

# BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

## SÉRIE SCIENTIFIQUE

### ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

**Session 2017**

---

**Durée de l'épreuve : 4 heures**

**Coefficient 4,5** pour les candidats ayant choisi un enseignement de spécialité autre que sciences de l'ingénieur.

**Coefficient 6** pour les candidats ayant choisi l'enseignement de sciences de l'ingénieur comme enseignement de spécialité.

Aucun document autorisé.

Calculatrice autorisée, conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

Dès que le sujet est remis, assurez-vous qu'il est complet.  
Ce sujet comporte 19 pages numérotées de 1 sur 19 à 19 sur 19.

**Les pages 18 et 19 sont à rendre avec la copie.**

## Le bus WATT System



Le bus Watt System de la société PVI à l'aéroport de Nice

### Constitution du sujet

- **Texte**.....Page 3
- **Documents techniques**.....Page 16
- **Documents réponses**.....Page 18

**Le sujet comporte 25 questions.**

**Les documents réponses DR1 et DR2 pages 18 et 19  
sont à rendre avec la copie.**

## Présentation

L'Aéroport Nice Côte d'Azur expérimente un service de bus électrique dit « à biberonnage » afin de réduire les nuisances et les pollutions tout en diminuant l'empreinte climatique. Ce système de recharge ultra-rapide, à faible émission de polluant, qui alimente le bus sur son parcours, représente une solution respectueuse de l'environnement.

L'innovation majeure du bus WATT System est le « biberonnage » du véhicule qui consiste à effectuer un transfert d'énergie à chaque station d'arrêt (**Totem**) vers le bus pendant le transfert des passagers. Cette opération lui permet de couvrir la distance qui le sépare du prochain arrêt. La solution technologique permettant de réaliser cette innovation dans les transports en commun est le supercondensateur dont l'avantage est de permettre une récupération d'énergie quasi instantanée.

Le système est constitué :

- d'un véhicule conventionnel de 12 mètres dont la chaîne de traction est 100 % électrique ;
- d'un système de stockage d'énergie embarqué à base de supercondensateurs permettant la recharge ultra-rapide du véhicule ;
- d'un Totem accolé au poteau d'arrêt, raccordé au réseau électrique et équipé de supercondensateurs, qui emmagasine l'énergie entre deux passages de bus ;
- d'un bras robotisé qui vient se connecter au véhicule, pour un transfert d'énergie du Totem vers le bus en 20 secondes environ.

Ce système permet de s'affranchir des limites imposées par les véhicules électriques à batteries en terme d'autonomie, tout en minimisant l'infrastructure urbaine par rapport à un système tramway (installation des rails, lignes aériennes...) et les besoins en énergie (utilisation du réseau électrique existant).

**Dans ce cadre, l'étude proposée va permettre de valider le choix de cette solution innovante.**

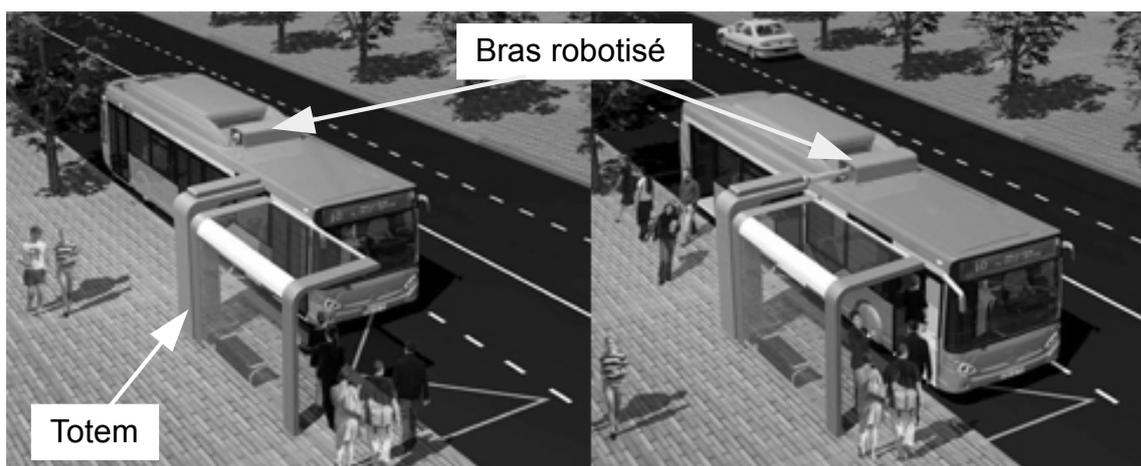


Figure 1 : sur la figure de gauche, le bus est en approche de la station ; sur la figure de droite, le bras robotisé est connecté au Totem et le bus se recharge

## 1. La solution technique d'alimentation : les supercondensateurs

**Objectif(s) de cette partie :** valider la solution d'alimentation du bus Watt System choisie par la société PVI.

À chaque arrêt, pendant le temps d'échange de passagers, de 20 secondes environ, un bras robotisé situé sur le toit du bus vient se raccorder automatiquement à un Totem accumulateur d'énergie intégré au mobilier urbain et alimenté par le réseau électrique standard (9 à 36 kVA). Le constructeur annonce que l'opération permet de recharger l'ensemble des modules de supercondensateurs du bus.

Une fois l'opération effectuée, le bus dispose d'une autonomie lui permettant de rejoindre l'arrêt suivant où le rechargement se fera à nouveau.

N°	Nom de l'arrêt	Totem installé	Distance parcourue par rapport à l'arrêt précédent (m)
1	Terminal 1	Oui	865 (par rapport à l'arrêt 8)
2	Coste & Bellontes	Non	
3	Gare routière	Non	
4	Parking P8	Oui	815
5	Parking P4	Oui	420
6	Parking P9	Oui	485
7	Terminal 2	Oui	845
8	Frêt	Oui	440
9	Pôle technique	Non	

Figure 2 : parcours de bus de l'aéroport de Nice

**Q1.** À 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.

**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.

Le tableau suivant représente différentes solutions technologiques envisageables pour la réalisation de l'accumulateur (stockage de l'énergie).

Technologie	Énergie massique ( $W \cdot h \cdot kg^{-1}$ )	Nombre de charges maximal
Plomb-acide	40	400 - 800
Ni-MH (Nickel-Hydrure Métallique)	85	800 – 1 000
LMP (Lithium Métal Polymère)	110	1 000 – 2 000
Lithium-ion	180	500 – 1 000
Supercondensateur	7	1 000 000 – 2 000 000

Figure 3 : tableau comparatif des technologies d'accumulateurs

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

La consommation d'énergie par kilomètre d'un bus électrique équipé d'accumulateurs est généralement égale à  $1\,200\text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{km}^{-1}$ , cette consommation intégrant l'énergie motrice et les servitudes du bus (éclairage, chauffage, climatisation...). Cette valeur a conduit les concepteurs à déterminer l'énergie  $E_{base}$  nécessaire au bus pour relier les deux stations les plus éloignées :  $E_{base} = 1,038\text{ kW}\cdot\text{h}$ .

**Q4.** Sachant qu'un bus équipé d'accumulateurs 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 supercondensateurs permettant de couvrir la plus grande des distances entre deux stations (tableau figure 2).

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

## 2. Estimation des besoins énergétiques entre deux Totems

**Objectif(s) de cette partie :** vérifier que l'énergie stockée dans les supercondensateurs est suffisante pour que le bus relie deux stations sur un parcours plat.

Afin de calculer l'énergie consommée par le bus sur un parcours plat entre les deux stations les plus éloignées, il faut dans un premier temps réaliser une étude dynamique du bus afin de déterminer la force motrice ( $\vec{F}_m$ ) permettant de déplacer ce dernier. Puis, il faut calculer la puissance motrice et en déduire l'énergie consommée par le bus sur ce même parcours.

Une étude dynamique (figure 4) a permis de modéliser les actions mécaniques sur le bus en phase d'accélération :

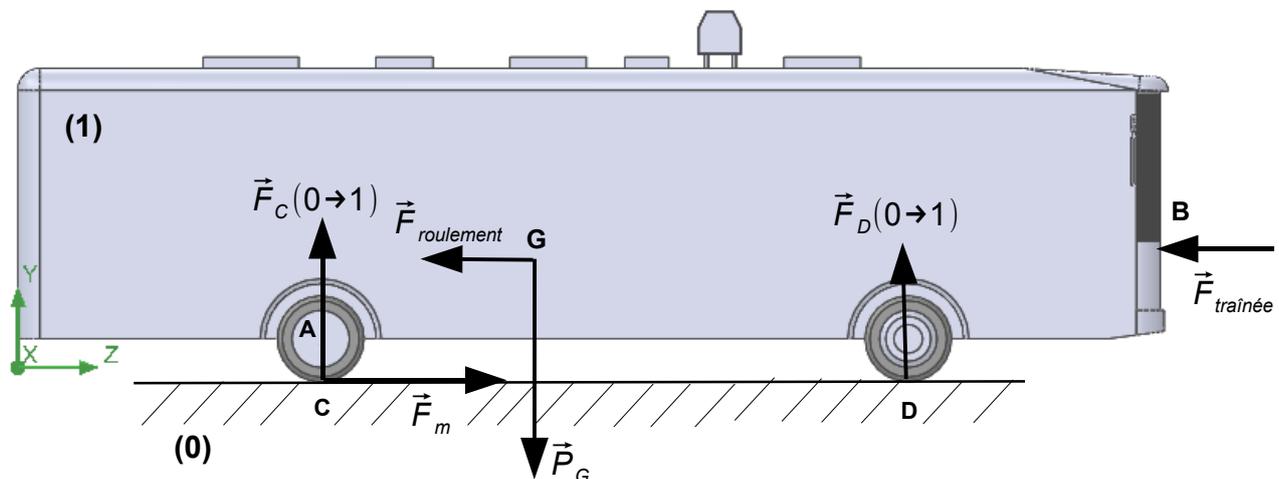


Figure 4 : modélisation des actions mécaniques sur le bus WATT System

$\vec{F}_C(0 \rightarrow 1)$  est l'effort de réaction du sol sur l'essieu arrière.

$\vec{F}_D(0 \rightarrow 1)$  est l'effort de réaction du sol sur l'essieu avant.

$\vec{F}_{roulement}$  est l'effort de résistance au roulement.

$\vec{F}_{trainée}$  est l'effort de traînée aérodynamique (action de l'air sur le bus).

$\vec{F}_m$  est la force motrice du bus.

$\vec{P}_G$  est le poids du bus.

$\vec{a}_G$  est l'accélération du bus au point G.

La masse moyenne  $m$  du bus avec les passagers est d'environ 20 tonnes, le diamètre  $D$  des pneumatiques vaut 0,904 m.

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

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

On prendra comme valeur pour la suite du sujet  $F_{\text{traînée}} = -270 \text{ N}$  et  $F_{\text{roulement}} = -2170 \text{ N}$ .

La figure 5 présente l'évolution de la vitesse et de la force motrice du bus entre les deux arrêts (8) et (1).

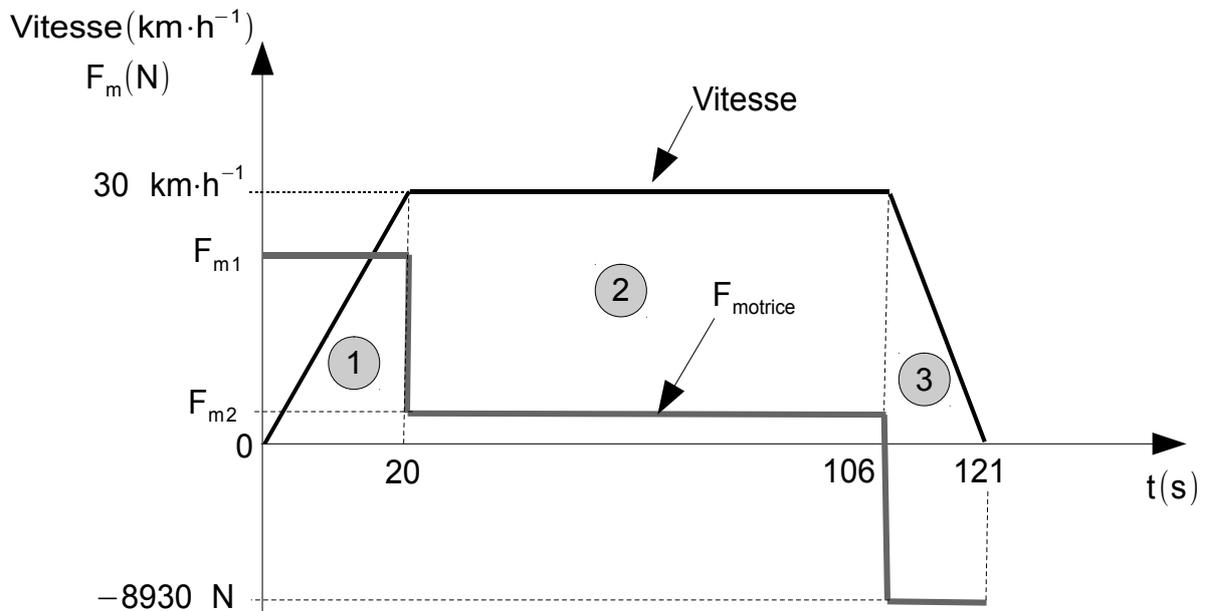


Figure 5 : évolution de la force motrice et de la vitesse en fonction du temps

On négligera la force de traînée pour les phases d'accélération (1) et de décélération (3). Lors de la phase de décélération (3), l'énergie est récupérée dans les supercondensateurs.

**Q8.** À 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 phase (1) de 0 s à 20 s. Puis, **calculer** la force motrice  $F_{m2}$  pour la phase (2) de 20 s à 106 s.

Quelles que soient les valeurs trouvées à la question 8, on prendra comme valeurs pour la suite du sujet  $F_{m1} = 10500 \text{ N}$  et  $F_{m2} = 2440 \text{ N}$ .

**Q9.** Sur le document réponse DR1 page 18, **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  $P_3$ .

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

### 3. Déploiement de ce système sur d'autres sites

**Objectif(s) de cette partie :** élaborer et valider un modèle multi-physique du système en vue d'analyser son déploiement sur d'autres sites.

Une chaîne d'acquisition a permis à la société PVI d'effectuer des relevés sur le bus WATT System pendant sa phase d'expérimentation. L'étude suivante exploite le relevé de vitesse effectué sur le tronçon entre l'arrêt (8) et l'arrêt (1) distants de 865 m (figure 2).

Le document technique DT2 présente la modélisation multi-physique de la chaîne d'énergie à partir du variateur. Ce modèle permet de calculer l'énergie motrice nécessaire au déplacement du bus quand il suit un profil de vitesse donné en entrée.

**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  $W \cdot h$ .

L'exploitation du modèle présenté dans le document technique DT2 a permis d'obtenir l'évolution de l'énergie motrice en fonction du temps sur le tronçon (8) → (1), présenté figure 6.

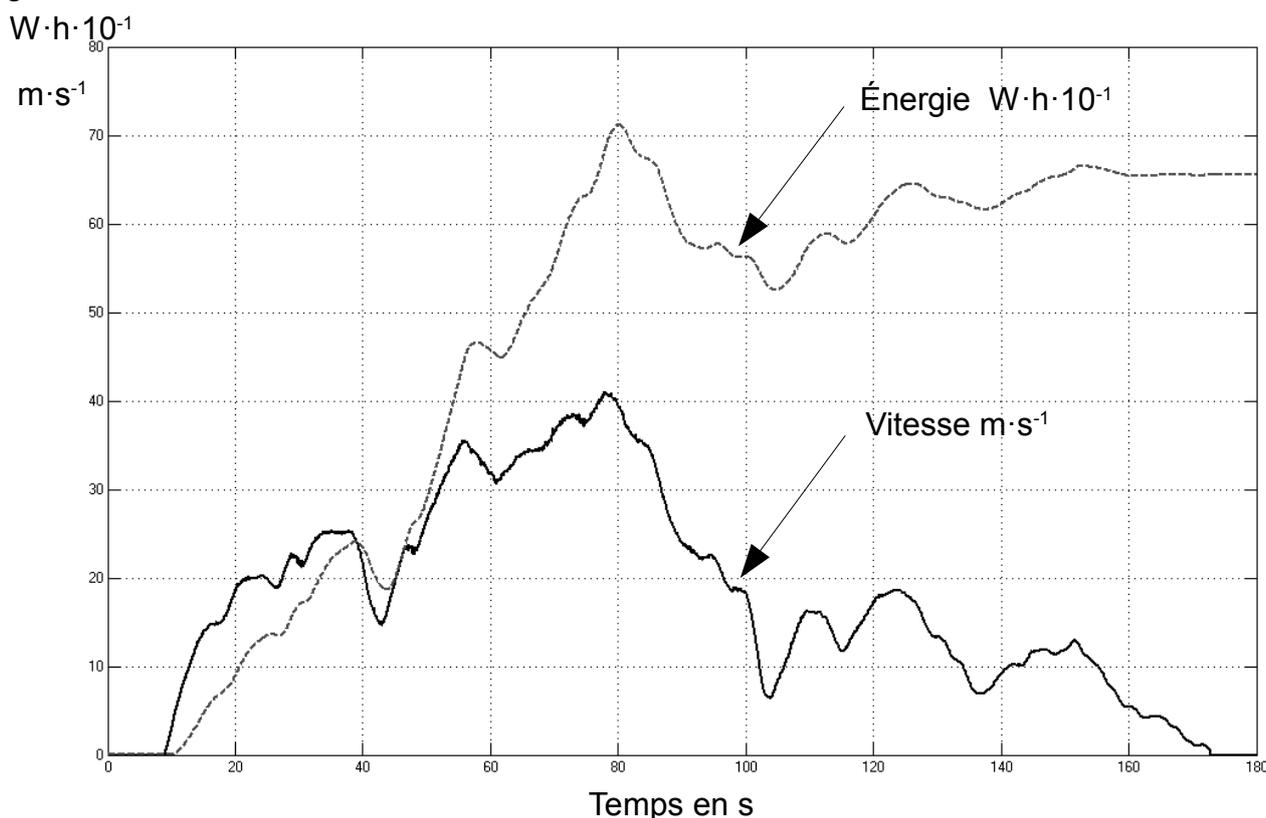
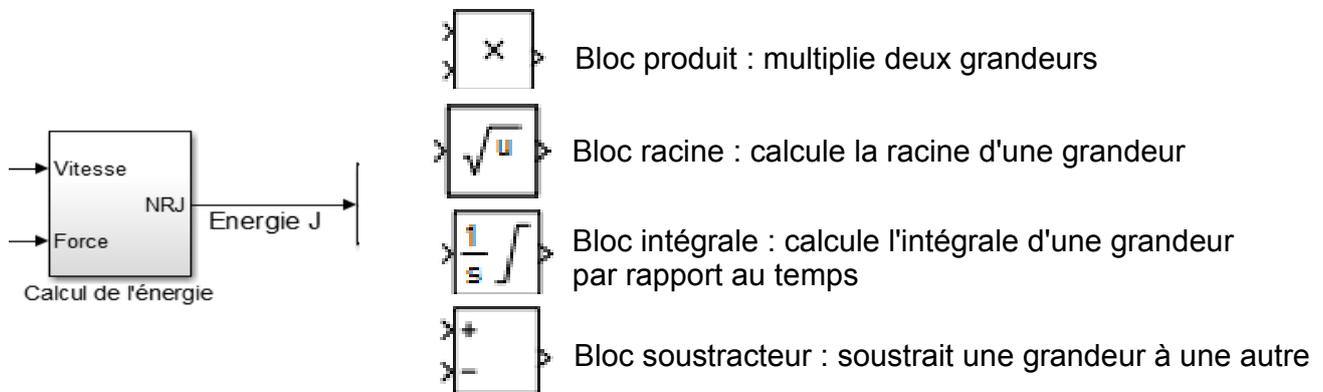


Figure 6 : vitesse et énergie motrice du bus en fonction du temps obtenues à partir du modèle

Le calcul de l'énergie motrice a été réalisé avec plusieurs blocs regroupés en un seul afin de simplifier la représentation générale du modèle. On rappelle que la valeur de l'énergie est obtenue en calculant l'intégrale de la puissance par rapport au temps.



**Q12. Identifier** la grandeur de flux et la grandeur d'effort, ainsi que leur unité, en entrée du bloc « calcul de l'énergie » du document DT2. En utilisant les blocs présentés ci-dessus (figure 7), **réaliser** le modèle permettant de calculer l'énergie motrice en Joules en précisant les grandeurs qui apparaissent sur chacune des liaisons.

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

La phase expérimentale a permis de relever la valeur de l'énergie consommée en amont du convertisseur électro-mécanique  $E_{moteur} = 711 \text{ W}\cdot\text{h}$ .

**Q14.** Sachant que le rendement  $\eta$  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·h. **Comparer**  $E_{méca1}$  et  $E_{méca2}$ , **conclure** sur la validité du modèle (déterminer l'écart relatif).

#### 4. Charge rapide des supercondensateurs

**Objectif(s) de cette partie : valider** la recharge du bus en 20 secondes.

Le raccordement électrique du bus au Totem est réalisé grâce à un bras télescopique équipé d'un connecteur électrique. Le temps nécessaire pour le déploiement du bras est de 6 secondes, le temps de repliement du bras est de 4 secondes maximum.

Le temps d'arrêt, déplacement du bras télescopique compris (aller et retour), ne doit pas excéder 20 secondes pour une recharge de 1,038 kW·h.

Le stockage de l'énergie est réalisé :

- côté bus, par association en dérivation de 3 branches constituées chacune de 16 modules de supercondensateurs raccordés en série ;
- côté Totem, par association en dérivation de 2 branches constituées chacune de 14 modules de supercondensateurs raccordés en série.

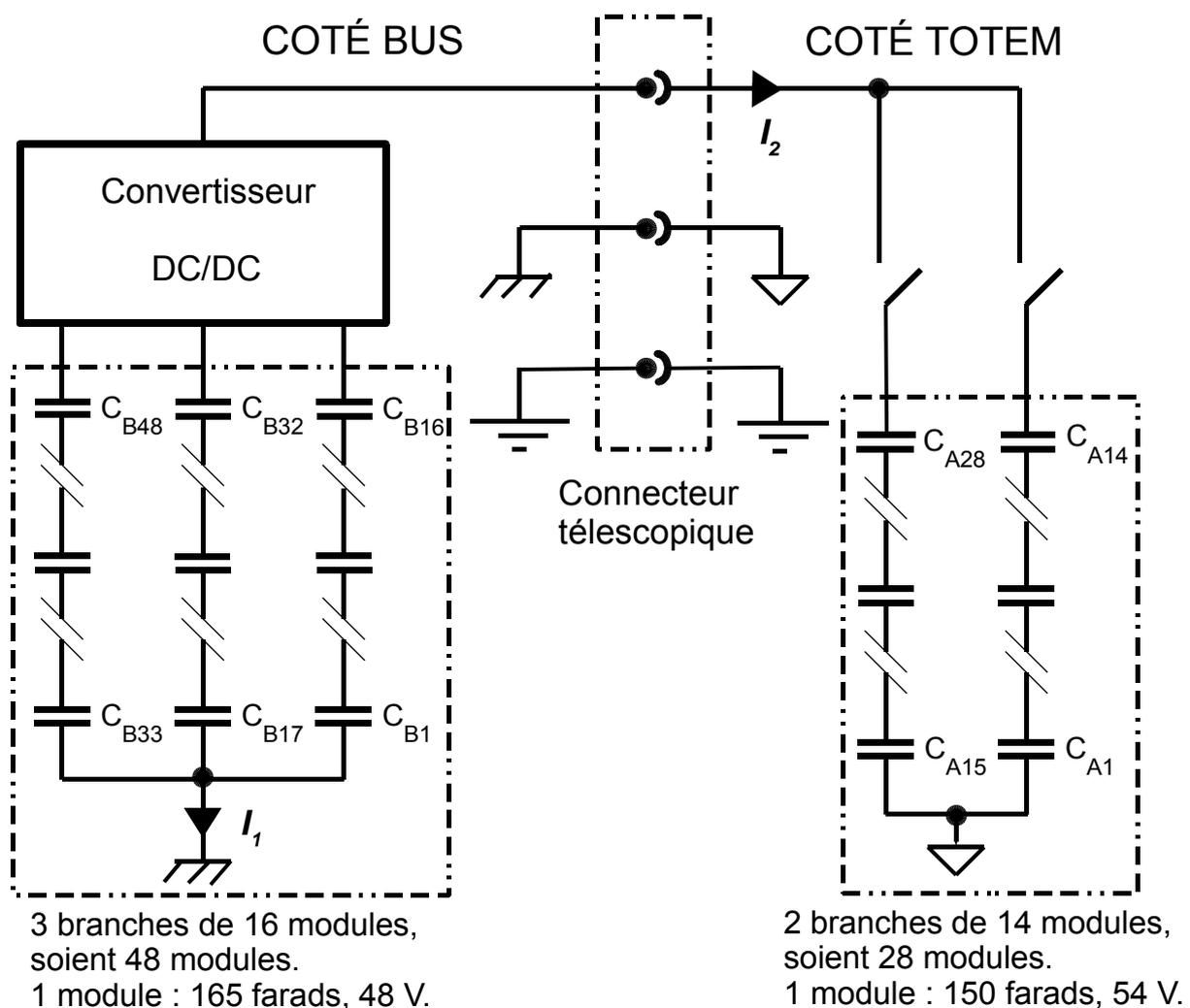


Figure 8 : représentation simplifiée du circuit électrique de recharge du bus

**Q15.** Déterminer le temps maximal disponible pour effectuer le transfert d'énergie du côté Totem vers le côté bus.

L'énergie  $W$  stockée sous forme électrostatique dans un condensateur de capacité  $C$  et de tension à ses bornes notée  $U$ , s'écrit :  $W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$ .

La circulation du courant dans les supercondensateurs provoque des pertes par effet Joule.

### Énergie qui peut être stockée dans le bus

Les caractéristiques unitaires pour un module supercondensateur sont :

- capacité nominale de 165 farads ;
- tension nominale de 48 V.

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

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

Afin de vérifier la capacité du système à effectuer une recharge suffisante pendant l'arrêt du bus dans la station, un modèle a été établi. Les paramètres de ce modèle sont :

- les valeurs de capacité de l'ensemble des supercondensateurs,  $C_{1eq}$  côté bus et  $C_{2eq}$  côté Totem ;
- les tensions initiales aux bornes de  $C_{1eq}$  et de  $C_{2eq}$  ;
- le courant  $I_2$  parcourant le groupement  $C_{2eq}$  et maintenu à une valeur constante par l'intermédiaire du convertisseur DC / DC ;
- les résistances non représentées sur la figure 8, côté bus et côté Totem, représentant les pertes par effet Joule dans les supercondensateurs ( $P_{Joule}$ ).

Le modèle utilise les équations présentées dans le tableau de la figure 9.

$U_1(t) = \frac{1}{C_{1eq}} \cdot \int I_1(t) \cdot dt$	$U_2(t) = \frac{1}{C_{2eq}} \cdot \int I_2(t) \cdot dt$	$U_1(t) \cdot I_1(t) + U_2(t) \cdot I_2(t) + P_{Joule} = 0$
Grandeurs côté bus	Grandeurs côté Totem	$P_{Joule}$ : côté bus et côté Totem

Figure 9 : relations entre tensions et courants.

Les valeurs algébriques des grandeurs  $U_1$ ,  $I_1$ ,  $U_2$ ,  $I_2$  respectent la convention récepteur.

Pour déterminer les valeurs des capacités équivalentes nécessaires au modèle, on rappelle les règles d'association en série et en parallèle pour des condensateurs :

- la valeur  $C_{eq}$  du condensateur équivalent à  $n$  condensateurs raccordés en série tels que  $C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n = C$  est  $C_{eq} = \frac{C}{n}$  ;
- la valeur  $C_{eq}$  du condensateur équivalent à  $n$  condensateurs raccordés en parallèle tels que  $C_1 = C_2 = \dots = C_i = \dots = C_n = C$  est  $C_{eq} = C \cdot n$ .

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

Quelles que soient les valeurs déterminées à la question 17, on utilisera, pour la suite de l'étude, la valeur suivante :  $C_{2eq} = 21,4$  farads.

Le résultat de la simulation sur une durée de 10 secondes est représenté figure 10.

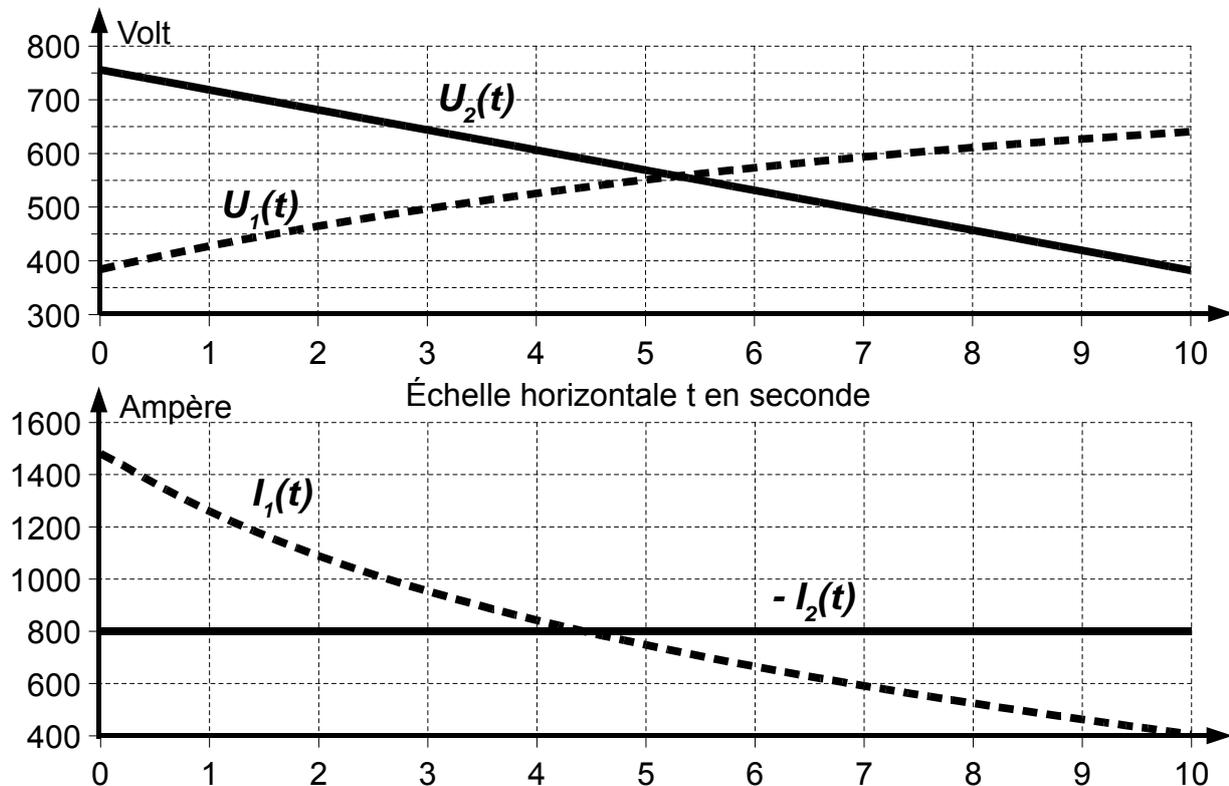


Figure 10 : résultat de la simulation, évolution de  $U_2(t)$ , de  $U_1(t)$ , de  $-I_2(t)$  et de  $I_1(t)$

Lors du transfert, la tension  $U_2$  aux bornes de  $C_{2eq}$  évolue de 756 V à 382 V, les pertes par effet Joule déterminées par la simulation atteignent 49,4 W·h côté bus et 80,7 W·h côté Totem.

**Q18.** À 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.

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

Les conditions d'exploitation de la ligne de transport font apparaître une fréquence de passage sur une borne de recharge, désignée par « Totem », de 2 à 6 par heure.

La figure 11 représente la chaîne d'énergie du redresseur-chargeur.

Le poste est alimenté en triphasé sous 400 volts pour une puissance de 9 kVA.

Le facteur de puissance vis-à-vis du réseau Enedis (ERDF)  $F_p$  est de 0,95.

Le rendement global du bloc redresseur-chargeur  $\eta$  est de 95 %.

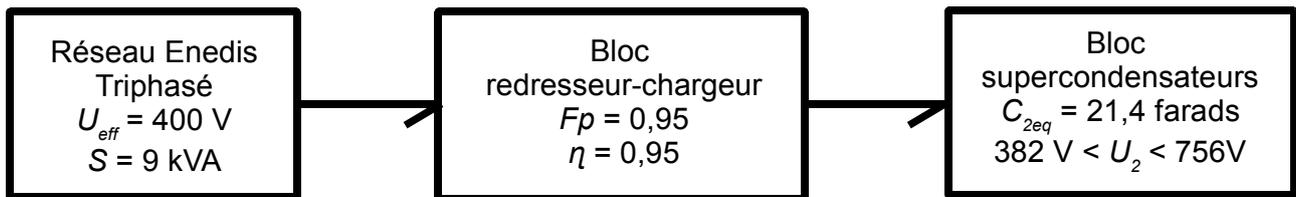


Figure 11 : chaîne d'énergie du chargeur dans la borne

La puissance transférée aux supercondensateurs est définie par la relation suivante :

$$P_c = S \cdot F_p \cdot \eta$$

**Q19. Calculer** la durée 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.

## 5. Contrôle de la charge rapide des supercondensateurs

**Objectif(s) de cette partie :** compléter l'algorithme de commande permettant de contrôler le transfert de l'énergie du Totem vers le bus lors d'un arrêt.

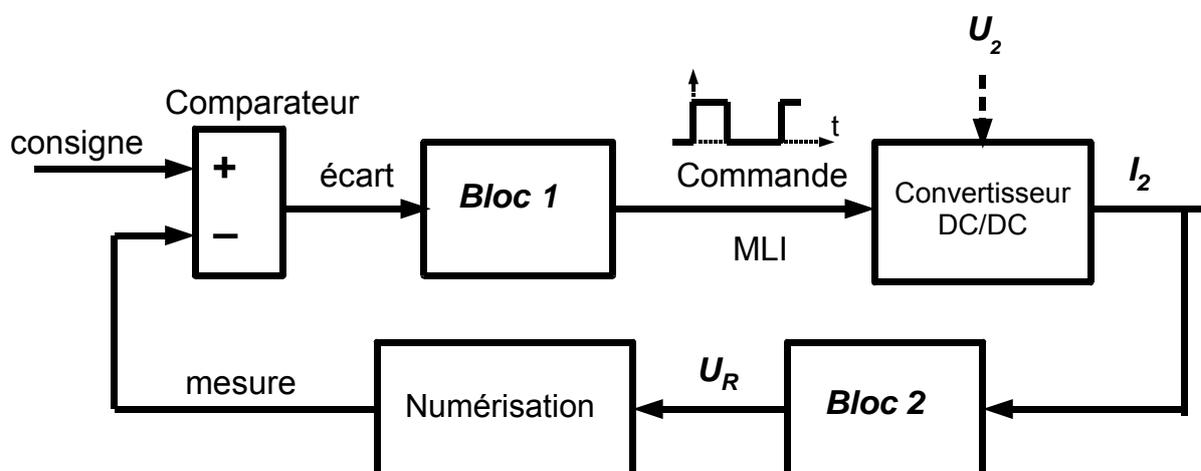
Le transfert de charges entre les deux groupements de supercondensateurs est réalisé en maintenant  $I_2(t) = \text{constante}$ .

Le courant  $I_2$  est asservi pendant toute la phase de transfert.

L'image du courant, obtenue grâce à un capteur, vient agir sur la commande du convertisseur DC/DC par l'intermédiaire d'un sous-programme de régulation qui fait l'objet de l'étude ci-dessous.

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

La figure 12 représente la boucle de contrôle du courant  $I_2$ .

Figure 12 : schéma du système de contrôle du courant  $I_2(t)$

**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 courant  $I_2$  est mesuré par un transducteur dont la caractéristique est parfaitement linéaire. Le transducteur délivre une différence de potentiel de  $\pm 4$  volts lorsque le courant évolue de  $\pm 1000$  ampères.

Le signal  $U_R$  obtenu en sortie du transducteur est numérisé par un convertisseur analogique-numérique 16 bits puis transmis par liaison série synchrone au ordinateur (voir figure 13).

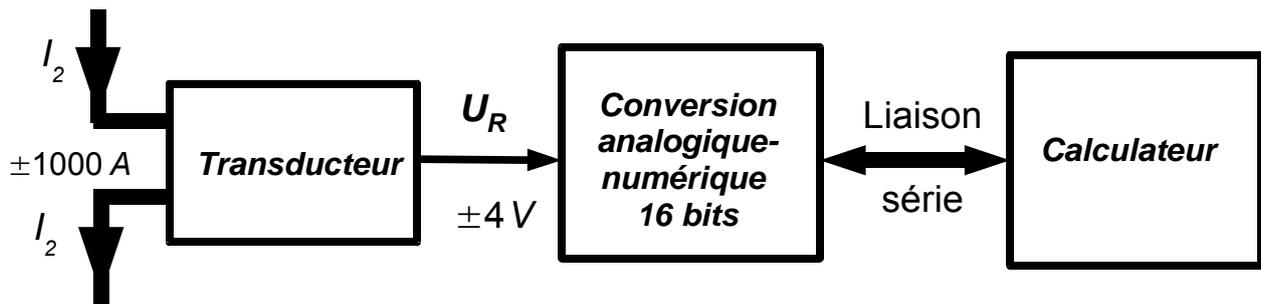


Figure 13 : chaîne d'acquisition du courant  $I_2$

La caractéristique  $N = f(U_R)$  du convertisseur analogique-numérique est considérée comme parfaitement linéaire.

Quelques valeurs particulières de cette caractéristique sont indiquées dans le tableau de la figure 14.

Tension d'entrée	$N$	Tension d'entrée	$N$	Tension d'entrée	$N$
$\geq +4,096$ Volts	65535	...		$- 2,048$ Volts	16384
...	...	0 Volt	32768	...	...
$+2,048$ Volts	49152	...		$\leq - 4,096$ Volts	0

Figure 14 : conversion analogique-numérique 16 bits

Le nombre  $N$  sera utilisé, après traitement, dans le sous-programme de contrôle du courant  $I_2$  en tant que variable « *mesure* ».

L'algorithme du sous-programme de contrôle du courant  $I_2$  est décrit partiellement dans le document réponse DR2.

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

**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 page 19.

Le sous-programme de contrôle du courant  $I_2$  compare la variable « *consigne* » avec la variable « *mesure* » (voir figure 12). La variable « *écart* » est multipliée par 5 puis limitée entre 0 et 1 avant d'être renvoyée au programme principal sous la forme de la variable « *commande* ».

La variable « *commande* » renvoyée par le sous-programme de contrôle du courant  $I_2$  permet d'élaborer un signal MLI (modulation de largeur d'impulsion) variable de 0 à 100 % destiné au convertisseur DC/DC. Cela permet de faire varier la valeur du courant  $I_2$ .

**Q23. Compléter** l'algorithme du document réponse DR2 page 19.

Pour garantir un courant de charge stable, le sous-programme de contrôle du courant  $I_2$  doit être exécuté à une fréquence de 100 Hz.

Le convertisseur analogique-numérique dialogue avec le calculateur (figure 13) par l'intermédiaire d'un bus série de type synchrone dont l'horloge a une fréquence de 200 kHz.

Il faut 32 périodes de ce signal d'horloge pour traiter le sous-programme **Acquisition\_Courant()** appelé par le sous-programme de contrôle du courant  $I_2$ .

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

## 6. Synthèse

---

**Objectif(s) de cette partie :** proposer une synthèse de l'étude.

---

**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.

## Document technique DT1. Modélisation des efforts résistants

### 1- Résistance au roulement en ligne droite $F_{roulement}$

Cette action mécanique de résistance est créée par les déformations au niveau des pneumatiques et de la chaussée. Elle est d'autant plus grande que le rayon du pneumatique est faible et que la déformation du pneu est grande (exemple : pneus sous gonflés). On peut modéliser cette action mécanique par la relation suivante :

$$\frac{F_{roulement}}{\|\vec{P}\|} = -\frac{\delta}{R}$$
 où  $\|\vec{P}\|$  est le poids du bus,  $\delta$  le coefficient de résistance au roulement et  $R$  le rayon extérieur des roues.

Matériaux en contact	Coefficient $\delta$ en m
Acier / acier	0,0004
Fonte / bitume	0,0008
Pneumatique / bitume	0,005
Roue de wagon / rail	0,0005

Figure 15 : coefficients de résistance au roulement

**2- La traînée aérodynamique  $F_{traînée}$**  . En mécanique des fluides, la traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz. Une modélisation sous logiciel a permis de réaliser une étude de l'écoulement de l'air sur le bus et de faire apparaître les efforts de traînée en fonction de la vitesse du véhicule.

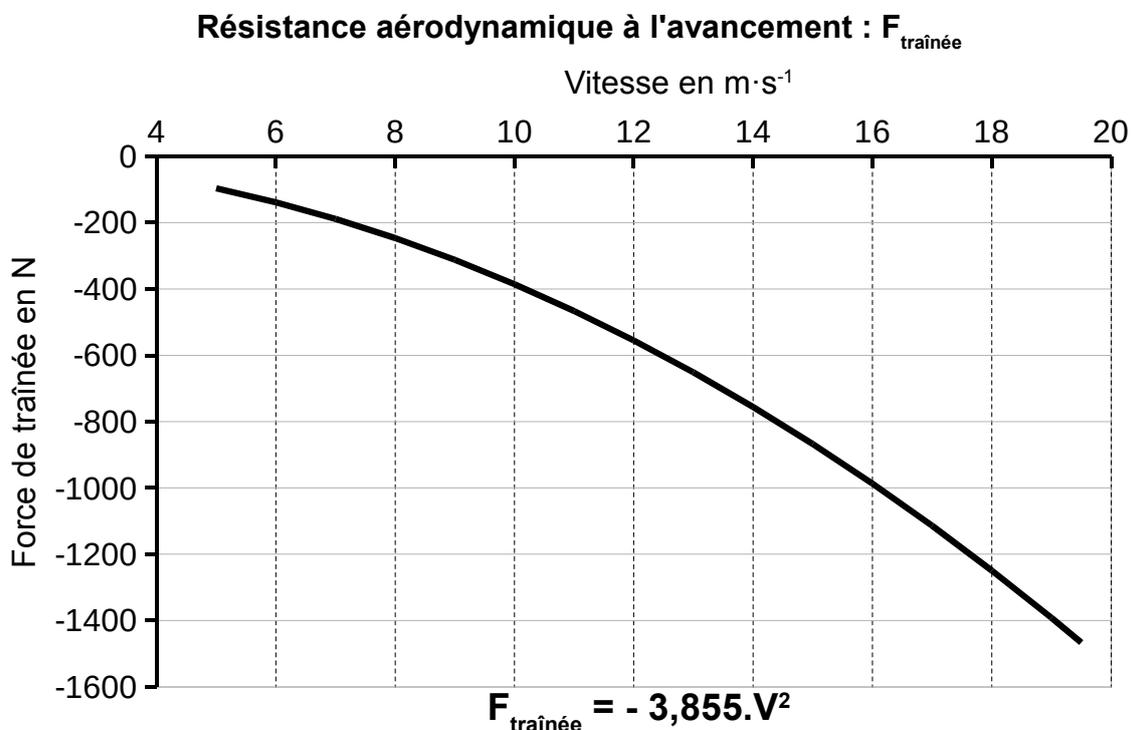


Figure 16 : modélisation complète de l'effort de traînée en fonction de la vitesse du bus

Document technique DT2.

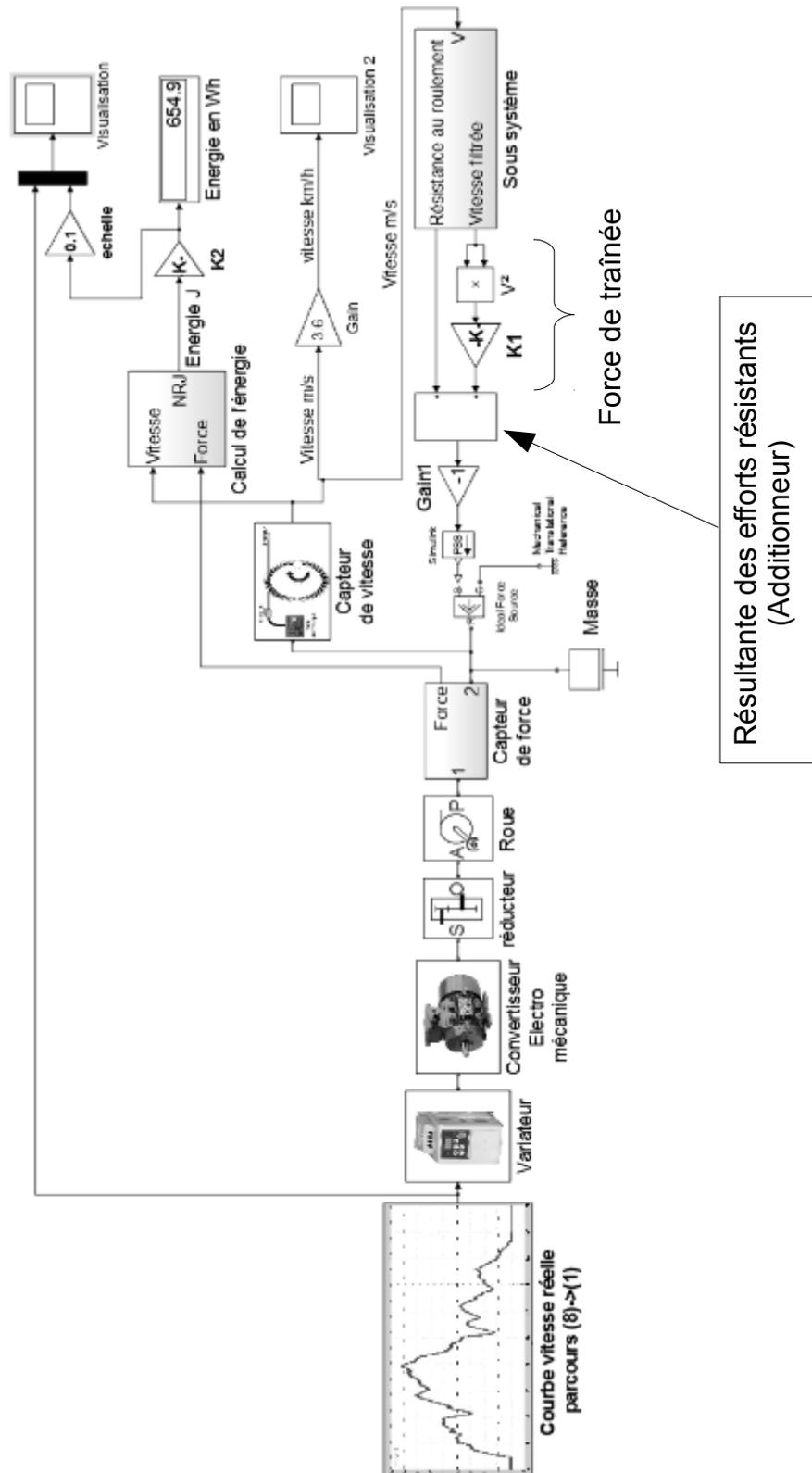
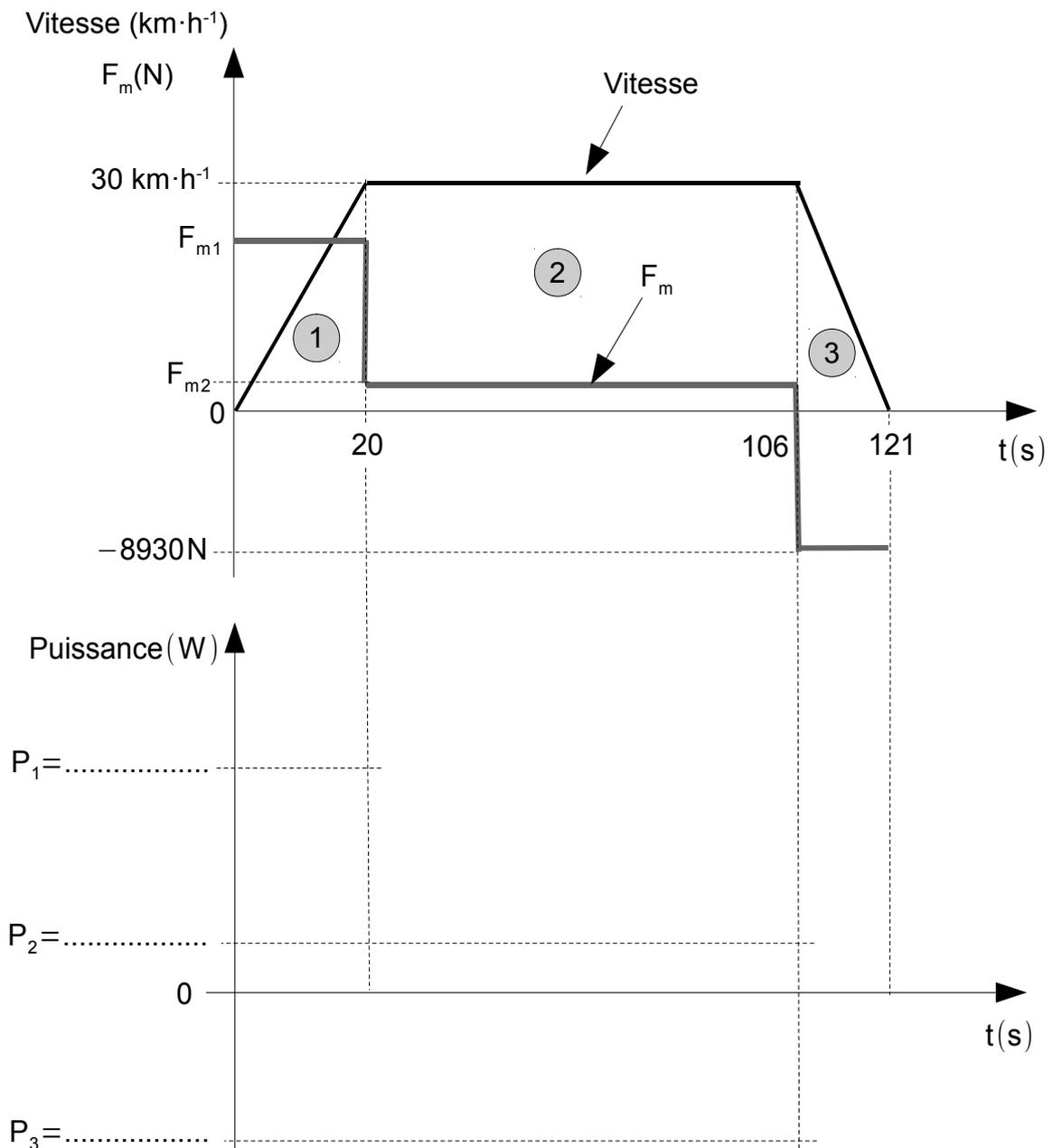


Figure 17 : modélisation multi-physique de la chaîne d'énergie du bus Watt System

À rendre avec la copie

Document réponse DR1.

Q9. Tracer sur le graphique ci-dessous la puissance en watt en fonction du temps pour les trois phases en précisant les valeurs de  $P_1$ ,  $P_2$  et  $P_3$ .



**À rendre avec la copie****Document réponse DR2.****Q22. Q23.**

Algorithme du sous programme de contrôle du courant  $I_2$ , appelé par le programme principal toutes les 0,01 secondes.

La variable « *consigne* » est passée en argument.

Les variables  $G_p$ ,  $N$ , *mesure* et *erreur* sont des variables internes au sous-programme,

La variable *commande* est renvoyée par le sous programme de contrôle du courant  $I_2$ .

Algorithme	Commentaires
<b>DÉBUT</b>	
$G_p \leftarrow 5$	// L'écart est traité par un régulateur de // type proportionnel
$N \leftarrow \text{Acquisition\_Courant}()$	// Appel du sous-programme // <b>Acquisition_Courant()</b> qui renvoie la //valeur du courant $I_2$ sous la forme d'un //nombre qui est stocké dans la variable $N$ .
$mesure \leftarrow \text{-----}$	// Équation de traitement ( Q 22)
$\text{écart} \leftarrow (\text{consigne} - \text{mesure}).$	// Calcul de l'écart
$\text{commande} \leftarrow G_p \times \text{écart}$	// Élaboration de la commande
<b>SI</b> ( $\text{commande} \text{-----}$ )	// Limitation de la commande
<b>ALORS</b> $\text{commande} \leftarrow \text{-----}$	
<b>SINON</b>	
<b>SI</b> ( $\text{commande} \text{-----}$ )	
<b>ALORS</b> $\text{commande} \leftarrow \text{-----}$	
<b>FIN_SI</b>	
<b>FIN_SI</b>	
<b>RENOYER</b> $\text{commande}$	// la variable commande est renvoyée au // programme principal.
<b>FIN</b>	