuvent être reliées soit en parallèle ou en série. Dans un premier temps, la charge sera branchée directement à la ligne de transport. Dans le cas où un convertisseur de tension est utilisé (figure 2), celui-ci est situé près de la charge.

Le convertisseur DC-DC fournit une différence de potentiel fixe de 3,3 V, pourvu que la différence de potentiel à son entrée soit comprise entre 4,75 et 32 V ; le courant maximal à sa sortie est de 0,5 A. Étant donné que la différence de potentiel à l'entrée est plus élevée qu'à la sortie, et que l'efficacité du convertisseur est relativement élevée, le courant à l'entrée est habituellement plus faible que le courant à la sortie. L'Annexe A présente la modélisation simplifiée du convertisseur.

Le contexte du laboratoire étant d'étudier l'efficacité du transport de l'électricité, il est pertinent de définir l'efficacité dans ce contexte. L'efficacité, notée η ("eta"), est simplement le rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée. Dans le cas présent, c'est donc le rapport entre la puissance livrée à la charge et la puissance fournie par la source.

3.1 Montage sans convertisseur

Lorsque le convertisseur de tension n'est pas utilisé, l'efficacité du transport, dont la définition est donnée par la première égalité, est calculée comme suit :

$$\eta_{\text{trsp}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P_{\text{ch}}}{P_{\text{s}}} = \frac{\Delta V_{\text{ch}} I}{\Delta V_{\text{s}} I} = \frac{\Delta V_{\text{ch}}}{\Delta V_{\text{s}}} \quad (1)$$

où P_{s} et P_{ch} représentent respectivement les puissances fournies par la source et absorbées par la charge, et ΔV_{s} et ΔV_{ch} représentent respectivement les différences de potentiel de la source et de la charge. Dans ce montage, le courant traversant la charge est le même que celui dans la ligne de transport ; le calcul d'efficacité correspond alors directement au rapport des différences de potentiel de la charge et de la source.

L'objectif secondaire de l'expérimentation est de fournir une estimation de la résistance de la ligne de transport. À part l'utilisation d'un ohmmètre, il est aussi possible de calculer la résistance totale de la ligne, notée R_{fils} , à partir de l'efficacité η_{trsp} et de la résistance de la charge R_{ch} .

$$R_{\text{fils}} = \left(\frac{1}{\eta_{\text{trsp}}} - 1 \right) R_{\text{ch}} \quad (2)$$

L'équation (2) s'applique seulement au montage sans convertisseur.

Mesures (ohmmètre)	Résistance (Ω)	Calculs	Résistance (Ω)
R_{ch} parallèle		R_{fils} selon conf. A, eq. (2)	
R_{ch} série		R_{fils} selon conf. B, eq. (2)	
R_{fils}		R_{fils} théorique	

Tableau 1 Tableau des mesures et des calculs des résistances.

3.2 Montage avec convertisseur

Lorsque le convertisseur de tension est utilisé, l'efficacité du transport est calculée comme suit :

$$\eta_{\text{trsp}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P_{\text{ch}}}{P_{\text{s}}} = \frac{P_{\text{ch}} R_{\text{fils}}}{(\Delta V_{\text{s}} - \Delta V_{\text{in}}) \Delta V_{\text{s}}} \quad (3)$$

où la résistance totale de la ligne de transport vaut $R_{\text{fils}} = R_{\text{fil1}} + R_{\text{fil2}}$ et ΔV_{in} représente la différence de potentiel à l'entrée du convertisseur. L'efficacité du convertisseur DC-DC, dont la définition est donnée par la première égalité ci-dessous, est le rapport entre la puissance fournie à sa sortie et la puissance absorbée à son entrée :

$$\eta_{\text{conv}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{ch}} R_{\text{fils}}}{(\Delta V_{\text{s}} - \Delta V_{\text{in}}) \Delta V_{\text{in}}} \quad (4)$$

Le convertisseur étant relié à la charge par de courts fils de résistance négligeable, l'égalité $P_{\text{out}} = P_{\text{ch}}$ est admise.

4 Expérimentations

Les calculs d'efficacité présentés dans la section précédente font appel aux valeurs résistives de la charge et de la ligne de transport, qui doivent être mesurées dans un premier temps.

- ① Réglez le multimètre à la fonction ohmmètre (symbole Ω). Mesurez la résistance de la charge lorsque les deux résistances de charge sont en *parallèle*, et consignez votre résultat dans le tableau 1. La charge ne doit pas être branchée au reste du montage pour cette mesure.
- ② Répétez l'étape précédente avec les deux résistances de charge branchées en *série*, et consignez votre résultat dans le tableau 1.
- ③ Court-circuitez la ligne de transport à une de ses extrémités et mesurez la résistance totale de la ligne, notée R_{fils} (qui représente $R_{\text{fil1}} + R_{\text{fil2}}$), à partir de l'autre extrémité. Ce faisant, les deux fils de la ligne sont en série. La source, le convertisseur et la charge ne doivent pas être connectés à la ligne pour cette mesure.
- ④ Réglez le multimètre à la fonction voltmètre (symbole $\overline{\text{V}}$).

Notez que les différences de potentiel ΔV_{s} et ΔV_{in} peuvent être mesurées directement sur les borniers de la ligne de transport, tel qu'indiqué à la figure 3. Ces mesures doivent être effectuées avec le même multimètre.

4.1 Configuration A : Résistances de charge en parallèle

La première configuration à évaluer consiste à relier les résistances de charge en parallèle, et de relier cette charge directement à la ligne de transport (figure 4). Dans cette configuration, la différence de potentiel à la charge est fixée à une valeur de 1,65 volt. De cette façon, la puissance cible pour la charge sera environ 1,07 W ($= \Delta V^2 / R = 1,65^2 / 2,55$).

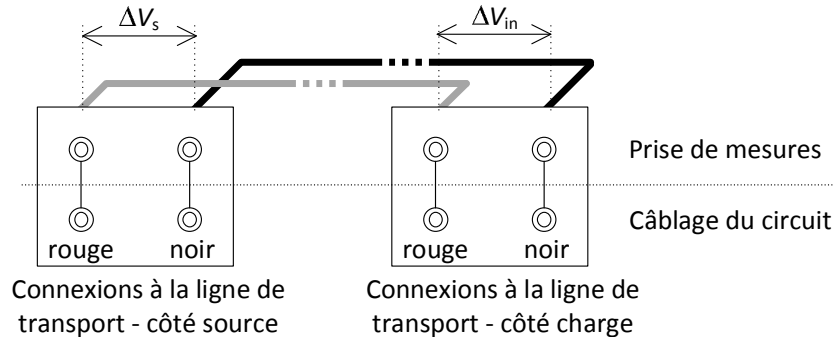


Figure 3 Configuration des borniers de la ligne de transport disponible au laboratoire. Lorsque le convertisseur de tension n'est pas utilisé, la mesure ΔV_{in} correspond directement à ΔV_{ch} .

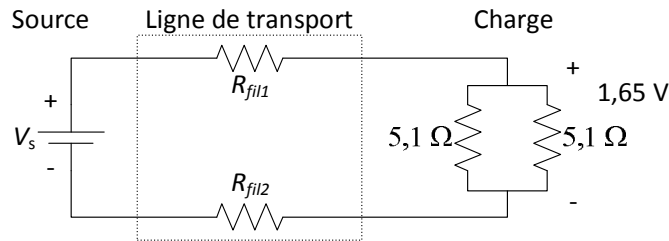


Figure 4 Schéma électrique de la configuration A.

- ⑤ Réalisez le montage illustré à la figure 4. Ajustez la source de façon à obtenir une différence de potentiel de 1,65 V à la charge. Si vous n'arrivez pas à obtenir précisément la tension demandée à la charge, utilisez la valeur indiquée par le voltmètre dans le tableau 2, à la place de la valeur 1,65 V (par exemple, 1,651 V).
- ⑥ Mesurez la différence de potentiel de la source à l'aide du multimètre (ne pas utiliser l'afficheur de la source), et consignez votre résultat dans le tableau 2.
- ⑦ À partir de vos mesures, calculez l'efficacité de transport η_{trsp} (équation (1)) et la résistance de la ligne de transport R_{fils} (équation (2)). Consignez la valeur de la résistance obtenue dans le tableau 1 ; l'efficacité obtenue peut être consignée dans le tableau 2. **Vérification** : si votre valeur calculée de R_{fils} n'est pas comparable à celle mesurée à l'aide de l'ohmmètre, vérifiez vos mesures, votre montage et vos calculs !

4.2 Configuration B : Résistances de charge en série

La deuxième configuration à évaluer consiste à relier les résistances de charge en série. Comme à la configuration A, cette charge est reliée directement à la ligne de transport (figure 5).

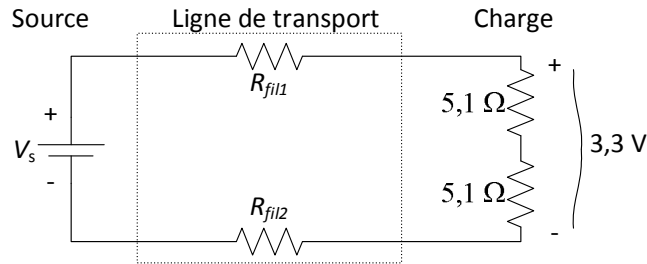


Figure 5 Schéma électrique de la configuration B.

Dans cette configuration, la différence de potentiel à la charge est plutôt fixée à une valeur de 3,3 volts. De cette façon, la puissance visée sera identique à celle de la configuration A, soit environ 1,07 W ($= 3,3^2/10,2$).

- ⑧ Réalisez le montage illustré à la figure 5. Ajustez la source de façon à obtenir une différence de potentiel de 3,3 V à la charge. Si vous n'arrivez pas à obtenir précisément la tension demandée à la charge, utilisez la valeur indiquée par le voltmètre dans le tableau 2, à la place de la valeur 3,3 V (par exemple, 3,299 V).
- ⑨ Mesurez la différence de potentiel de la source à l'aide du multimètre (ne pas utiliser l'afficheur de la source), et consignez votre résultat dans le tableau 2.
- ⑩ À partir de vos mesures, calculez l'efficacité de transport η_{trsp} (équation (1)) et la résistance de la ligne de transport R_{fils} (équation (2)). Consignez la valeur de la résistance obtenue dans le tableau 1 ; l'efficacité obtenue peut être consignée dans le tableau 2. **Vérification** : si votre valeur calculée de R_{fils} n'est pas comparable à celle mesurée à l'aide de l'ohmmètre, vérifiez vos mesures, votre montage et vos calculs !

4.3 Configuration C : Résistances de charge en série, avec convertisseur de tension

Les configurations précédentes ne permettent pas de modifier la tension de la source, et par conséquent, la tension de la ligne de transport ne peut être augmentée. En ajoutant un convertisseur DC-DC (convertisseur de tension) pour abaisser la tension près de la charge, la tension de la ligne peut être modifiée (figure 6).

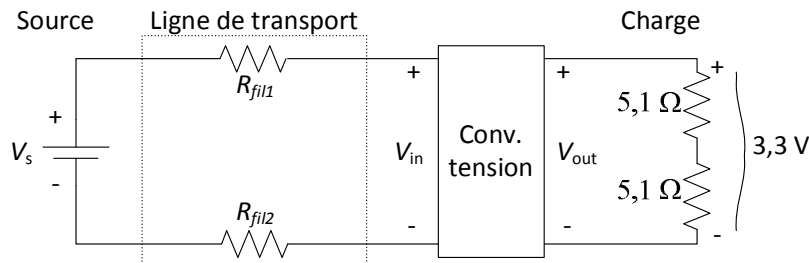


Figure 6 Schéma électrique de la configuration C.

Le convertisseur ayant une tension de sortie d'environ 3,3 V, les résistances de charge sont branchées de la même façon qu'à la configuration B, soit en série.

- ⑪ Réalisez le montage illustré à la figure 6. Pour chaque valeur de tension de source demandée dans le tableau 2, en lien avec la configuration C, effectuez les deux étapes suivantes.
- ⑫ Branchez le voltmètre à la source et ajustez la tension de la source à la valeur demandée. **Il est important de mesurer la tension de la source à l'aide du voltmètre plutôt que d'utiliser l'afficheur de la source.** Si vous n'arrivez pas à fixer précisément la tension à la valeur demandée, utilisez la valeur indiquée par le voltmètre dans le tableau 2, à la place de la valeur demandée dans la première colonne (par exemple, 12,01 V à la place de 12 V).
- ⑬ Mesurez les différences de potentiel à l'entrée du convertisseur ainsi qu'à la charge. Consignez vos résultats dans le tableau 2. **Vérification** : dans chaque cas, ΔV_{in} devrait être inférieur à ΔV_s , et ΔV_{ch} devrait être situé entre environ 3,25 et 3,31 volts (la tension de sortie du convertisseur ne peut pas être ajustée, et il est possible qu'elle ne soit pas exactement 3,3 V).
- ⑭ **Vérification** : avant de quitter le laboratoire, tracez les graphiques des efficacités η_{trsp} et η_{conv} en fonction de ΔV_s à l'aide d'Excel, afin de vérifier qu'il n'y a pas de point singulier

Config.	ΔV_s (V)	ΔV_{in} (V)	ΔV_{ch} (V)	P_{ch} (W)	η_{trsp} (%)	η_{conv} (%)	P_{fils} (W)	P_s (W)	P_{conv} (W)
A		—	1,65			—			—
B		—	3,30			—			—
C	10								
C	12								
C	14								
C	16								
C	18								
C	20								
C	22								
C	24								
C	26								
C	28								
C	30								

Tableau 2 Tableau des mesures de différences de potentiel et des calculs de puissance et d'efficacité.

(mesure aberrante). Reprenez les mesures douteuses au besoin...

5 Résultats et analyse

Une fois toutes les différences de potentiel et les résistances mesurées, tel que demandé dans la section 4, les calculs et résultats peuvent être complétés. Voici les étapes requises pour compléter les tableaux 1 et 2.

- Calculez la résistance théorique de la ligne de transport (R_{fils}) à partir de sa longueur (Annexe B) et de ses autres caractéristiques (diamètre de la section du fil, résistivité); montrez votre calcul dans votre rapport et consignez votre résultat dans le tableau 1. Rappel : $R_{fils} = R_{fil1} + R_{fil2}$.
- Pour chaque ligne du tableau 2, calculez la puissance livrée à la charge (P_{ch}), la puissance perdue dans la ligne de transport (P_{fils}) et la puissance fournie par la source (P_s). Dans tous vos calculs, utilisez les résistances de charge et de ligne mesurées avec l'ohmmètre.
- Calculez les efficacités demandées dans le tableau 2 à l'aide des équations fournies dans la section 3. Utilisez la résistance de ligne mesurée avec l'ohmmètre, lorsque requis.
- Dans la dernière colonne du tableau, calculez la puissance qui est perdue dans le convertisseur, soit $P_{in} - P_{out}$ du convertisseur.

Les tableaux 1 et 2 étant complétés, répondez aux questions d'analyse suivantes (les démarches plus longues peuvent être placées en annexes dans le rapport) :

1. Comment se compare la résistance théorique de la ligne aux trois autres résistances de ligne du tableau 1 ? Quels facteurs pourraient faire en sorte que votre résistance calculée soit différente ? (Une erreur de calcul ne constitue pas une réponse acceptable)
2. Parmi les quatre valeurs de R_{fils} dont vous disposez, en laquelle avez-vous le plus confiance en termes d'exactitude ? Expliquez votre raisonnement.

3. Quel calibre (AWG) de fil devrait-on utiliser dans la ligne de transport à la configuration A, pour que l'efficacité dans cette configuration soit égale à l'efficacité observée dans la configuration B ? Arrondissez au calibre AWG le plus près. Basez-vous sur la valeur nominale de la longueur de la ligne de transport (Annexe B) et la valeur R_{ch} mesurée.
4. Sur un même graphique (pleine page), tracez les graphes de l'efficacité du convertisseur η_{conv} et de l'efficacité du transport η_{trsp} pour la configuration C, en fonction de ΔV_s . Voici les consignes d'étendues des axes pour vos graphiques : axe vertical de 50 % à 100 %, axe horizontal de 8 V à 32 V.
5. Sur un autre graphique (pleine page), tracez les graphes de la puissance perdue dans les fils (P_{fils}) et la puissance perdue dans le convertisseur de tension (P_{conv}), en fonction de ΔV_s . En analysant votre graphique, estimez à quelle valeur de tension de source les pertes de puissance dans les fils et le convertisseur seraient égales.
6. À la lumière de vos résultats expérimentaux, quelle configuration permet de transporter l'électricité le plus efficacement possible, et quelle est l'efficacité maximale de transport observée ? Justifiez en présentant un résultat d'efficacité pour chaque configuration.
7. Les spécifications techniques du fabricant font état de l'efficacité du convertisseur R-783.3-0.5 (Annexe C). Deux valeurs sont proposées, soit l'efficacité à la tension V_{in} minimale, et l'efficacité à la tension V_{in} maximale supportée. Même si ces tensions n'ont pas précisément été évaluées dans cette expérimentation, comment se comparent les efficacités du convertisseur, telles que rapportées par le fabricant, à celles observées dans le cadre de ce laboratoire ?
8. Dans le cas des systèmes de transport d'électricité d'Hydro Québec, l'augmentation et la diminution de la tension se font, de part et d'autre de la ligne, par des postes de transformation dont les efficacités sont supérieures à 99 %. En supposant un nouveau convertisseur d'efficacité $\eta_{conv} = 99\%$, et une source réglée à 40 V, calculez l'efficacité de transport η_{trsp} à laquelle on pourrait s'attendre dans la configuration C. Utilisez la valeur ΔV_{ch} de la dernière ligne du tableau 2 et vos valeurs résistives mesurées, et soyez précis dans vos calculs.

6 Contenu du rapport

Votre rapport de laboratoire doit être fait sur traitement de texte et doit contenir les points suivants :

- Une introduction énonçant les deux buts du laboratoire et un bref résumé du contexte de l'expérimentation ;
- Une utilisation rigoureuse des unités de mesure ;
- Les démonstrations (preuves symboliques) des équations (2), (3) et (4) ;
- Les tableaux 1 et 2 complétés ;
- Les réponses aux questions demandées dans la section 5 ;
- Une conclusion énonçant les résultats principaux ainsi qu'un retour sur les buts visés dans cette expérimentation.

Note : Le rôle principal du surveillant de laboratoire est de s'assurer que le matériel nécessaire est disponible et est en bon état de fonctionnement. Bien qu'il puisse répondre à certaines questions et vous dépanner à l'occasion, il ne vous montrera pas comment réaliser l'expérience : vous devez être autonomes et suivre les directives du protocole que vous devez avoir lu préalablement.

Document révisé le 25 novembre 2025

Marc Boulé

École de technologie supérieure

Remerciements : Jean-Sébastien Closson-Duquette, Marlène Clisson, Tounsia Ait-Ahcène
et l'équipe de techniciens du SEG

Annexe A Modélisation du convertisseur DC-DC

La figure 7 présente une modélisation simplifiée du fonctionnement du convertisseur DC-DC. L'entrée du convertisseur peut être vue comme une pile qui se fait recharger, tandis que la sortie peut être vue comme une pile qui fournit de la puissance.

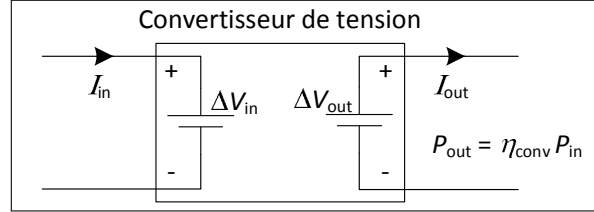


Figure 7 Modélisation simplifiée du convertisseur DC-DC.

Le seul lien entre les deux piles est la relation suivante :

$$P_{\text{out}} = \eta_{\text{conv}} P_{\text{in}} \quad (5)$$

La valeur de l'efficacité du convertisseur (η_{conv}) dépend des conditions d'utilisation, notamment le courant de charge et les différences de potentiel à l'entrée et à la sortie. Dans ce laboratoire, les mesures expérimentales permettent de calculer cette efficacité, et dans le cas de certains calculs théoriques, une valeur particulière est directement admise.

Dans le cas théorique où l'efficacité d'un convertisseur serait de 100 %, la relation suivante s'applique : $\Delta V_{\text{out}} < \Delta V_{\text{in}} \Leftrightarrow I_{\text{out}} > I_{\text{in}}$.

Annexe B Spécifications techniques du fil

La figure 8 présente un extrait des spécifications techniques du fil électrique utilisé pour la ligne de transport dans ce laboratoire.

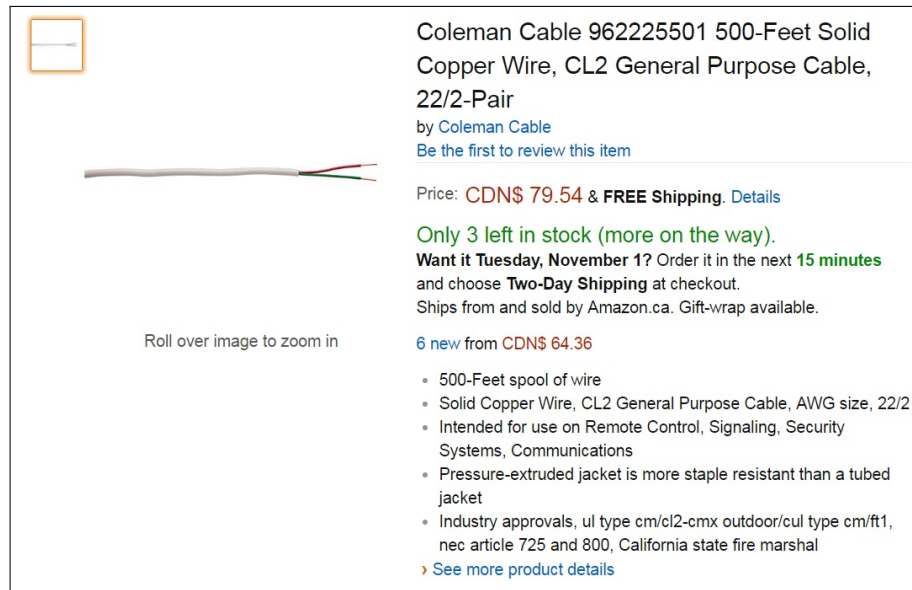


Figure 8 Spécifications techniques du fil utilisé pour la ligne de transport.

Source : <https://www.amazon.ca/Coleman-Cable-962225501-500-Feet-General/dp/B0080SBGRQ>

Annexe C Spécifications techniques du convertisseur DC-DC

La figure 9 présente un extrait des spécifications techniques des convertisseurs DC-DC de la série R-78, fabriqués par la compagnie Recom, dont notamment le R-783.3-0.5 utilisé dans cette expérience de laboratoire.

Description

The R-78xx-Series high efficiency switching regulators are ideally suited to replace 78xx linear regulators and are pin compatible. The efficiency of up to 97% means that very little energy is wasted as heat so there is no need for any heat sinks with their additional space and mounting costs. Low ripple and noise figures and short circuit, overload and over-temperature protection round off the specifications of this versatile converter series. This R-78xx-0.5 is fully certified to EN 55022 (Emissions), and EN55024 (Immunity) EMC Standards and for IEC/EN-60950-1 + A2 Safety.

Selection Guide


Part Number	Input Range (V)	Output Voltage (V)	Output Current (A)	Efficiency	
				Min. Vin (%)	Max. Vin (%)
R-781.5-0.5	4.75 – 30 ⁽¹⁾	1.5	0.5	73	63
R-781.8-0.5	4.75 – 32	1.8	0.5	82	71
R-782.5-0.5	4.75 – 32	2.5	0.5	87	77
R-783.3-0.5	4.75 ⁽²⁾ – 32	3.3	0.5	91	81
R-785.0-0.5	6.5 – 32	5.0	0.5	94	86
R-786.5-0.5	8.0 – 32	6.5	0.5	95	88
R-789.0-0.5	11 – 32	9.0	0.5	96	92
R-7812-0.5	15 – 32	12	0.5	97	94
R-7815-0.5	18 – 32	15	0.5	97	95

Note 1: 1.5V Output can be unstable with Vin>30VDC
Note 2: Refer to Dynamic Load Stability

DC/DC-Converter
with 3 year Warranty

RECOM

**0.5 AMP
SIP3
Single Output**



R-78-0.5

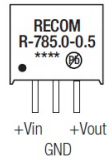


Figure 9 Spécifications techniques sommaires des convertisseurs DC-DC de la série R-78.

Source : <http://www.recom-power.com/pdf/Innoline/R-78xx-0.5.pdf>

Annexe D Standard AWG

La figure 10 présente les diamètres des fils dans le standard American Wire Gauge (AWG).

AWG	Diamètre (mm)	AWG	Diamètre (mm)
0000 (4/0)	11.7	19	0.912
000 (3/0)	10.4	20	0.812
00 (2/0)	9.27	21	0.723
0 (1/0)	8.25	22	0.644
1	7.35	23	0.573
2	6.54	24	0.511
3	5.83	25	0.455
4	5.19	26	0.405
5	4.62	27	0.361
6	4.12	28	0.321
7	3.66	29	0.286
8	3.26	30	0.255
9	2.91	31	0.227
10	2.59	32	0.202
11	2.30	33	0.180
12	2.05	34	0.160
13	1.83	35	0.143
14	1.63	36	0.127
15	1.45	37	0.113
16	1.29	38	0.101
17	1.15	39	0.0897
18	1.02	40	0.0799

Figure 10 Standard American Wire Gauge (AWG).

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/American_Wire_Gauge