

BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

SÉRIE SCIENTIFIQUE

ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Session 2017

Corrigé

Ce corrigé comporte 9 pages numérotées de 1 sur 9 à 9 sur 9.

Le bus WATT System

1. La solution technique d'alimentation : les supercondensateurs

Q1. A l'aide du tableau figure 2, **déterminer** la distance parcourue par le bus Watt Sytem pour effectuer un tour, c'est à dire du terminal 1 au terminal 1. **Déterminer** le nombre de recharges pour un tour.

$$d = 865 + 815 + 420 + 485 + 845 + 440 = 3870 \text{ m}$$

$$\text{Nombre de recharges} = 6$$

Q2. Sachant que le bus parcourt un tour en 1741 s et que l'aéroport de Nice est ouvert de 5h30 à 22h30, **déterminer** le nombre de charges en une journée puis sur une année de 365 jours.

$$t = 1741 \text{ s} \rightarrow \frac{1741}{3600} = 0,4836 \text{ h pour un tour (6 charges).}$$

Sachant que l'aéroport est ouvert pendant 17 h $\rightarrow \left(\frac{17}{0,4836}\right) \times 6 = 210,92$ charges par jour,

ce qui donne $210,92 \times 365 = 76985$ charges par année.

Q3. En exploitant le tableau figure 3 et en prenant le nombre de charges maximum le plus défavorable, calculer la durée de vie (en année) des supercondensateurs et **comparer** avec la durée de vie d'un accumulateur LMP qui n'effectuerait qu'un cycle de charge par jour.

$$\text{Pour les supercondensateurs } \frac{1000000}{76985} = 13 \text{ ans}$$

$$\text{Pour LMP } \frac{1000}{365} = 2,74 \text{ ans}$$

La durée de vie de la technologie des supercondensateurs est 4,74 fois plus grande que la technologie LMP. Afin de réduire l'impact environnemental lors de la fabrication et lors du recyclage des batteries, il particulièrement intéressant d'utiliser la technologie des supercondensateurs.

Q4. Sachant qu'un bus équipé d'accumulateur LMP parcourra 136 km par jour avant de se recharger, **calculer** en exploitant les données du tableau figure 3 la masse de la batterie. **Comparer** avec la masse de supercondensateur permettant de couvrir la plus grande des distances entre deux stations (tableau figure 2).

$$\text{Le bus parcourt 136 km} \rightarrow 136 \times 1200 = 163200 \text{ Wh}$$

$$\text{Énergie massique pour la batterie LMP : } 110 \text{ Wh} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

$$\text{masse}_{\text{LMP}} = \frac{163200}{110} = 1483,6 \text{ Kg pour la technologie LMP}$$

$$\text{masse}_{\text{supercondo}} = \frac{0,865 \times 1200}{7} = 148,3 \text{ Kg}$$

La masse des accumulateurs de type LMP est 10 fois supérieure à la technologie des supercondensateurs. (Cet écart est très important, il correspond à 19 passagers de 70 Kg environ en plus pour la même consommation d'énergie).

Q5. Conclure sur les critères de choix du constructeur d'utiliser la technologie des supercondensateurs en comparaison des autres technologies d'accumulateur.

La durée de vie et la masse des accumulateurs représentent les deux critères particulièrement avantageux de la technologie des supercondensateurs par rapport aux autres accumulateurs.

2. Estimation des besoins énergétiques entre deux Totems.

Q6. Calculer la valeur des efforts $F_{\text{roulement}}$ et $F_{\text{trainée}}$ à l'aide du document technique DT1 pour une vitesse de bus $V=30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

$$F_{\text{roulement}} = -\frac{\delta}{R} \times \|\vec{P}\| = \frac{-0,005}{0,452} \times (20000 \times 9,81) = -2170 \text{ N}$$

A l'aide du DT1 et de l'équation modélisée :

$$F_{\text{trainée}} = -3,855 \times V^2 = -3,855 \times 8,33^2 = -267,5 \text{ N}$$

Q7. En appliquant le principe fondamental de la dynamique, établir l'expression de F_m en fonction de $F_{\text{roulement}}$, $F_{\text{trainée}}$, m et a_G .

Principe fondamental de la dynamique appliqué au solide (1) (équation de la résultante dynamique) :

$$\vec{F}_C(0 \rightarrow 1) + \vec{F}_m + \vec{F}_{\text{roulement}} + \vec{P}_G + \vec{F}_D(0 \rightarrow 1) + \vec{F}_{\text{trainée}} = m \cdot \vec{a}_G$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ F_{cy} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{\text{roulement}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -m \cdot g \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_{dy} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ F_{\text{trainée}} \end{bmatrix} = m \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_G \end{bmatrix}$$

En projection sur l'axe z :

$$F_m + F_{\text{roulement}} + F_{\text{trainée}} = m \cdot a_{Gz} = m \cdot \frac{dV}{dt} \qquad F_{\text{résistant}} = F_{\text{trainée}} + F_{\text{roulement}}$$

Q8. A l'aide de la figure 5 et de l'équation déterminée à la question 7, **calculer** la valeur de la force motrice F_{m1} pour la période (1) de 0 s à 20 s. Puis, **calculer** la force motrice F_{m2} pour la période (2) de 20 s à 106 s.

Pour la période (1) :

$$F_{\text{résistant}} = F_{\text{roulement}} \rightarrow F_m + F_{\text{résistant}} = m \cdot a_G$$

Calcul de l'accélération pour la phase (1) : mouvement de translation uniformément

$$\text{accélééré } V(t) = a(t) \times t \rightarrow a(t) = \frac{V(t)}{t} = \frac{8,33}{20} = 0,4165 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$\text{donc } F_{m1} = m \cdot a_G - F_{\text{roulement}} = 20000 \times 0,4165 + 2170 = 10500 \text{ N}$$

Pour la période (2) :

$$F_{\text{résistant}} = F_{\text{roulement}} + F_{\text{trainée}} = -270 - 2170 = -2440 \text{ N et } a_G = 0$$

$$\text{Donc } F_{m2} + F_{\text{résistant}} = 0 \rightarrow F_{m2} = -F_{\text{résistant}} = 2440 \text{ N}$$

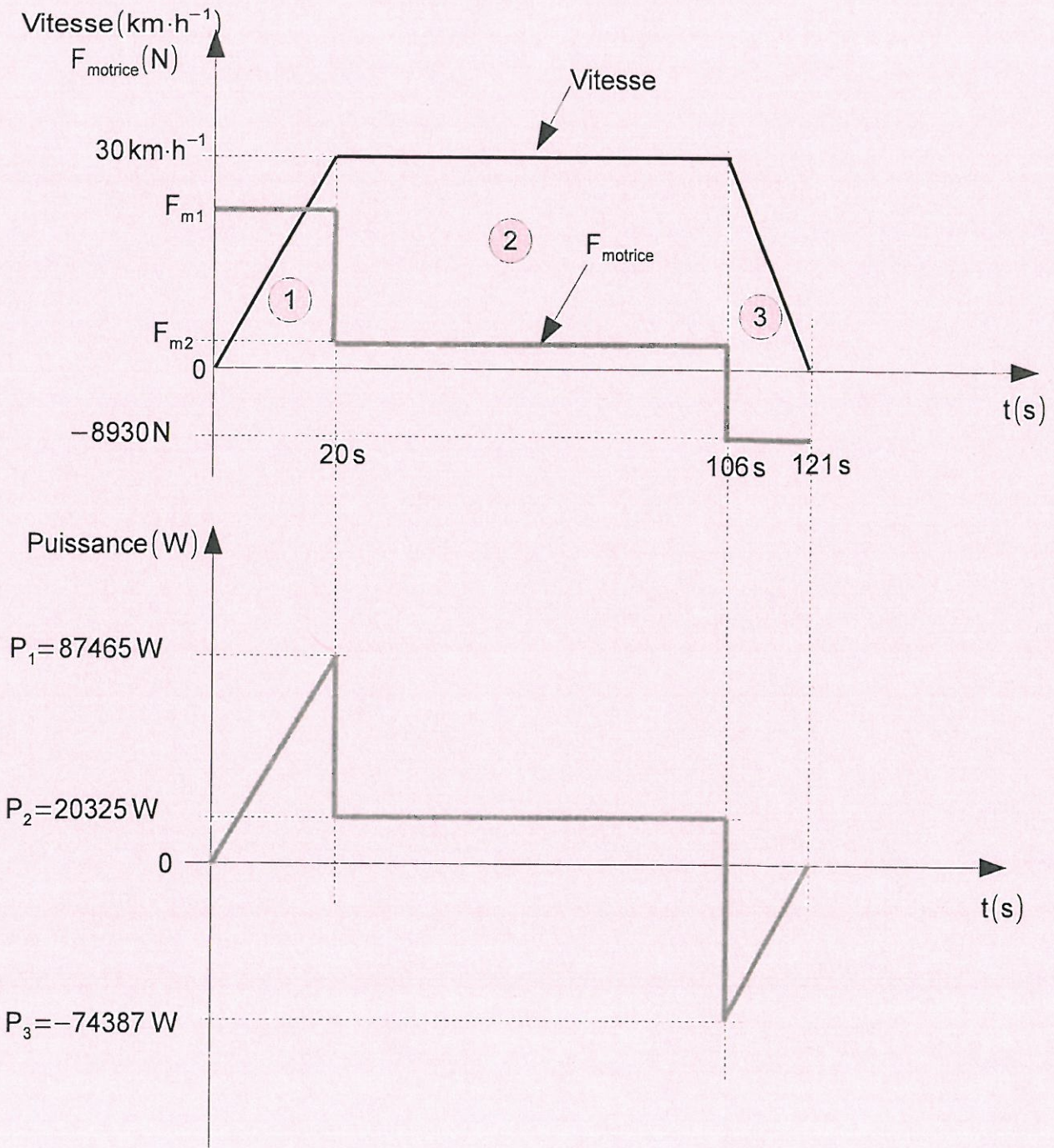
Q9. Sur le document réponse DR1, **tracer** le graphique de la puissance motrice du bus en watt en fonction du temps pour les trois phases en précisant les valeurs de P_1 , P_2 et P_3

$$P_1 = F_{m1} \times V(t_{20s}) = 10500 \times 8,33 = 87465 \text{ W}$$

$$P_2 = F_{m2} \times V(t_{20s}) = 2440 \times 8,33 = 20325 \text{ W}$$

$$P_3 = F_{m3} \times V(t_{106s}) = -8930 \times 8,33 = -74387 \text{ W}$$

Document réponse : DR1



Q10. Calculer l'énergie motrice nécessaire pour déplacer le bus entre les deux arrêts (8) et (1). Comparer cette valeur à l'énergie E_{base} en citant des éléments pouvant justifier l'écart constaté. Les énergies calculées seront exprimées en Joule puis en W·h. (3600 J = 1 W·h).

$$E_1 = \frac{P_1 \times t_1}{2} = \frac{87465 \times 20}{2} = 874650 \text{ J} = \frac{874650}{3600} = 243 \text{ W}\cdot\text{h}$$

$$E_2 = P_2 \times t_2 = 20325 \times 86 = 1747967 \text{ J} = \frac{1747967}{3600} = 485,5 \text{ W}\cdot\text{h}$$

$$E_3 = \frac{P_3 \times t_3}{2} = \frac{-74387 \times 15}{2} = -557901 \text{ J} = \frac{-557901}{3600} = -155 \text{ W}\cdot\text{h}$$

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 = 874650 + 1747967 - 557901 = 2064715 = \frac{2064715}{3600} = 573,5 \text{ W}\cdot\text{h}$$

L'écart entre E_{base} (1038 W·h) dans le bus et l'énergie dépensée sur le parcours simplifié est de 44,75 %. Cet écart s'explique du fait que le rendement global du bus n'est pas pris en compte et par la consommation des servitudes (climatisation, chauffage, feux,...) qui consomment une quantité d'énergie non négligeable.

3. Déploiement de ce système sur d'autres sites

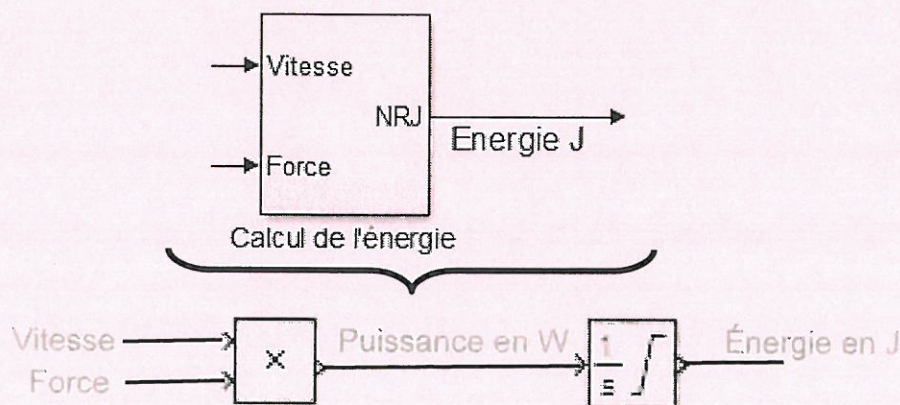
Q11. À l'aide du document technique DT1, **déterminer** la valeur de la constante **K1** qui a permis de paramétrer le modèle puis la valeur de **K2** qui permet d'afficher l'énergie mécanique consommée en W·h.

La constante K1 permet de déterminer la résistance aérodynamique, $K1 = 3,855$

La constante K2 permet de convertir des Joules en W.h, $K2 = \frac{1}{3600}$

Q12. Identifier la grandeur de flux et la grandeur d'effort, ainsi que leur unité, en entrée du bloc « calcul de l'énergie ». En utilisant les blocs présentés ci-dessus (figure 7), **réaliser** le modèle permettant de calculer l'énergie motrice en Joule en précisant les grandeurs qui apparaissent sur chacune des liaisons.

La grandeur de flux est la vitesse en $m \cdot s^{-1}$, la grandeur d'effort est la force en N.



Q13. En exploitant la figure 6, **justifier** que le modèle multi-physique intègre bien la récupération d'énergie en phase de freinage.

L'allure de la vitesse fait apparaître des variations importantes, ces variations sont dues à des phases de ralentissements et de freinages ($t=42s$, $t=60s$ et $80 < t < 102s$). Lors de ces différentes phases on constate une diminution plus ou moins importante de l'énergie mécanique. On peut conclure que le modèle multi-physique prend bien en compte la récupération d'énergie mécanique pendant les phases de ralentissements et de freinages.

Q14. Sachant que le rendement η de la chaîne d'énergie en aval du variateur est égal à 0,89, **calculer** l'énergie motrice notée $E_{méca1}$. **Relever** en sortie du modèle présenté sur le document technique DT2, la valeur de l'énergie motrice notée $E_{méca2}$ en $W \cdot h$. **Comparer** $E_{méca1}$ et $E_{méca2}$, **conclure** sur la validité du modèle (déterminer l'écart relatif).

$$E_{méca1} = E_{moteur} \times 0,89 = 711 \times 0,89 = 632,79 \text{ W} \cdot h$$

$$\text{Énergie simulée : } E_{méca2} = 654,9 \text{ W} \cdot h$$

Comparaison : calcul de l'écart relatif

$$\frac{E_{méca2} - E_{méca1}}{E_{méca2}} \times 100 = \frac{654,9 - 632,79}{654,9} \times 100 = 3,37 \%$$

L'écart étant faible on peut conclure que le modèle est bien validé. L'objectif d'étudier par simulation l'implantation du projet WATT System dans un autre site est tout à fait envisageable.

4. Charge rapide des supercondensateurs

Q15. Déterminer le temps maximum disponible pour effectuer le transfert d'énergie du coté Totem vers le coté bus.

Le temps maximum compatible avec une recharge ≤ 20 s vaut :

$$20 - 6 - 4 = 10 \text{ secondes}$$

Énergie qui peut être stockée dans le bus.

Q16. Calculer la variation ($W_{max} - W_{min}$) de l'énergie stockée dans un module de 165 Farads lorsque la différence de potentiel à ses bornes varie de 50 % à 100 % de sa tension nominale. En déduire l'énergie W_{TB} totale correspondant aux 48 modules embarqués dans le bus. Exprimer le résultat en Joules et en $W \cdot h$.

La variation d'énergie stockée dans un module de 165 Farads correspondant à une variation de 100 % à 50 % de sa tension nominale (48 Vdc) vaut :

$$W_{max} - W_{min} = \frac{1}{2} \cdot C_{eq} \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2) = 0,5 \cdot 165 \cdot (48^2 - 24^2) = 190080 - 47520 = 142560 \text{ Joules}$$

Pour 48 modules : $W_{TB} = 142560 \times 48 = 6842880$ Joules, soient 1,9 $kW \cdot h$.

Modélisation du transfert d'énergie entre le Totem et le bus.

Q17. Calculer les capacités C_{1eq} et C_{2eq} en exploitant le schéma de la figure 8.

$$C_{1eq} = 3 \times \left(\frac{165}{16} \right) = 30,94 \text{ Farad}$$

$$C_{2eq} = 2 \times \left(\frac{150}{14} \right) = 21,43 \text{ Farad}$$

Q18. A partir des résultats de la simulation de la figure 10 **calculer** la variation ($W_{max} - W_{min}$) de l'énergie stockée dans le condensateur C_{2eq} au bout de 10 secondes. **Calculer** l'énergie W_T transférée du Totem vers le bus en prenant en compte les pertes par effet Joule côté bus et côté totem. **Conclure** sur la capacité du système à effectuer une recharge pendant l'arrêt du bus dans la station.

Le modèle utilisé permet de déterminer une variation d'énergie correspondant à une variation de la tension U_1 de 756 V à 382 V qui vaut (en Joules) :

$$W_{max} - W_{min} = \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot (U_{max}^2 - U_{min}^2) = 0,5 \times 21,4 \times (756^2 - 382^2)$$

$$W_{max} - W_{min} = 4\,554\,048 \text{ J soient } 1,265 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

Les pertes Joules lors de cet échange d'une durée de 10 secondes sont égales à :

$$49,4 + 80,7 = 130,1 \text{ W}\cdot\text{h}$$

Énergie transférée :

$$1,265 \cdot 10^3 - 130 = 1,135 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

Le système est capable d'assurer la recharge de 1,038 kW·h requise.

Accumulation de l'énergie entre deux passages de bus Watt System.

Q19. **Calculer** le temps nécessaire pour accumuler 1,038 kW·h dans les supercondensateurs du Totem à partir du réseau Enedis. **Vérifier** que cette durée est compatible avec les conditions d'exploitation de la ligne.

$$\text{Puissance maximale : } 9\,000 \times 0,95 \times 0,95 = 8,122 \text{ kW}$$

$$\text{Pour accumuler } 1,038 \text{ kW}\cdot\text{h, il faut } \frac{1\,038}{8,122} \times 3\,600 = 460 \text{ s soit } 7 \text{ min et } 40 \text{ s ce qui}$$

permet la fréquence de passage maximale envisagée de 6 bus par heure.

5. Contrôle de la charge rapide des supercondensateurs

Contrôle du courant de charge lors du transfert d'énergie.

Q20. À l'aide de la représentation figure 12 **justifier** que le courant I_2 est asservi. **Identifier** sur le schéma de la figure 12 le bloc représentant le correcteur et celui représentant le capteur.

Le comparateur réalise une réaction négative sur la chaîne d'action: une variation de I_2 entraîne une variation inverse de la commande soit :

- diminution de I_2 ou augmentation de la consigne \Rightarrow augmentation de la commande MLI,
- augmentation de I_2 ou diminution de la consigne \Rightarrow diminution de la commande MLI.

Il s'agit donc bien d'un système asservi.

Le correcteur, **bloc 1**, permet de maintenir un écart de préférence faible entre la consigne et la mesure en ajustant la commande du convertisseur (système) qui agit sur la grandeur contrôlée.

Le capteur, **bloc 2**, permet le retour d'information de la grandeur contrôlée afin de la comparer (écart) avec la valeur désirée (consigne) et de réagir par l'intermédiaire du correcteur afin de réduire cet écart.

Q21. Exprimer U_R en fonction de I_2 , N en fonction de U_R , N en fonction du courant I_2 .

$$U_R = \frac{4}{1000} \cdot I_2 ; N = 32768 + \frac{16384}{2,048} \cdot U_R ; N = 32768 + \frac{16384}{2,048} \cdot \frac{4}{1000} I_2 = 32768 + 32 \cdot I_2$$

Q22. Exprimer l'équation de la variable « mesure » en fonction du nombre N ($mesure = a \cdot N + b$) permettant d'obtenir « mesure » = I_2 (Ampère) et **compléter** la ligne du programme correspondante sur le document réponse DR2.

$$mesure = \frac{N - 32768}{32}$$

Q23. Compléter l'algorithme du document réponse DR2.

DEBUT

```

Gp ← 5 // L'écart est traité par un régulateur de
// type proportionnel
N ← Acquisition_Courant() // Appel du sous-programme
// Acquisition_Courant() qui renvoie la
// valeur du courant  $I_2$  sous la forme d'un
// nombre qui est stocké dans la variable N
mesure ← (N - 32768) / 32 // Équation de traitement
ecart ← consigne - mesure. // Calcul de l'écart
commande ← Gp x ecart // Élaboration de la commande
SI (commande > 1 ) // Limitation de la commande
    ALORS commande ← 1
SINON
    SI(commande < 0 )
        ALORS commande ← 0
    FIN_SI
FIN_SI
RENOYER commande // la variable commande est renvoyée au
// programme principal.

```

FIN

Q24. Calculer le temps nécessaire pour transférer l'image du courant I_2 dans le calculateur. Comparer avec la fréquence d'appel du sous-programme de contrôle du courant I_2 . Conclure.

Il faut 32 périodes d'horloge pour effectuer le sous programme Acquisition_Courant(), soit :

$$t_{acq} = \frac{32}{200000} = 160 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Ce qui représente 1,6 % de la période d'appel du sous programme de contrôle du courant I_2 ce qui est très faible.

6. Synthèse

Q25. Au regard des différents points abordés tout au long de ce sujet, **énumérer** les avantages et les inconvénients de l'exploitation du bus WATT Sytem. **Conclure** sur la pertinence de l'utilisation de supercondensateurs pour alimenter une ligne de transport par bus en milieu urbain.

Avantages :

- 19 passagers de plus transportables par rapport à une solution batterie LMP embarquée,
- durée de vie des supercondensateurs presque 5 fois supérieure à celle des accumulateurs LMP,

Inconvénients :

- équipement des arrêts de bus

Le bus quant à lui dispose d'une capacité de stockage de 1,9 kW·h qui permettrait lors des tronçons court de stocker pour les tronçons plus longs.

La puissance installée de 9 kVA est suffisante pour permettre une fréquence de passage de 6 bus par heure : 7 min et 40 s est < 10 min.

...