

SESSION 2017

**CAPET  
CONCOURS EXTERNE  
ET CAFEP**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR  
Option : INGÉNIERIE DES CONSTRUCTIONS  
Option : INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE  
Option : INGÉNIERIE INFORMATIQUE  
Option : INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

**ANALYSE ET EXPLOITATION PÉDAGOGIQUE D'UN SYSTEME  
PLURITECHNIQUE**

Durée : 5 heures

*Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.*

*L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

Ce sujet comporte 3 parties :

- présentation et travail demandé pages **2** à **27** ;
- documents annexes techniques et pédagogiques pages **28** à **38** ;
- documents réponses pages **39** à **47**.

**Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.**

## INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Concours externe du CAPET de l'enseignement public :

• **option : Ingénierie des constructions**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1411E	101	1098

• **option : Ingénierie électrique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1412E	101	1098

• **option : Ingénierie informatique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1413E	101	1098

• **option : Ingénierie mécanique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1414E	101	1098

► Concours externe du CAFEP/CAPET de l'enseignement privé :

• **option : Ingénierie des constructions**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1411E	101	1098

• **option : Ingénierie électrique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1412E	101	1098

• **option : Ingénierie informatique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1413E	101	1098

• **option : Ingénierie mécanique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1414E	101	1098

## I. MISE EN SITUATION

### 1. Contexte général

La RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) assure l'exploitation des transports en commun de la ville de Paris et de sa banlieue.

Dans le cadre de cette exploitation, la politique de renouvellement du matériel roulant ferroviaire de la RATP conduit au remplacement des matériels lorsqu'ils atteignent une durée de vie fixée à trente-cinq ans d'utilisation.



Figure 1 : rame MF 2000 sur le pont d'Austerlitz



Figure 2 : rame MF 2000

En 1998, la majorité des lignes de métro à Paris étaient équipées par les rames MF 67, construites entre 1967 et 1976. En prévision de leur remplacement, la RATP a alors lancé un appel à candidature pour la réalisation du MF 2000 auprès de tous les constructeurs ferroviaires européens.

Depuis 2008, le **MF 01** (Metro Fer Commande 2001, dénomination technique) ou **MF 2000** (Metro Fer appel d'offre 2000, dénomination commerciale) équipe progressivement les lignes 2, 5 et 9 du métro parisien.

### 2. Un métro plus écologique

Le MF 2000 consomme 30 % d'énergie en moins que la génération de métro précédente. Cette économie a été réalisée grâce à l'amélioration du rendement de la chaîne de traction et à un freinage électrique à récupération d'énergie. La limitation de la vitesse maximale du train à  $70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a permis d'optimiser le dimensionnement des moteurs et de la chaîne de traction, permettant des gains significatifs de consommation d'énergie aux vitesses plus basses, les plus couramment utilisées en exploitation.

De plus, les MF 2000 sont équipées de la ventilation réfrigérée, permettant de réaliser d'importantes économies d'énergie par rapport à une climatisation classique.

### 3. Un métro plus sécurisé

Le MF 2000 embarque plusieurs ordinateurs dédiés à la gestion des équipements de sécurité. L'ouverture des portes est automatique et contrôlée par un équipement fixe installé sur la voie et un système de détection monté sur le train. L'ajout de cette fonctionnalité permet de garantir une meilleure sécurité des usagers et de limiter les risques d'incidents dans les rames et sur les quais.

Un autre aspect essentiel dans le transport de passager est celui de la gestion des accélérations et des décélérations subies par les passagers dans les différentes phases du trajet.

#### **4. Un métro plus confortable pour les usagers**

Les principales améliorations apportées au confort des voyageurs lors de la conception du métro MF 2000 sont :

- la possibilité de circuler entre les voitures ;
- l'abaissement du plancher par rapport au quai (meilleure accessibilité) ;
- l'information des voyageurs par des annonces sonores à chaque station et des plans de ligne lumineux au-dessus des portes indiquant les stations restant à desservir ;
- la réduction du nombre de places assises et la mise en place de sièges plus larges ;
- les sièges « sans pied », pour un meilleur stockage des bagages ;
- les barres de maintien triples ;
- les larges ouvertures des portes, réduisant les temps d'attente en station.



**Figure 3 : intérieur de la rame de pré-série**

#### **5. Problématique générale du sujet**

L'étude porte sur la vérification du respect des exigences liées aux trois contraintes de conception énoncées ci-dessus : un métro plus écologique, plus sûr et plus confortable.

À ces trois exigences, s'ajoute le fait que la mise en place de ces nouvelles rames ne doit pas conduire à la dégradation des conditions de circulation des trains sur le réseau parisien. Les exigences liées à la fluidité du trafic devront donc elles aussi être validées.

Les différentes parties de ce sujet s'organisent de la façon suivante :

- une première partie concerne l'étude du respect des exigences liées à la circulation des trains et conduit à la validation du dimensionnement de la chaîne de traction du train ;
- une seconde partie concerne le respect des exigences liées à la sécurité et permet la validation des performances des blocs de freinage mécaniques lors d'un freinage d'urgence ;
- une troisième partie concerne le respect des exigences liées au confort des passagers. Cette partie contient plusieurs sous-parties, liées à la validation des performances du système de ventilation des voitures, au dimensionnement d'une forme de siège innovante et à l'analyse du système d'affichage du plan de ligne ;
- une dernière partie, complètement indépendante des précédentes, concerne la mise en place d'une séquence pédagogique.

## 6. Extrait du cahier des charges de la conception du train MF 2000

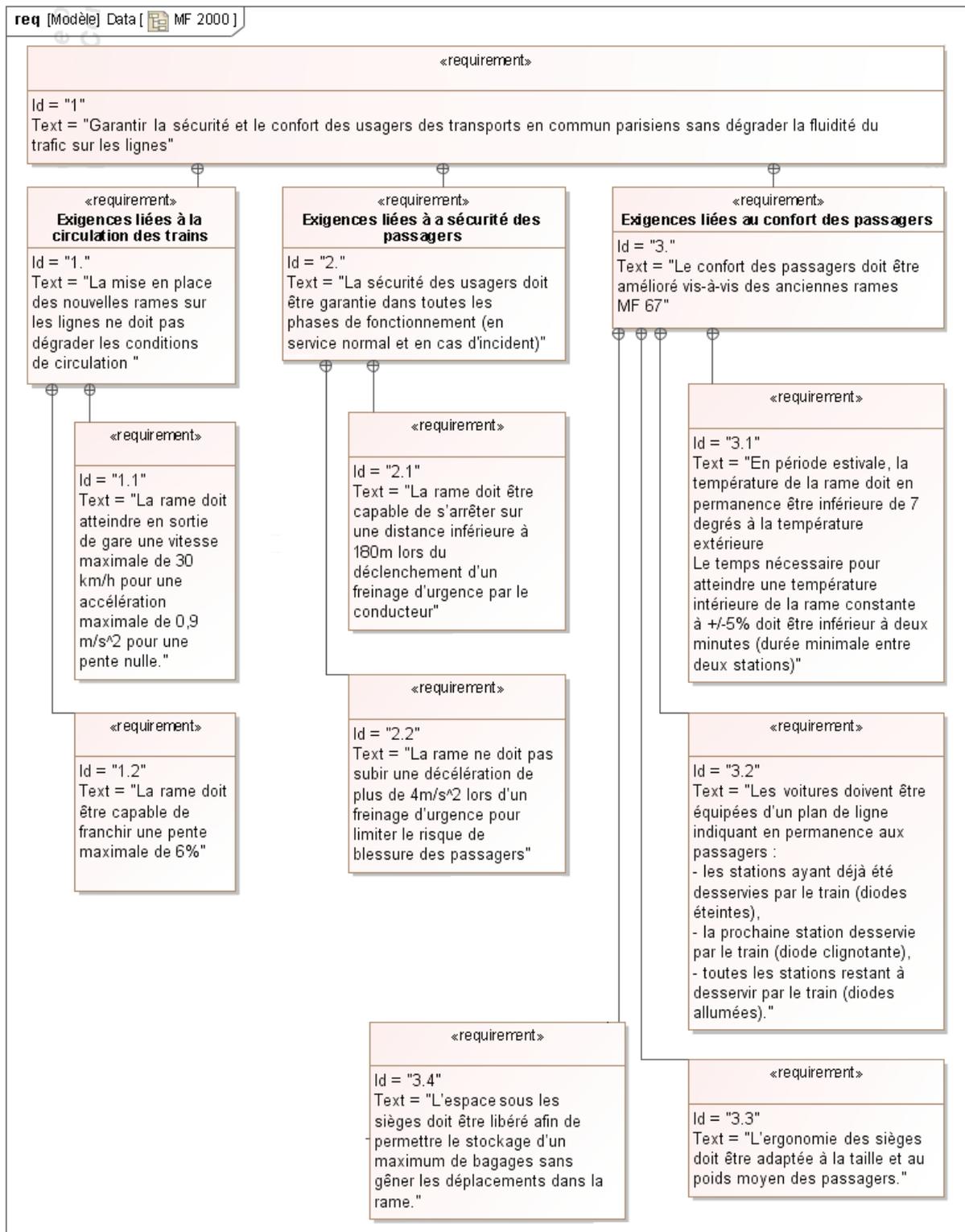


Figure 4 : diagramme des exigences partiel de du train MF 2000

## II. RESPECT DES EXIGENCES LIÉES À LA CIRCULATION DES TRAINS ET À LA CONSOMMATION EN ÉNERGIE

**Objectif :** vérifier le dimensionnement du couple maximal du moteur et valider le franchissement des portions en pente maximale.

Les exigences associées à la bonne circulation des trains sont rappelées ci-dessous.

1. Exigences liées à la circulation des trains et à la consommation en énergie	
1.1.	Le train doit atteindre, en sortie de gare et pour une pente nulle, une vitesse maximale de $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour une accélération maximale de $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .
1.2	Le train doit être capable de franchir une pente maximale de 6 % sans contrainte de vitesse.

Un train **MF 2000** est composé de 5 voitures (figure 5). Les deux remorques extrêmes avec cabine (notées S1 et S2 sur la figure 5) ne sont pas motorisées. Elles sont équipées chacune de 2 bogies porteurs à deux essieux. Les deux motrices intermédiaires (notées N1 et N2 sur la figure 5) et la motrice centrale (notée NAC sur la figure 5) sont équipées chacune de 2 bogies moteurs à deux essieux.

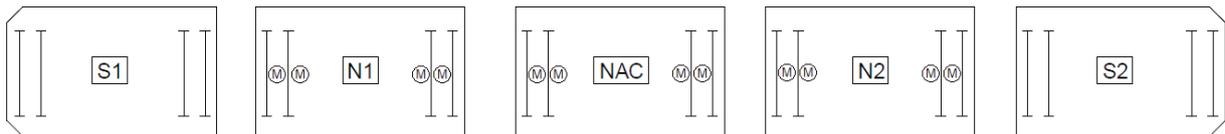


Figure 5 : répartition des moteurs sur les essieux d'un train MF 2000

Chaque moteur entraîne un essieu au travers d'un réducteur ayant un rapport de réduction  $\frac{\omega_r}{\omega_m} = \frac{1}{N}$  avec

$N = 7,28$  (réducteur à engrenage à simple rapport 131/18).

Les pertes dans le réducteur sont supposées nulles dans cette partie et son inertie est considérée comme négligeable devant les autres inerties mises en jeu.

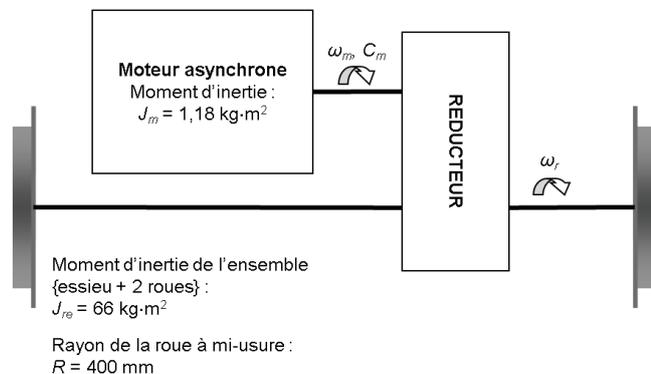


Figure 6 : chaîne cinématique de la motorisation d'un essieu

Type de voiture	S	N	NAC	Total train
Masse statique 6 voyageurs par $\text{m}^2$	35,1	36,8	37,1	$M_6 \approx 181 \text{ tonnes}$

Tableau 1 : masses statiques du train

L'étude menée dans cette partie porte sur le système *train* :

$$\text{train} = \{\text{passagers} + \text{voitures} + \text{moteurs} + \text{réducteurs} + \text{essieux} + \text{roues}\}.$$

Notations :

- l'accélération du train est considérée comme constante et notée  $\vec{\Gamma}_{train/sol} = \Gamma_t \cdot \vec{x}$ , avec  $\Gamma_t > 0$  en phase d'accélération ;
- la vitesse du train est variable et notée  $\vec{V}_{train/sol} = V_t(t) \cdot \vec{x}$  avec  $V_t(t) > 0$  dans cette partie.

Pour dimensionner les moteurs, les ingénieurs utilisent la masse statique du train  $M_6$  mais aussi ce qu'ils appellent la masse dynamique du train. Cette masse  $M_d$  est une masse équivalente correspondant à la prise en compte des inerties des éléments en rotation (roues + essieux et rotor des moteurs) ramenées au centre de gravité du train.

### Question 1

En supposant le roulement sans glissement des roues sur le rail, donner l'expression de la vitesse du train  $V_t$  en fonction de  $\omega_r$  et  $R$ , puis en fonction de  $\omega_m$ ,  $R$  et  $N$ .

L'expression littérale de l'énergie cinétique galiléenne  $E_c$  de l'ensemble *train* est donnée ci-dessous (sachant qu'il y a 20 essieux et 12 moteurs sur un train) :

$$E_c(\text{train} / R_g) = \frac{1}{2} \cdot M_6 \cdot V_t(t)^2 + \frac{20}{2} \cdot J_{re} \cdot \omega_r(t)^2 + \frac{12}{2} \cdot J_m \cdot \omega_m(t)^2 = \frac{1}{2} \cdot (M_6 + M_d) \cdot V_t(t)^2$$

### Question 2

En déduire l'expression et la valeur numérique de la masse équivalente  $M_d$  correspondant aux inerties des éléments en rotation en fonction de  $J_{re}$ ,  $J_m$ ,  $N$  et  $R$ .

Dans la suite de cette partie la valeur de  $M_d$  utilisée sera de 13 tonnes.

### Question 3

Montrer que l'expression de la puissance  $P_g$ , due à l'action de la pesanteur sur le train en montée lorsque la pente forme un angle  $\alpha$  avec l'horizontale est :

$$P_g = P(\text{pesanteur} \rightarrow \text{train} / R_g) = -M_6 \cdot g \cdot V_t \sin \alpha$$

Lorsque le train se déplace sur un tronçon de ligne horizontal en tunnel, il existe une force de résistance à l'avancement, tenant compte à la fois des frottements internes au système *train* et des frottements externes s'appliquant sur ce système. La norme de cet effort tangent à la roue est modélisée par la relation  $R_{av} = A + B \cdot V_t(t) + C \cdot V_t(t)^2$ , avec :

Charge du train	A	B	C
Train avec 6 voyageurs·par m <sup>2</sup>	3 750 N	90 N·s·m <sup>-1</sup>	11,7 N·s <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup>

**Tableau 2 : coefficients A, B et C**

#### Question 4

Montrer que l'expression de la puissance  $P_{av}$ , due à l'effort de résistance à l'avancement est :

$$P_{av} = P(\text{frottements} \rightarrow \text{train}/R_g) = -(A \cdot V_t(t) + B \cdot V_t(t)^2 + C \cdot V_t(t)^3)$$

L'expression de la puissance  $P_{mtot}$  de l'ensemble des moteurs équipant les bogies du train MF 2000 est obtenue en appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble du train :

$$\frac{dE_c(\text{train}/R_g)}{dt} = P_{int}(\text{train}) + P(\text{ext} \rightarrow \text{train}/R_g)$$

#### Question 5

En déduire l'expression littérale de la puissance  $P_m$  d'un moteur sachant qu'il y a 12 moteurs dans un train.

L'exigence 1.1 impose de pouvoir atteindre une vitesse maximale de  $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  pour une accélération maximale de  $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  en sortie de gare pour une pente nulle. En phase d'exploitation, c'est au moment où la vitesse maximale est atteinte qu'un moteur développe son couple maximal.

Les moteurs utilisés sur le train MF 2000 sont des moteurs asynchrones auto-ventilés :

- puissance nominale utile à l'arbre :  $P_{nom} = 105 \text{ kW}$  ;
- couple maximal en traction :  $C_{max} = 885 \text{ N}\cdot\text{m}$  ;
- vitesse nominale :  $N_{nom} = 1800 \text{ tr}\cdot\text{mn}^{-1}$ .

#### Question 6

Déterminer l'expression du couple moteur en fonction de  $P_m$  et  $V_t$ . En déduire la valeur du couple maximal développé par le moteur lors de cette phase d'accélération.

La courbe caractéristique puissance-vitesse maximale, en régime permanent, imposée par la commande de l'onduleur est donnée sur le document réponse DR1.

La pente maximale est de 6 %. Lorsque le train parcourt cette pente dans le sens de la montée, la puissance développée par les moteurs en régime permanent sert principalement à vaincre l'action de la pesanteur et l'expression de la puissance d'un moteur peut alors se réduire à l'expression  $P_m = \beta \cdot M_6 \cdot V_t$ . Pour une pente à 6 %,  $\beta = 1,36 \cdot 10^{-2} \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{km}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

#### Question 7

En déduire à l'aide d'un tracé sur le document réponse DR1, la vitesse maximale du train en régime permanent sur une pente à 6 %.

### Question 8

Vérifier le dimensionnement du couple maximal du moteur choisi ainsi que le respect des deux exigences liées à la circulation des trains.

## III. RESPECT DES EXIGENCES LIÉES À LA SECURITE DES USAGERS

**Objectifs :** choisir un matériau pour les semelles des blocs de freinage, déterminer la décélération subie par les passagers lors d'un freinage d'urgence et valider la distance de freinage du train.

Les exigences associées à la sécurité des passagers en phase de freinage d'urgence sont rappelées ci-dessous.

2. Exigences liées à la sécurité	
2.1	Le train doit être capable de s'arrêter sur une distance inférieure ou égale à 180 m lors du déclenchement d'un freinage d'urgence par le conducteur.
2.2	Le train ne doit pas subir une décélération de plus de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ lors d'un freinage d'urgence pour limiter le risque de blessure des passagers.

Le critère associé à l'exigence 2.2 est issu d'études empiriques qui ont montré que les passagers risquent de chuter à partir d'une décélération de l'ordre de  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Lorsque la décélération reste inférieure à  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ , tous les passagers debout évitent la chute en effectuant un pas de rattrapage.

### 1. Description du système de freinage du train

Lors d'un freinage de service (entrée du train en gare), la commande de freinage est assurée par deux systèmes de freinage, l'un électrique et l'autre mécanique.

Lors d'un freinage d'urgence, seul le freinage mécanique est sollicité. Il doit être dimensionné de manière à valider les exigences de performances et de sécurité.

La figure 7 présente la répartition des systèmes de freinage sur les voitures composant le train MF 2000.

- les motrices N1, N2 et NAC sont chacune équipées de 8 blocs de freins à semelle (un par roue)
- les remorques S1 et S2 sont chacune équipées de 6 blocs de freins à semelle (les essieux extrêmes ne sont pas freinés).

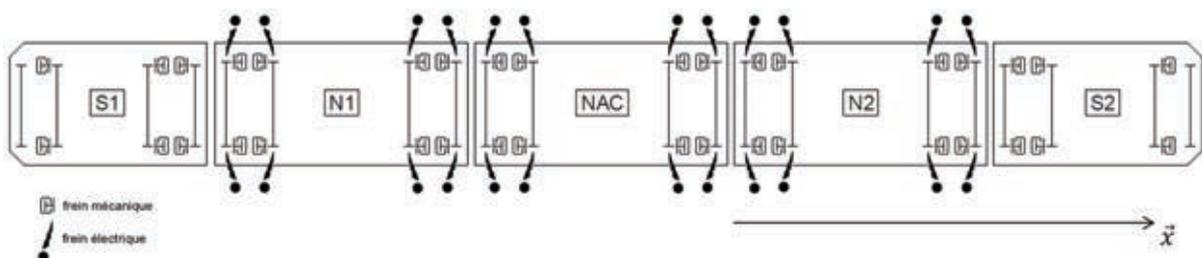
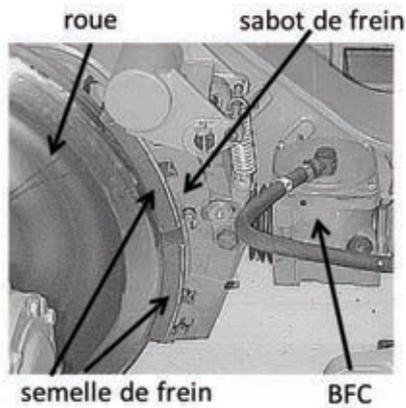


Figure 7 : répartition des systèmes de freinage sur un train MF 2000

Les freins utilisés sur les voitures des trains MF 2000 sont des blocs de freinage compacts (noté BFC) à commande pneumatique (cf. figure 8).



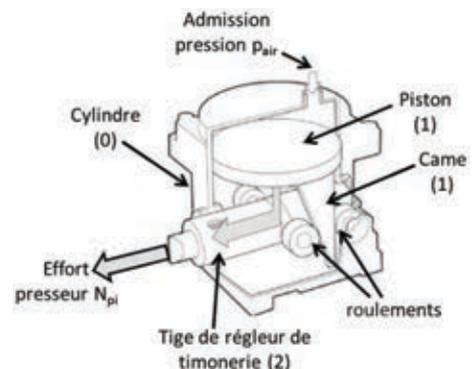
**Figure 8 : bloc de freinage positionné sur le train**

Ils sont équipés d'un boîtier compact comprenant un cylindre de frein pneumatique, un mécanisme d'amplification de la force (par cames) et un régleur de timonerie.

Les différents éléments composant le système sont présentés sur la figure 9.

Les cames sont situées de part et d'autre de la tige de régleur de timonerie, donc une seule est visible sur la figure 9.

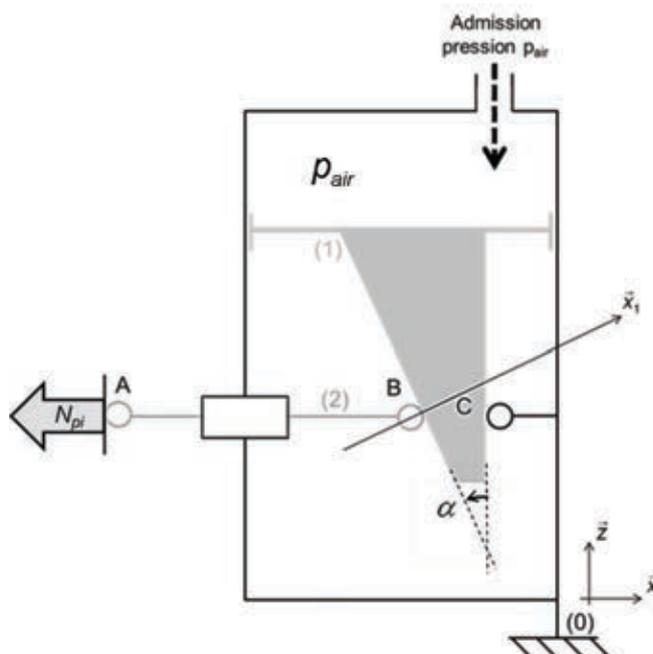
Lorsque l'air comprimé est admis dans le cylindre de frein, le piston (1) pousse les cames vers le bas, entre les roulements. Ce mouvement fait avancer les roulements avant, qui sont mobiles. Ces derniers déplacent la tige du régleur de timonerie (2), qui transmet au sabot de frein l'effort presseur nécessaire au freinage.



**Figure 9 : schéma de principe du BFC**

En utilisant des cames d'angles différents, il est possible de choisir le facteur d'amplification de la force.

Le modèle retenu pour l'étude du bloc de freinage est défini sur la figure 10.



**Figure 10 : schéma cinématique et paramétrage d'un BFC du train MF 2000 (le schéma n'est pas à l'échelle et la semelle n'est pas représentée)**

Remarques :

- le corps du cylindre est encastré sur le train, cet ensemble train + corps est noté (0) ;
- la came et le piston du cylindre sont encastrés et considérés comme un seul solide, noté (1) ;
- la tige de régleur de timonerie est notée (2) ;
- la semelle de frein n'est pas représentée.

Données :

Diamètre du cylindre de frein pneumatique	$d_{cylindre} = 178 \text{ mm}$
Course du cylindre de frein pneumatique	$c = 72 \text{ mm}$
Angle de came	$\alpha = 13,7^\circ$

Hypothèses (modèle défini figure 10) :

- le système admet une symétrie par rapport au plan  $(O, \vec{x}, \vec{z})$ , le modèle retenu sera donc un modèle plan avec une seule came ;
- les solides sont indéformables, leurs masses et inerties seront négligées ;
- les liaisons entre les solides sont parfaites, sauf la liaison roues/rail ;
- le contact entre le piston (1) et la chemise du cylindre (0) se fait avec un coefficient de frottement négligeable grâce à un revêtement plastique adapté ;
- les roulements avant sont modélisés par un contact ponctuel **sans frottement** entre la tige de réglage de timonerie (2) et la came (1) de normale  $(B, \vec{x}_1)$  ;
- les roulements arrière sont modélisés par un contact ponctuel **sans frottement** entre le bâti (0) et la came (1) de normale  $(C, \vec{x})$  ;
- la tige de réglage de timonerie (2) exerce sur la semelle un effort presseur de freinage  $N_{pi} = \vec{F}(2 \rightarrow \text{semelle}) \cdot \vec{x} = \vec{F}(\text{semelle} \rightarrow \text{roue}) \cdot \vec{x}$  ;
- l'étude est effectuée lorsque la semelle de frein entre en contact avec la roue.

Dans les questions suivantes, la notation  $\vec{F}(i \rightarrow j)$  devra être utilisée pour définir l'effort exercé par le solide  $i$  sur le solide  $j$ .

L'effort exercé par l'air sous pression dans le cylindre de frein sur le piston (1) est noté  $\vec{F}(\text{air} \rightarrow 1)$ , avec  $\|\vec{F}(\text{air} \rightarrow 1)\| = N_{air}$ .

L'action du rail sur la roue  $i$  est notée  $\vec{F}(\text{rail} \rightarrow \text{roue}_i) = \vec{T}_i + \vec{N}_i$ . En phase de freinage, la composante tangentielle  $T_i = \vec{F}(\text{rail} \rightarrow \text{roue}_i) \cdot \vec{x}$  s'oppose au mouvement du train (figure 11).

La somme des efforts tangentiels exercés sur chacune des roues est notée  $T_r$ . Dans le domaine ferroviaire, cette grandeur est appelée « effort retardateur du train ».

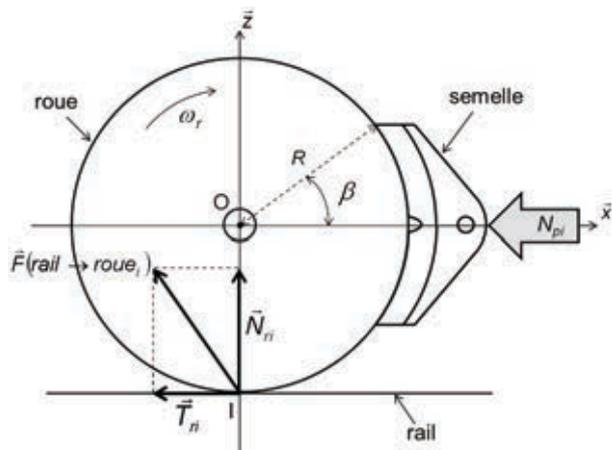


Figure 11 : action mécanique exercée par le rail sur la roue

Données :

Géométrie de la semelle	$\beta = 0,37 \text{ rad}$
Largeur du contact semelle/roue suivant $\vec{y}$	$e = 30 \text{ mm}$
Rayon du contact semelle/roue	$R = 400 \text{ mm}$

## 2. Choix d'un matériau pour les semelles de frein et calcul de l'effort de freinage exercé sur le train

La pression  $p_{air}$  imposée dans les cylindres des différents blocs de freinage lors de l'enclenchement d'une phase de freinage est adaptée en fonction de la charge du train (nombre de voyageurs par  $m^2$ ) et du type de freinage. Ces valeurs de pression sont définies dans le tableau 3 (FS = freinage de service / FU = freinage d'urgence).

	Charge du train	$p_{air}$ (FS)	$p_{air}$ (FU)
Remorques	6 voyageurs par $m^2$	$1,8 \cdot 10^5$ Pa	$3,1 \cdot 10^5$ Pa
Motrices	6 voyageurs par $m^2$	$2,2 \cdot 10^5$ Pa	$3,75 \cdot 10^5$ Pa

**Tableau 3 : pression de l'air dans les cylindres de freinage en fonction de la phase de freinage**

Un premier isolement permet, par application de l'un des théorèmes de la mécanique, d'écrire l'équation scalaire suivante :  $\|\vec{F}(2 \rightarrow 1)\| = -\frac{N_{air}}{\sin \alpha}$  (avec  $\alpha < 0$ ).

### Question 9

Définir la frontière de l'isolement réalisé et préciser le théorème utilisé pour obtenir cette relation. Les hypothèses à mettre en place et le choix de l'axe de projection sont à justifier. À partir de cette relation, expliciter  $\|\vec{F}(2 \rightarrow 1)\|$  en fonction de la pression de l'air dans les cylindres de freinage  $p_{air}$ , du diamètre des cylindres  $d_{cylindre}$  et de l'angle  $\alpha$ .

La conception du bloc de freinage et du guidage de la semelle de frein permet de garantir la relation suivante :  $N_{pi} = \vec{F}(2 \rightarrow semelle) \cdot \vec{x} = \vec{F}(semelle \rightarrow roue) \cdot \vec{x}$ .

### Question 10

Isoler le solide (2), réaliser le bilan des actions mécaniques extérieures appliquées à ce système et écrire le théorème de la résultante statique en projection sur l'axe  $\vec{x}$ . En déduire une relation donnant l'effort presseur de freinage  $N_{pi}$  en fonction de la pression de l'air dans les cylindres de freinage  $p_{air}$ , du diamètre des cylindres  $d_{cylindre}$  et de l'angle  $\alpha$ .

Le coefficient de frottement entre la roue et la semelle est noté  $\mu$ . Il est considéré comme constant.

L'étude du contact entre la roue et la semelle permet d'aboutir à une relation simplifiée entre l'effort de freinage  $T_{ri}$  et l'effort presseur exercé par la semelle sur la

roue  $N_{pi}$  :  $T_{ri} \approx -\mu \cdot \frac{\beta}{\sin(\beta)} \cdot N_{pi}$ , avec  $\beta$  exprimé en radians.

Lors de la conception du système de freinage, 3 types de semelles de freinage sont proposées au constructeur : les semelles en fonte, celles en matériau composite et celles en matériau fritté. Les caractéristiques et performances de ces trois types de semelles sont regroupées dans le tableau 4.

	Fonte	Matériau composite	Matériau fritté
Coefficient de frottement sur l'acier	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,25$	$\mu = 0,3$
Sensibilité du coefficient de frottement	Insensible à l'humidité Sensible à la vitesse et à l'effort appliqué	Forte sensibilité à l'humidité	Insensible à l'humidité et à la température
Coût	Très faible	Moyen	Élevé
Durée de vie des semelles	$\approx 40\ 000$ km	$\approx 60\ 000$ km	$\approx 200\ 000$ km
Autres remarques	Peu agressives pour les roues Bruyantes	Très agressives pour les roues Plus silencieuses	Très agressives pour les roues Bruyantes

**Tableau 4 : caractéristiques et performances de trois types de semelles de freins disponibles**

#### Question 11

En étudiant le tableau 4, choisir un matériau pour les semelles des blocs de freinage. Ce choix devra être justifié en quelques mots. Les critères liés à la sécurité sont prédominants par rapport aux critères liés au confort.

Quel que soit le matériau choisi, le coefficient de frottement roue/semelle  $\mu$  sera considéré, pour la suite de l'étude, comme étant égal à 0,3.

#### Question 12

Pour cette valeur de coefficient de frottement, calculer numériquement l'effort de freinage  $T_{ri}$  appliqué sur chacune des roues du train et en déduire l'effort retardateur  $T_r$  total appliqué au train lors du déclenchement d'une phase de freinage d'urgence.

### 3. Vérification de la décélération imposée aux voyageurs et de la distance de freinage

Quelle que soit la valeur de l'effort retardateur  $T_r$  déterminée dans la partie précédente, la suite de l'étude sera menée avec un effort retardateur tel que  $T_r = -386$  kN.

Hypothèses :

- le train se déplace en ligne droite, sur un tronçon de voie de pente nulle ;
- les frottements aérodynamiques et la résistance au roulement du train sont négligés dans cette partie de l'étude ;

- de même, les actions mécaniques exercées par les moteurs sur le train lors de la phase de freinage sont négligées ;
- la totalité de l'effort retardateur est appliquée instantanément sur le train lorsque le conducteur déclenche le freinage d'urgence à un instant  $t_0$ , pris tel que  $t_0 = 0$  s ;
- cet effort est constant pendant toute la durée du freinage ;
- la décélération du train est constante, elle est notée  $\vec{\Gamma}_{train/sol} = \Gamma_t \cdot \vec{x}$  ;
- la vitesse du train est variable, elle est notée  $\vec{V}_{train/sol} = V_t(t) \cdot \vec{x}$ .

Le tableau 5 donne la masse équivalente de chacune des voitures constituant le train. Cette masse équivalente tient compte à la fois de la masse propre de la voiture et de l'inertie des éléments en rotation (moteur, réducteur, essieu).

	Remorque	Motrice
Masse équivalente par voiture (kg)	36 600	40 200

**Tableau 5 : masse équivalente des différentes voitures constituant un train**

### Question 13

Déterminer la décélération  $\Gamma_t$  du train en fonction de l'effort retardateur total  $T_r$ .  
Faire l'application numérique.

Dans le cas le plus critique, le train roule à sa vitesse maximale au moment du déclenchement du freinage d'urgence, soit  $V_t(t_0) = 70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### Question 14

Déterminer la distance parcourue par le train entre le déclenchement du freinage d'urgence par le conducteur et l'arrêt total du train. Effectuer l'application numérique.

Dans l'étude qui vient d'être menée, le temps de réponse du système de freinage a été négligé. En pratique, le freinage n'est effectif qu'une seconde après l'envoi de la consigne par le conducteur.

### Question 15

En déduire la nouvelle valeur de la distance parcourue par le train entre le déclenchement du freinage d'urgence par le conducteur et l'arrêt total du train.

### Question 16

Évaluer et commenter les écarts entre les performances attendues et les performances calculées du système de freinage d'urgence du train MF 2000.

## IV. RESPECT DES EXIGENCES LIÉES AU CONFORT DU PASSAGER

### 1. Étude de la ventilation d'une voiture

**Objectif :** valider le dimensionnement du groupe de ventilation réalisé par le constructeur en termes de puissance frigorifique et de température de soufflage.

Les exigences associées au confort thermique des passagers sont rappelées ci-dessous.

### 3. Exigences liées au confort des passagers à l'intérieur de chaque voiture

3.1	En période estivale, la température à l'intérieur des voitures de la rame doit en permanence être inférieure de 7 °C à la température extérieure. Le temps de réponse à $\pm 5\%$ du système de climatisation doit être inférieur à deux minutes (durée minimale entre deux stations).
-----	--

Le domaine d'étude se limitera à une voiture de métro en circulation entre deux stations sur les voies extérieures du réseau parisien (configuration fréquente sur la ligne 2) durant la période estivale.

La température extérieure avoisine les trente-cinq degrés Celsius.

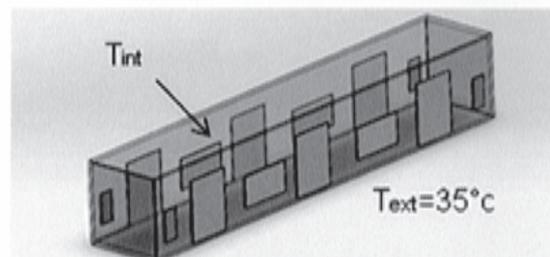
En l'absence de ventilation réfrigérée, la température à l'intérieur de la voiture peut atteindre les quarante-cinq degrés Celsius.

Afin de respecter le maintien de la température à l'intérieur de la voiture autour de 28 °C, le constructeur implante une ventilation réfrigérée qui souffle de l'air froid.

#### a. Détermination de la puissance frigorifique minimale nécessaire pour respecter l'exigence 3.1

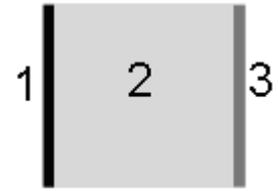
Données :

Caractéristiques dimensionnelles des parois par voiture	
Surface totale parois latérales opaques, $S_{pv}$	29 m <sup>2</sup>
Surface totale plafond, $S_{ph}$	37,5 m <sup>2</sup>
Surface totale plancher, $S_{pb}$	37,5 m <sup>2</sup>
Surface totale vitre, $S_v$	13 m <sup>2</sup>
Coefficient de transmission surfacique (en W·m <sup>-2</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	
Parois latérales, $K_{pv}$	à déterminer
Plafond, $K_{ph}$	0,68
Plancher, $K_{pb}$	0,65
Vitre, $K_v$	2,5



**Figure 12 : illustration des surfaces d'échange de chaleur entre l'intérieur des voitures et l'extérieur d'une voiture**

Les parois opaques verticales sont composées essentiellement d'un matériau multicouche. La présence de renforts métalliques est négligée dans les échanges thermiques avec l'extérieur.



- matériau 1 : acier d'épaisseur 2 mm ;
- matériau 2 : isolant d'épaisseur 6 cm ;
- matériau 3 : plaque en fibre de verre d'épaisseur 2 mm.

Caractéristiques matériaux des parois	
Conductivité thermique de l'acier, $\lambda_{acier}$	230 W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>
Conductivité thermique de l'isolant, $\lambda_{isolant}$	0,05 W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>
Conductivité thermique de la fibre de verre, $\lambda_{fibre}$	0,044 W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>
Conductivité thermique du vitrage, $\lambda_{vitrage}$	6 W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>

Résistances thermiques superficielles (en m <sup>2</sup> ·°C·W <sup>-1</sup> )	$R_{s\_ext}$ (vitesse relative du vent 1 km·h <sup>-1</sup> )	$R_{s\_int}$ (vitesse du vent nulle)
Paroi verticale avec flux de chaleur horizontal	0,04	0,113
Paroi horizontale avec flux de chaleur ascendant		0,141
Paroi horizontale avec flux de chaleur descendant		0,088

Caractéristiques d'échange thermique liées à la présence de passagers	
Nombre de passagers par voiture, $N$	80
Débit volumique d'air hygiénique par passager, $Q_{air}$	0,004 m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·pers <sup>-1</sup>
Air humide à 70%, $U_{air}$ ( $U_{air} = C_{p\ air} \cdot \rho_{air}$ avec $C_{p\ air} = 1000\ J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ et $\rho_{air} = 1.22\ Kg \cdot m^{-3}$ )	1220 W·s·m <sup>-3</sup> ·K <sup>-1</sup>
Puissance thermique équivalente d'une personne de corpulence moyenne, $P_{pass}$	90 W

La voiture reçoit deux sources de chaleur constantes, l'une résultant de la présence de passagers, l'autre issue du rayonnement du soleil sur la voiture.

L'apport de chaleur due à l'ensoleillement est considéré constant, la valeur du flux associé est  $\varphi_{solaire} = 800\ W \cdot m^{-2}$ . La surface de rayonnement est estimée égale à dix pourcents de la surface vitrée.

### Question 17

Exprimer le flux de puissance thermique résultant des sources de chaleurs constantes  $\Phi_{solaire\_passager}$ , avec  $\Phi_{solaire\_passager} = \Phi_{solaire} + \Phi_{pass}$ .

Le coefficient thermique du matériau multicouche est déterminé à partir de la relation suivante :

$$\frac{1}{K_{pv}} = \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i} + (R_{s\_int} + R_{s\_ext})$$

- $e_i$ , épaisseur de la couche  $i$  ;
- $\lambda_i$ , conductivité thermique du matériau de la couche  $i$  ;
- $R_{s\_int}$  et  $R_{s\_ext}$ , résistances thermiques superficielles intérieure et extérieure.

### Question 18

À partir des données, exprimer le coefficient de transmission thermique du matériau qui compose les parois verticales noté  $K_{pv}$ . Faire l'application numérique.

### Question 19

Exprimer le flux thermique  $\Phi_{\text{paroi\_opaque\_verticale}}$  qui traverse les parois opaques verticales. Donner ensuite l'expression de  $\Phi_{\text{paroi\_opaque}}$ , flux de chaleur traversant l'ensemble des parois non vitrées de la voiture. Faire l'application numérique.

Parmi les différents flux de chaleur mis en jeu pour la voiture, il est possible de distinguer les flux ayant tendance à apporter de la chaleur (flux entrants) des flux ayant tendance à refroidir la voiture (flux sortants). Le bilan des échanges thermiques s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\Sigma \text{ flux thermiques entrants} = \Sigma \text{ flux thermiques sortants}$$

En régime établi et dans l'hypothèse où la température intérieure est inférieure à la température extérieure (véhicule réfrigéré) ce bilan s'écrit alors (chaque terme ayant une valeur algébrique positive) :

$$\Phi_{\text{solaire\_passager}} + \Phi_{\text{paroi\_opaque}} + \Phi_{\text{vitre}} + \Phi_{\text{air\_dégagé}} = P_{\text{clim}}$$

- $\Phi_{\text{air\_dégagé}} = U_{\text{air}} \cdot Q_{\text{air}} \cdot N \cdot \Delta T$ , flux de chaleur dégagé par l'ensemble des passagers, avec une température de l'air expulsé égale à 37 °C ;
- $\Phi_{\text{paroi\_opaque}}$ , flux de chaleur traversant l'ensemble des parois non vitrées de la voiture ;
- $\Phi_{\text{vitre}}$ , flux de chaleur traversant les vitres de la voiture.

### Question 20

Déterminer la valeur de  $P_{\text{clim}}$  permettant de garantir le respect de l'exigence 3.1 pour la température intérieure de la voiture. Faire l'application numérique.

#### b. Validation du groupe de ventilation choisi par le constructeur

Le constructeur a installé une ventilation réfrigérée dont les caractéristiques sont données en annexe **A1**. Pour maintenir une température voisine de 28 °C, il est nécessaire de souffler de l'air froid, on note  $T_c$ , la température de soufflage.

Sachant que la puissance frigorifique se définit à partir de la relation suivante :

$$P_{\text{clim}} = U_{\text{air}} \cdot \text{Débit}_{\text{clim}} \cdot (28 - T_c)$$

Dans la suite du questionnement,  $P_{\text{clim}}$  prend la valeur de 12 kW.

### Question 21

Déterminer la valeur de température de soufflage  $T_c$ . Conclure sur la possibilité de refroidir la voiture avec la ventilation choisie.

Afin de visualiser l'évolution temporelle des échanges thermiques entre la voiture ventilée et l'extérieur, un modèle multi-physique est élaboré à l'aide d'un logiciel adapté. Le modèle, illustré sur le DR3, tient compte des caractéristiques des matériaux de la voiture, de la présence de passagers, des conditions de température extérieures et des données techniques de la ventilation implantée dans la voiture.

### Question 22

Entourer sur le DR3 la partie du modèle dans laquelle les caractéristiques thermiques des matériaux doivent être renseignées. Préciser la fonction du bloc « Convective Heat Transfer ».

### Question 23

À partir de la courbe tracée sur le DR2, représentant l'évolution de la température intérieure de la voiture lors de la mise en route de la climatisation, déterminer graphiquement le temps de réponse à 5% du modèle. Effectuer sur la copie les éventuels calculs nécessaires.

### Question 24

À partir de la courbe tracée sur le DR4, représentant la puissance frigorifique instantanée, déterminer graphiquement la puissance moyenne en régime établi délivrée par la climatisation. Comparer ce résultat aux caractéristiques de la climatisation choisie et conclure.

### Question 25

À partir des résultats obtenus dans cette partie, conclure sur le respect de l'exigence 3.1 par la ventilation choisie par le constructeur.

## 2. Étude de l'ergonomie des sièges

---

**Objectif :** valider une nouvelle architecture de maintien des sièges permettant aux passagers de stocker plus facilement leurs valises sous la banquette et choisir un matériau adapté en termes de déformation et de résistance.

---

Les exigences associées au confort des passagers et portant sur l'ergonomie des sièges sont rappelées ci-dessous.

3. Exigences liées au confort des passagers	
3.3	Le support des sièges doit résister au poids moyen de quatre passagers sans se rompre et sa flèche ne doit pas dépasser 10 mm.
3.4	L'espace sous les sièges doit être libéré afin de permettre le stockage d'un maximum de bagages sans gêner les déplacements dans la voiture.

De plus en plus de voyageurs utilisent le métro pour se rendre dans les gares de TGV parisiennes. Une conséquence est l'encombrement des couloirs, pouvant incommoder les personnes à mobilité réduite.

Lors de la conception des nouvelles voitures, une nouvelle ergonomie de la poutre de maintien des banquettes a été proposée, afin de permettre le stockage des bagages en dessous de celles-ci. Les couloirs sont alors libérés (cf. figures 13 et 14).



Figure 13 : banquettes du train



Figure 14 : détail de la fixation des banquettes sur la paroi du train

Les sièges en plastiques moulés sont soutenus par une poutre fixée sur la paroi de la voiture.

La modélisation retenue pour le dimensionnement de cette poutre de maintien est présentée sur la figure 15.

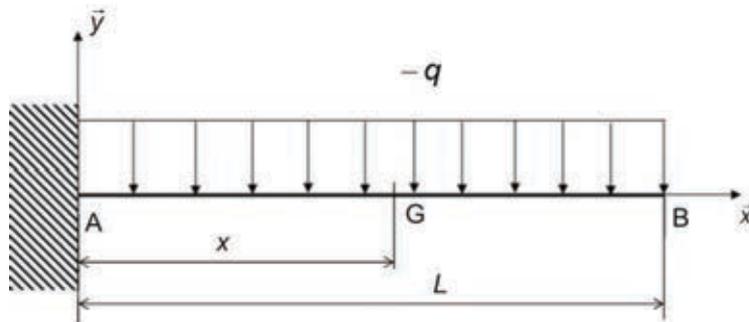


Figure 15 : modélisation de la poutre soutenant la banquette

Le modèle poutre du bras qui soutient la banquette est caractérisé par :

Longueur du bras	$L = 1 \text{ m}$
Section carrée du bras	$S = 120 \times 120 \text{ mm}^2$
Moment quadratique suivant l'axe $(G, \bar{z})$	$I_{Gz} = 350\,000 \text{ mm}^4$
Module de Young du matériau type acier	$E = 200 \text{ GPa}$
Limite élastique du matériau type acier	$R_e = 235 \text{ MPa}$
Chargement linéique	$q = 2\,000 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$

Le modèle de chargement représenté ci-dessus est une charge répartie prenant en compte le poids de quatre passagers ainsi que la masse des sièges.

### Question 26

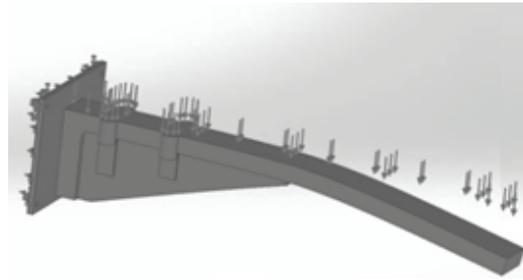
Démontrer la relation permettant d'exprimer le moment fléchissant suivant l'axe  $\bar{z}$  en tout point de la poutre en fonction de  $q$ ,  $L$ ,  $x$ . Calculer la valeur maximale atteinte par le moment fléchissant suivant l'axe  $\bar{z}$ . Vérifier si le matériau choisi pour la réalisation de la poutre est adapté.

### Question 27

En déduire la flèche maximale de la poutre. Conclure vis-à-vis du critère de flèche maximale admissible annoncé ci-dessus.

Par souci d'économie, le concepteur souhaite utiliser un matériau composite.

Un modèle numérique, plus proche de la géométrie réelle du support de siège, est construit grâce à un logiciel de simulation. Les résultats graphiques de la simulation en termes de flèche sont présentés sur la figure 16.



**Figure 16 : modèle numérique de la poutre soutenant la banquette**

Pour optimiser la solution technologique, l'industriel a effectué une série de modélisations avec différents matériaux.

Matériaux	Module de Young en GPa	Masse volumique en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Limite élastique en MPa	Flèche maximale en mm	Contrainte maximale en MPa
ABS-PC	2,41	1 070	40	17	19
ABS renforcé fibres de verre	150	1 370	250	0,75	
Polypropylène copolymère	0,9	890	27,6	45	
Polypropylène renforcé de fibres de verre	90	1 220	22	0,95	
PVC rigide	2,4	1 300	41	16	

**Tableau 6 : caractéristique des différents matériaux envisagés pour la réalisation du support de siège et résultats des simulations numériques**

### Question 28

À partir des résultats regroupés dans le tableau 6, choisir un matériau adapté à l'exigence 3.3.

## 3. Étude de l'affichage du plan de ligne

**Objectif :** valider l'algorithme de gestion de l'affichage du plan de ligne

Les exigences associées au confort des passagers sont rappelées ci-dessous en ce qui concerne le suivi en temps réel de l'avancement de leur voyage.

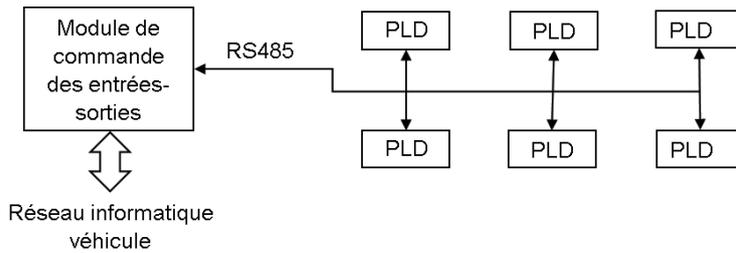
### 3. Exigences liées au confort des passagers

3.2	<p>Les voitures doivent être équipées d'un plan de ligne indiquant en permanence aux passagers :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- les stations ayant déjà été desservies par le train (diodes électroluminescentes éteintes) ;</li> <li>- la prochaine station desservie par le train (diode électroluminescente clignotante) ;</li> <li>- toutes les stations restant à desservir par le train (diodes électroluminescentes allumées).</li> </ul>
-----	--

Les plans de lignes dynamiques (PLD) permettent, à l'intérieur des voitures, l'affichage d'informations à l'intention des passagers. Ces informations consistent en l'affichage en temps réel de la position du train sur la ligne signalée par un point lumineux. Les plans de ligne sont intégrés au-dessus des portes. Chaque voiture contient six plans de ligne, soit trente par train.



**Figure 17 : plan de ligne dynamique (PLD)**



Les PLD sont commandés par une unité de contrôle externe appelée module de commande des entrées-sorties.

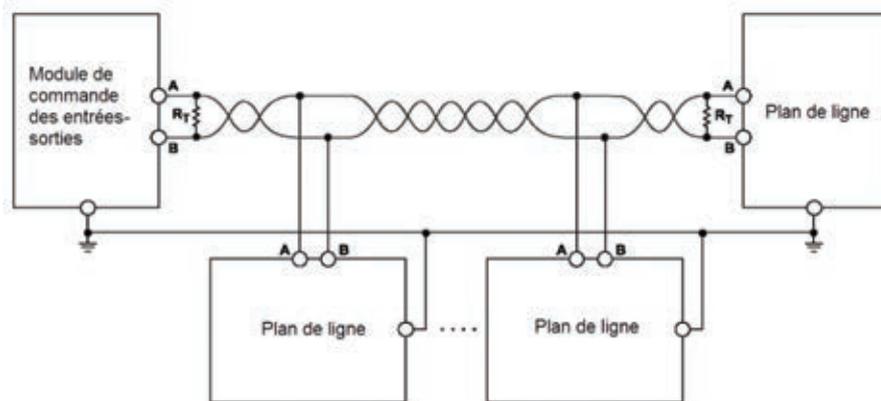
**Figure 18 : connexion entre les PLD et le module de commande**

Chaque PLD est géré indépendamment des autres au travers d'une liaison série RS485 permettant de faire transiter les commandes d'affichage et de test du plan de ligne.

**a. Analyse de la communication entre le module de commande et le plan de ligne**

L'interface physique entre le plan de ligne et le module de commande est une liaison série RS485 multipoints. Cette liaison comporte, en sus du module de commande, six plans de ligne.

La liaison RS485 utilise des signaux différentiels, qui sont la tension de signal et son opposé. Le récepteur détecte la différence des deux tensions. Le câble est constitué de deux fils (une paire torsadée avec un blindage relié à la masse).



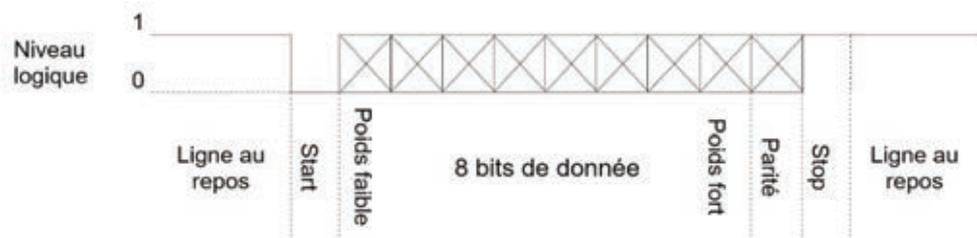
**Figure 19 : liaison RS485**

« A » désigne la ligne non inversée et "B" la ligne inversée. Un récepteur RS485 détecte une différence de potentiels de 200mV entre A et B. Si le potentiel de A est 200mV plus haut que celui de B, c'est un niveau logique haut (« 1 ») qui est

transmis. Si B est 200mV plus haut que A c'est un niveau logique bas (« 0 ») qui est transmis. Si la tension entre A et B est inférieure à +/-200mV, le niveau est indéfini.

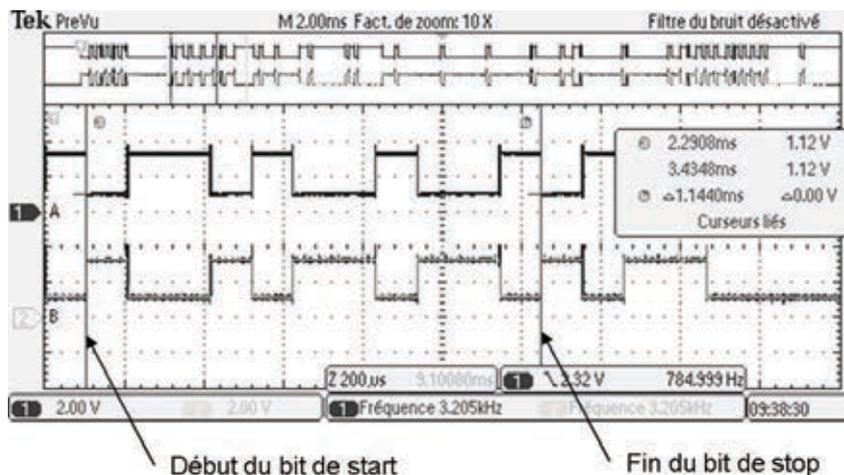
Les paramètres du protocole sont définis comme suit :

- transmission de type half duplex asynchrone ;
- vitesse de 9600 bauds ;
- un caractère est constitué d'un bit de start, de huit bits de donnée, d'un bit de parité paire et d'un bit d'arrêt (cf. figure 20) ;
- le bit de poids faible est transmis en premier.



**Figure 20 : détail de la transmission d'un octet de donnée**

Le relevé de la figure 21 correspond à un PLD comptant 25 stations. Un zoom a été effectué sur le troisième octet de la trame, correspondant à l'octet de donnée D1.



**Figure 21 : détails de l'octet D1**

Cet octet D<sub>1</sub> permet de fixer l'adresse de l'équipement avec lequel le module de commande est en communication. Les huit bits le composant sont décrits dans le tableau 7.

B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
0	Adresse de l'équipement pour les 6 PLD sur le réseau RS485 : cette adresse est comprise entre 100001 (adresse correspondant au PLD 1) et 100110 (adresse correspondant au PLD 6).						Origine

**Tableau 7 : contenu de l'octet D1**

La signification du bit « Origine » est la suivante :

- 1 correspond à une demande du module de commande à destination de l'équipement ;
- 0 correspond à une réponse de l'équipement à destination du module de commande.

### Question 29

Calculer la durée d'un bit. À partir de la figure 21 et du tableau 7, déterminer la valeur de l'octet D1 (en exploitant la voie A), en déduire l'adresse du PLD concerné par cette trame.

### b. Etude de la machine d'états-transitions implantée dans l'unité de contrôle

Une version simplifiée de la machine d'états-transitions implantée dans le module de commande est donnée figure 22. Cette machine utilise deux événements correspondant à l'utilisation des portes de la rame en station (ouverture des portes ou fermeture des portes) et deux événements indiquant l'entrée et la sortie de station. Ces événements sont générés par l'informatique de sécurité du train et communiqués au module de commande par le réseau du système informatique embarqué.

On considère qu'il y a N stations sur chaque ligne : X(1), X(2), X(3), ... X(N-1), X(N). Sur le PLD, X(1) correspond à la diode électroluminescente la plus à droite et X(N) à la diode électroluminescente la plus à gauche. Les fonctions Faire\_clignoter\_voyant(Nstation) et Eteindre\_voyant(Nstation) permettent via la liaison RS485 de passer le voyant de la station X(Nstation) en mode clignotant ou éteint. La fonction Allumer\_tous\_les\_voyants() permet comme son nom l'indique d'allumer fixement tous les voyants du plan de ligne.

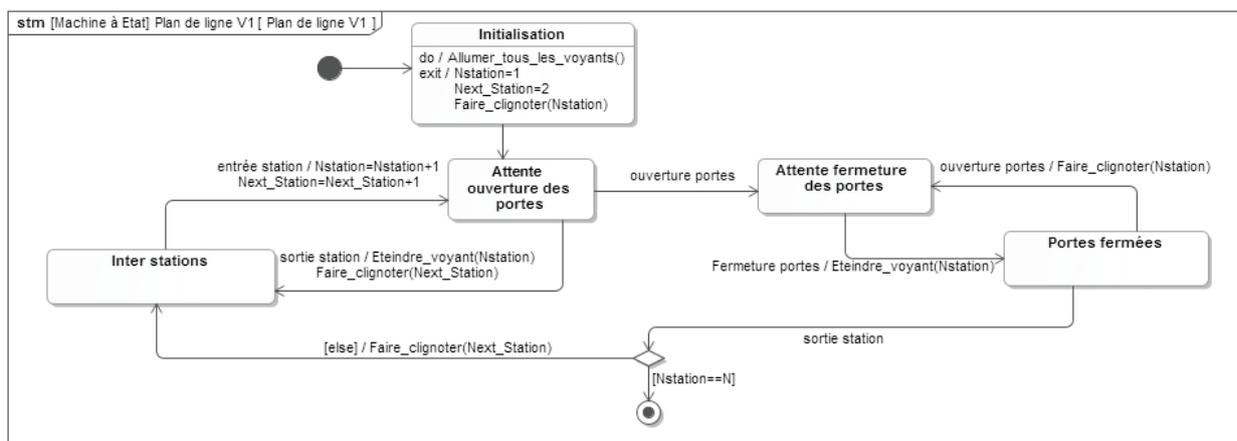


Figure 22 : machine d'états-transitions simplifiée

Règles d'écriture du pseudo code :

Affectation	Appel de procédure
Ident_var <sup>(1)</sup> ← <valeur> Ident_var ← <expression>	Ident_procedure <sup>(2)</sup> (param1,param2 <sup>(3)</sup> ,...)
Alternative : SI - ALORS - SINON	Répétition : TANT QUE
<b>SI</b> <expression booléenne> <b>ALORS</b> <instruction> ... <b>SINON</b> <sup>(4)</sup> <instruction> ... <b>FIN_SI</b>	<b>TANT_QUE</b> <expression booléenne> <instruction> ... <b>FIN_TANT_QUE</b>
Choix multiples : SELON	Remarque : (1) : Ident_var est un identifiant de variable (2) : Ident_procedure est un identifiant de procédure (3) : param1, param2,... sont les arguments de la procédure (4) : la partie <b>SINON</b> <instruction> est facultative.
<b>SELON</b> <ident_var> <liste_valeur> : <instruction> ... : ... { <b>AUTREMENT</b> : <instruction> } <b>FIN_SELON</b>	

Un pseudocode traduisant le diagramme simplifié d'états-transitions de la figure 22 est donné ci-après :

VARIABLES GLOBALES

Booléen : Evt\_Ouv\_Portes  
Booléen : Evt\_Ferm\_Portes  
Booléen : Evt\_Sortie\_Station  
Booléen : Evt\_Entrée\_Station

VARIABLES LOCALES :

Entier : Etat  
Entier : Nstation  
Entier : Next\_Station

Etat←1  
Allumer\_Tous\_Les\_Voyants()  
Nstation←1  
Next\_Station←2  
Faire\_clignoter(Nstation)

**TANT\_QUE** Etat < 5

**SELON** Etat

        1 : **SI** Evt\_Ouv\_Portes==Vrai

**ALORS**

                Evt\_Ouv\_Portes←Faux

                Etat←2

**FIN\_SI**

**SI** Evt\_Sortie\_Station==Vrai

**ALORS**

                Evt\_Sortie\_Station←Faux

                Eteindre\_voyant(Nstation)

                Etat←4

                Faire\_clignoter(Next\_Station)

**FIN\_SI**

2 : **SI** \_\_\_\_\_  
    **ALORS**

        \_\_\_\_\_  
        \_\_\_\_\_  
        \_\_\_\_\_

**FIN\_SI**

3 : **SI** Evt\_Ouv\_Portes==Vrai

**ALORS**

        Evt\_Ouv\_Portes←Faux

        Faire\_clignoter(Nstation)

        Etat←2

**FIN\_SI**

**SI** Evt\_Sortie\_Station==Vrai

**ALORS**

            Evt\_Sortie\_Station←Faux

**SI** Nstation==N

**ALORS**

                    Etat←5

**SINON**

                    Etat←4

                    Faire\_clignoter(Next\_Station)

**FIN\_SI**

**FIN\_SI**

4 : **SI** Evt\_Entrée\_Station==Vrai

**ALORS**

        Evt\_Entrée\_Station←Faux

        Nstation=Nstation+1

        Next\_Station=Next\_Station+1

        Etat←1

**FIN\_SI**

**FIN\_SELON**

**FIN\_TANT\_QUE**

Les variables booléennes *Evt\_Entrée\_Station*, *Evt\_Sortie\_Station*, *Evt\_Ouv\_portes* et *Evt\_Ferm\_Portes* sont mises à la valeur Vrai par le procédé qui gère les communications sur le réseau du système informatique embarqué du train.

### Question 30

À partir de la figure 22 donner le nom des états du diagramme d'états-transitions correspondants aux cinq valeurs que peut prendre la variable *Etat* et compléter le pseudo code sur le document réponse DR5.

Le diagramme simplifié d'états-transitions précédent ne prend pas en compte les deux sens de circulation du train. Une variable nommée *Sens* permet de connaître le sens de circulation. Quand le train va dans le sens X(1) vers X(N), *Sens* prend la valeur 0 et quand le train va dans le sens X(N) vers X(1), *Sens* prend la valeur 1.

Remarque : *Sens*=0 correspond au diagramme simplifié de la figure 22.

### Question 31

Compléter le diagramme d'états – transitions du document réponse DR6 en remplissant les cadres afin de tenir compte des deux sens de circulation.

Un chronogramme, tracé sur le document réponse DR7 traduit l'évolution temporelle du système dans le cas particulier où *Sens* = 0 et  $N > 8$ . Le chronogramme débute dans l'état courant « portes fermées », avec le voyant 5 allumé fixement.

### Question 32

À partir de la figure 22 ou du pseudocode, compléter le chronogramme du document réponse DR7 et vérifier si le comportement des PLD est conforme au cahier des charges.

## V. SYNTHÈSE

Les rames MF 2000 ont été développées au début des années 2000 dans l'idée d'équiper plusieurs lignes du métro parisien avec des trains plus écologiques, plus sûrs et plus confortables pour les usagers.

En 2017, les exigences liées au développement durable deviennent un critère primordial dans la conception des systèmes industriels. Du fait de leur faible consommation énergétique par passager (de l'ordre de  $30 \text{ Wh}\cdot\text{passager}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$  contre environ  $500 \text{ Wh}\cdot\text{passager}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$  pour une voiture individuelle), les transports en commun ferroviaires font déjà partie des moyens de déplacement les plus écologiques.

Cependant, une vingtaine d'années s'étant écoulée depuis la commande de la conception des rames MF 2000, la RATP pourrait prochainement lancer un appel d'offre pour une nouvelle génération de rames pour lesquelles l'impact écologique des véhicules serait encore plus faible.

### Question 33

Dans ce contexte, proposer quelques axes de recherche qui permettraient d'aboutir au développement du métro MF 2018, « le métro vert ». La réflexion pourra par exemple être orientée vers les problématiques de motorisation, de choix de matériaux ou d'architecture des rames. Préciser quels pourraient être les impacts de ces modifications sur les performances des rames en termes de sécurité et de confort des passagers.

## VI. PARTIE PÉDAGOGIQUE

Les descriptions pédagogiques proposées sont pour majeure partie extraites du document « ressources pour le cycle terminal – série S : enseignement spécifique de sciences de l'ingénieur ». Elles doivent conduire le candidat à formaliser l'organisation d'une séquence pédagogique relative à **l'enseignement spécifique de sciences de l'ingénieur de l'année de terminale du baccalauréat scientifique**. Des extraits du programme des sciences de l'ingénieur du BAC S – Cycle terminal de la série scientifique issus du Bulletin Officiel de l'éducation nationale n°9 du 30 septembre 2010 sont donnés dans les documents annexes **A2** et **A3**.

### 1. Le concept de séquence

Dans la description du séquençage de l'enseignement spécifique des sciences de l'ingénieur (voir documents pédagogiques en annexe **A4**), le choix a été fait de définir des séquences de durées variables de quelques semaines (ni trop peu pour garantir la possibilité d'agir et d'apprendre, ni trop longue pour ne pas générer de lassitude), pouvant s'intégrer entre chaque période de vacances.

Le concept de séquence doit respecter les données suivantes :

- chaque séquence vise l'acquisition (découverte ou approfondissement) de compétences et connaissances associées du référentiel, identifiées dans le programme ;
- chaque séquence permet d'aborder de 1 à 2 centres d'intérêt de manière à faciliter les synthèses et limiter le nombre de supports ;
- chaque séquence correspond à un thème unique de travail, porteur de sens pour les élèves et intégrant les centres d'intérêts utilisés ;
- chaque séquence est constituée de 2 à 4 semaines consécutives au maximum ;
- la durée de l'année scolaire est considérée égale à 30 semaines, de façon à laisser une marge de manœuvre pédagogique, laissant 6 semaines par année scolaire, à répartir entre les séquences, pour intégrer des remédiations, des évaluations, des sorties et visites, etc. ;
- chaque séquence donne lieu à une séance de présentation à tous les élèves, explicitant les objectifs, l'organisation des apprentissages et les éventuels supports didactiques utilisés ;
- chaque séquence donne lieu à une évaluation sommative, soit intégrée dans son déroulement, soit prévue dans le cours d'une séquence suivante.

Une fiche de préparation de séquence, complétée, est donnée en annexe **A5**. Elle permet d'avoir une vue détaillée des éléments devant permettre la préparation des séances ainsi que leur déroulement. Elle renseigne de manière explicite sur le dispositif mis en place, la mise en œuvre imaginée par l'enseignant pour atteindre les objectifs visés. Cette fiche complète la progression annuelle, elle aussi donnée en annexe (annexe **A4**). Elle est complétée par le document donné en annexe **A6** décrivant complètement l'organisation de la séance.

## **2. Exemple d'organisation d'une séquence**

La séquence n°5, détaillée en annexes **A5** et **A6**, est basée sur le thème sociétal « mobilité ». La problématique est « Comment améliorer le confort lors d'un déplacement ? ».

Cette séquence se situe durant la première année du cycle terminal de la série S – enseignement spécifique de sciences de l'ingénieur.

La durée indicative de la séquence est de trois semaines. Elle a pour objectif la vérification expérimentale des performances annoncées par le constructeur. Elle permet de mettre en œuvre un système dans ses conditions réelles d'exploitation et impose de définir un protocole d'essais reproductible.

Le problème technique est : «montrer et quantifier l'influence du transfert de charge lors d'une phase d'accélération et de freinage ».

Les centres d'intérêt choisis sont :

- CI2 – « Expérimenter et mesurer sur un système réel pour évaluer ses performances » ;
- CI5 – « Concevoir et utiliser un modèle relatif à un système en vue d'évaluer les performances de la chaîne d'énergie ».

La méthodologie pédagogique est définie comme étant l'ensemble des méthodes, des techniques, de procédés (démarches) qui permettent d'atteindre les objectifs de l'enseignement.

### **Question 34**

La séquence N°5, décrite en annexes **A5** et **A6**, est basée sur une méthode pédagogique déductive. Indiquer l'autre démarche pédagogique pouvant être mise en œuvre. Expliciter l'organisation de chacune des deux démarches et préciser leurs avantages et leurs inconvénients.

### **Question 35**

Préciser quelle est la séance de travaux pratiques associée à de l'expérimentation et celle liée à de l'investigation. Expliciter les activités élèves pouvant être associées à la séance d'expérimentation.

### 3. Étude de cas : conception d'une séquence

La séquence n°18 est basée sur le thème sociétal « confort ». La problématique est « Comment réguler une température ? ».

Cette séquence se situe durant la seconde année du cycle terminal de la série S – enseignement spécifique de sciences de l'ingénieur.

La durée imposée de la séquence est de trois semaines.

Cette séquence est partiellement décrite par les documents réponse DR8 et DR9. La suite du questionnement vise à compléter ces deux documents.

#### Question 36

Formuler les prérequis nécessaires pour débiter la séquence 18.

#### Question 37

À partir de la liste donnée en annexe A4, compléter sur le DR8 les centres d'intérêts autour desquels s'articule la séquence n°18. Justifier ce choix.

#### Question 38

À partir de l'extrait du bulletin officiel de l'Éducation nationale, donné dans l'annexe A3, déterminer les connaissances associées à chaque sous-compétence abordée dans la séquence 18 et compléter le document réponse DR8.

Une organisation de la séquence n°5 est proposée en annexe A6. Elle détaille l'enchaînement des séances, les compétences visées et l'objectif de formation pour chaque activité.

Une ébauche du même document appliquée à la séquence n°18 est proposée sur le document réponse DR9.

#### Question 39

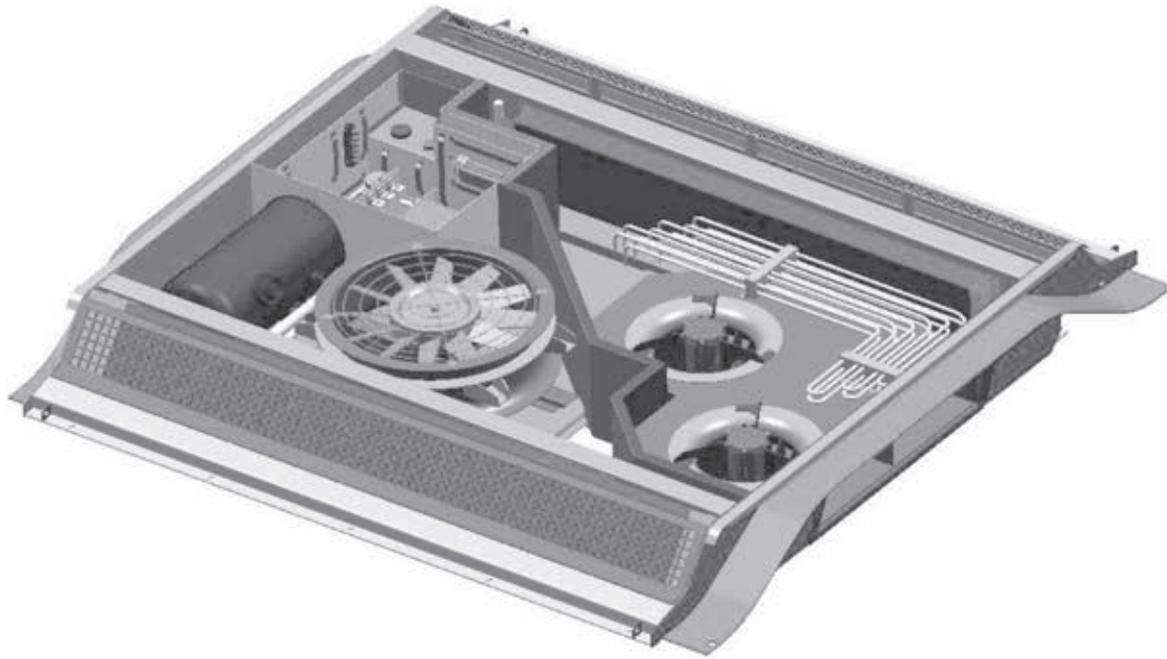
À partir de l'exemple de la séance n°5 (annexe A6), compléter l'organisation de la séquence n°18 proposée sur le document réponse DR9. Il est attendu de :

- caractériser la compétence abordée lors de chacune des séances ;
- définir l'objectif de formation associé à chaque activité ;
- préciser l'organisation classe (classe entière, groupes,...) ;
- décrire les évaluations mises en place.

# **DOSSIER TECHNIQUE ET PÉDAGOGIQUE**

## Document annexe A1

### Extrait de la documentation technique de la ventilation réfrigérée



Débit d'air	2900 m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> ±10%
Masse	377 kg
Puissance frigorifique maximale	12 kW
Température mini d'air soufflé	16 °C
Compresseur frigorifique	type scroll horizontal
Ventilateur condenseur	type axial
Alimentation électrique	72V CC pour la commande et l'alimentation des 2 moto-ventilateurs traitement d'air 400V triphasé 50Hz pour la puissance du réchauffeur, du compresseur et du ventilateur condenseur

## Document annexe A2

### Programme des sciences de l'ingénieur du BAC S – Cycle terminal de la série scientifique

#### Extrait du Bulletin Officiel de l'Éducation nationale n°9 du 30 septembre 2010 – Sciences de l'Ingénieur

#### I - Objectifs généraux

Notre société devra relever de nombreux défis dans les prochaines décennies. Les démographes annoncent une forte croissance de la population mondiale, répartie inégalement sur les territoires. Il faudra donc proposer des réponses aux besoins fondamentaux des hommes, tels que l'accès à l'eau, à l'énergie, à l'alimentation, à l'habitat, au transport, à la santé, à l'éducation et à l'information. Pour satisfaire ces besoins, la recherche de solutions devra se faire dans un contexte environnemental contraint, au sein d'une concurrence économique internationale et avec la nécessité d'assurer un développement durable pour tous. La réponse à ces défis passe inévitablement par la formation d'ingénieurs et de chercheurs aux compétences scientifiques et technologiques pluridisciplinaires de haut niveau, capables d'innover, de prévoir et maîtriser les performances des systèmes complexes, en intégrant les grandes questions sociétales et environnementales.

L'enseignement des sciences de l'ingénieur, dans le cycle terminal du lycée, a pour objectif d'aborder la démarche de l'ingénieur qui permet, en particulier :

- de vérifier les performances attendues d'un système, par l'évaluation de l'écart entre un cahier des charges et les réponses expérimentales (figure 1, écart 1) ;
- de proposer et de valider des modèles d'un système à partir d'essais, par l'évaluation de l'écart entre les performances mesurées et les performances simulées (figure 1, écart 2) ;
- de prévoir les performances d'un système à partir de modélisations, par l'évaluation de l'écart entre les performances simulées et les performances attendues au cahier des charges (figure 1, écart 3) ;
- de proposer des architectures de solutions, sous forme de schémas ou d'algorigrammes.

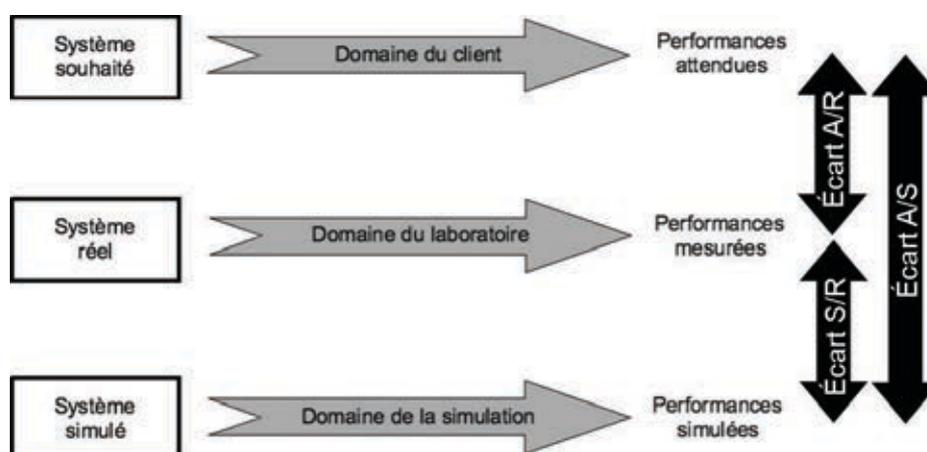


Figure 1 : représentation des différents écarts

L'identification et l'analyse de ces écarts peuvent mobiliser des compétences pluridisciplinaires, en particulier celles développées en mathématiques et en sciences physiques chimiques fondamentales et appliquées. Les sciences de l'ingénieur renforcent les liens entre les disciplines et participent à la poursuite d'études dans l'enseignement supérieur. Les sciences de l'ingénieur développent des démarches pour analyser des systèmes complexes pluri technologiques. Les compétences acquises sont ainsi transposables à l'ensemble des domaines scientifiques et technologiques, et permettent d'appréhender des situations inédites.

### Compétences terminales visées

L'enseignement des sciences de l'ingénieur a pour objectif de développer les compétences présentées ci-dessous :

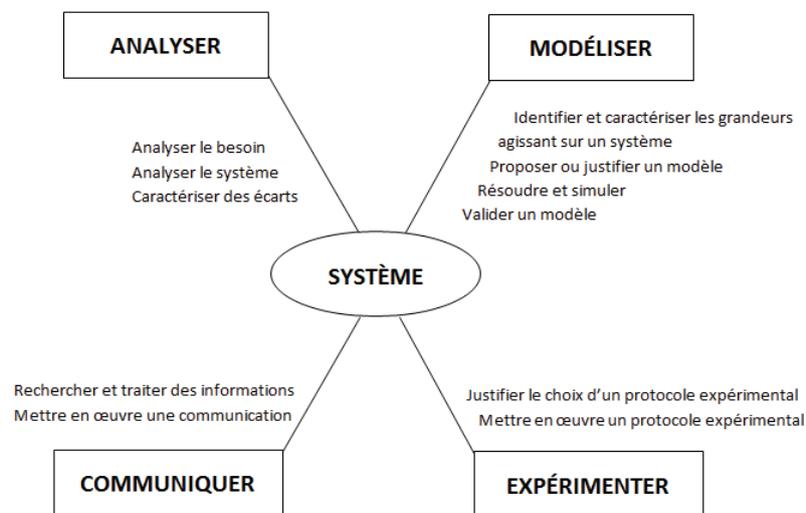


Figure 2 : compétences développées en sciences de l'ingénieur  
[...]

## II – Programme

- **A – Analyser**
  - A1 Analyser le besoin
  - A2 Analyser le système
  - A3 Caractériser des écarts

---

- **B – Modéliser**
  - B1 Identifier et caractériser les grandeurs agissant sur un système
  - B2 Proposer ou justifier un modèle
  - B3 Résoudre et simuler
  - B4 Valider un modèle

---

- **C – Expérimenter**
  - C1 Justifier le choix d'un protocole expérimental
  - C2 Mettre en œuvre un protocole expérimental

---

- **D – Communiquer**
  - D1 Recherche et traiter des informations
  - D2 Mettre en œuvre une communication

La représentation des systèmes, si elle s'avère nécessaire, se fera avec des outils numériques. L'utilisation des logiciels retenus n'implique pas la maîtrise de leurs fonctionnalités.

Chaque compétence est présentée avec les connaissances et les capacités associées :

- un premier tableau définit les compétences terminales attendues, spécifiant le contrat d'évaluation ;
- un second tableau présente les connaissances et les capacités associées ainsi que le niveau de maîtrise des capacités.

Les capacités associées aux connaissances seront dispensées à partir de tout ou partie d'un système, disponible sous forme matérielle ou virtuelle, instrumenté si nécessaire, défini par un dossier technique.

La maîtrise des capacités est définie selon les trois niveaux suivants.

**Niveau A-** Les concepts sont abordés dans un contexte d'application adapté. Les élèves découvrent la définition et les caractéristiques de chaque concept.

**Niveau B** - Les activités proposées sont simples et variées. Elles mobilisent des outils et des méthodes dans un contexte connu. La démarche est donnée, la résolution est guidée et le choix de la méthode est toujours précisé.

**Niveau C** - Les situations proposées exigent la mise en œuvre de démarches mobilisant des outils et des méthodes dans un contexte nouveau. Les élèves doivent pouvoir justifier ces démarches et interpréter tout ou partie des résultats obtenus par rapport au problème posé.

Lorsque le niveau est précisé en classe de première, cela signifie qu'il est atteint en fin de classe de première et qu'il peut être utilisé en classe de terminale. Lorsque le niveau n'est précisé qu'en classe de terminale, cela signifie qu'il est atteint en fin de classe de terminale mais qu'il peut être introduit en classe de première.

### Document annexe A3

## Programme des sciences de l'ingénieur du BAC S – Cycle terminal de la série scientifique

Extrait du Bulletin Officiel n°9 du 30 septembre 2010 – Sciences de l'Ingénieur

### A2 - Analyser le système

Compétences attendues			
- identifier les éléments transformés et les flux ;			
Connaissances	Capacités	1 <sup>re</sup>	T
Chaîne d'énergie	Réaliser le bilan énergétique du système		C
Systèmes logiques évènementiels Langage de description : graphe d'états, logigramme, GRAFCET, algorithme	Décrire et analyser le comportement d'un système	C	
Composants réalisant les fonctions de la chaîne d'énergie	Justifier la solution choisie		B
Modèle OSI	Décrire l'organisation des principaux protocoles		A
Système asservi	Différencier un système asservi d'un système non asservi		B
Architecture d'un réseau (topologie, mode de communication, type de transmission, méthode d'accès au support, techniques de commutation)	Identifier les architectures fonctionnelle et matérielle d'un réseau		B

### A3 - Caractériser les écarts

Compétences attendues			
- comparer les résultats expérimentaux avec les résultats simulés et interpréter les écarts ; - comparer les résultats simulés avec les critères du cahier des charges et interpréter les écarts.			
Connaissances	Capacités	1 <sup>re</sup>	T
Analyser les écarts	Rechercher et proposer des causes aux écarts constatés.		C

## B1 – Identifier et caractériser les grandeurs agissant sur un système

Compétences attendues			
- choisir les grandeurs et les paramètres influents en vue de les modéliser.			
Connaissances	Capacités	1 <sup>re</sup>	T
Caractéristiques des grandeurs physiques (mécaniques, électriques, thermiques, acoustiques, lumineuses, etc.)	Qualifier les grandeurs d'entrée et de sortie d'un système isolé Identifier la nature (grandeur effort, grandeur flux) Décrire les lois d'évolution des grandeurs Utiliser les lois et relations entre les grandeurs		C
Matériaux	Identifier les propriétés des matériaux des composants qui influent sur le système		C
Flux d'information	Identifier la nature de l'information et la nature du signal		C
Flux de matière	Qualifier la nature des matières, quantifier les volumes et les masses	C	

## B2 – Proposer ou justifier un modèle

Compétences attendues			
- préciser ou justifier les limites de validité du modèle envisagé.			
Connaissances	Capacités	1 <sup>re</sup>	T
Chaîne d'énergie	Associer un modèle aux composants d'une chaîne d'énergie Déterminer les points de fonctionnement du régime permanent d'un actionneur au sein d'un procédé		C
Chaîne d'information	Associer un modèle aux composants d'une chaîne d'information		C
Ordre d'un système	Identifier les paramètres à partir d'une réponse indicielle Associer un modèle de comportement (1er et 2nd ordre) à une réponse indicielle		B
Systèmes logiques à événements discrets Langage de description : graphe d'états, logigramme, GRAFCET, algorithme	Traduire le comportement d'un système		C
Modèle du solide	Choisir le modèle de solide, déformable ou indéformable selon le point de vue		C

### B3 – Résoudre et simuler

<b>Compétences attendues</b>			
- simuler le fonctionnement de tout ou partie d'un système à l'aide d'un modèle fourni.			
Connaissances	Capacités	1 <sup>re</sup>	T
Principe fondamental de la dynamique (PFD)	Établir de façon analytique les expressions d'efforts (force, couple, pression, etc.) et de flux (vitesse, fréquence de rotation, etc.) Traduire de façon analytique le comportement d'un système		C
Paramètres d'une simulation	Adapter les paramètres de simulation, durée, incrément temporel, choix des grandeurs affichées, échelles, à l'amplitude et la dynamique de grandeurs simulées		C
Ordre d'un système	Interpréter les résultats d'une simulation fréquentielle des systèmes du 1 <sup>er</sup> et du 2 <sup>nd</sup> ordre		B
Comportement du solide déformable	Déterminer les parties les plus sollicitées dans un composant Déterminer les valeurs extrêmes des déformations Déterminer des concentrations de contraintes dans un composant		C

### C2 - Mettre en œuvre un protocole expérimental

<b>Compétences attendues</b>			
- traiter les données mesurées en vue d'analyser les écarts.			
Connaissances	Capacités	1 <sup>re</sup>	T
Appareils de mesures, règles d'utilisation	Mettre en oeuvre un appareil de mesure Paramétrer une chaîne d'acquisition		C
Paramètres de configuration d'un réseau	Paramétrer un protocole de communication		C
Routines, procédures, etc. Systèmes logiques à événements discrets	Générer un programme et l'implanter dans le système cible		C
Modèles de comportement	Analyser les résultats expérimentaux Traiter les résultats expérimentaux, et extraire la ou les grandeurs désirées (s)		C



## Document annexe A5

### Fiche de séquence – exemple de la séquence n°5

SÉQUENCE N°5		Automne	Noël	Hiver	Printemps		
S SI Première							
Fiche de séquence pédagogique Première S – Sciences de l'ingénieur	<b>Problématique</b>	Comment améliorer le confort lors d'un déplacement?					
	<b>Thème(s) sociétal(aux)</b>	Mobilité					
	<b>Centres d'intérêt</b>	CI2 et CI5					
	Répartition Heures Grpe*	2 fois 2 heures	Lu	Ma	Me	Je	Ve
	Répartition Heures CE*	3 (2+1) heures					
	TPE démarrés	oui**		3h CE		2H Grpe	
	Nb de semaines	2,5 semaines					
	Total horaire élève	13 heures					
	Horaire élève CE*	9 h					2h CE**
	Horaire élève Grpe*	4 h					(TPE)
	<b>Compétences abordées dans la séquence</b>						
	A2 Analyser le système			B3 Résoudre et Simuler			
	A3 Caractériser les écarts			B4 Valider un modèle			
	B1 Identifier et caractériser les grandeurs agissant sur un système			C2 Mettre en œuvre un protocole expérimental			
	B2 Proposer ou justifier un modèle						
<b>Connaissances abordées dans la séquence</b>							
Chaîne d'énergie			Modèles de comportement				
Composants réalisant les fonctions de la chaîne d'énergie			Analyse des écarts				
Caractéristiques des grandeurs physiques (mécaniques, électriques, thermiques, acoustiques, lumineuses, etc.)			Paramètres d'une simulation				
Énergie et puissances			Grandeurs influentes d'un modèle				
Principe fondamental de la dynamique (PFD)			Modèle de connaissance				
Principes fondamentaux d'étude des circuits							
<b>Écarts :                    Attendu / Mesuré                    et                    Simulé / Mesuré</b>							

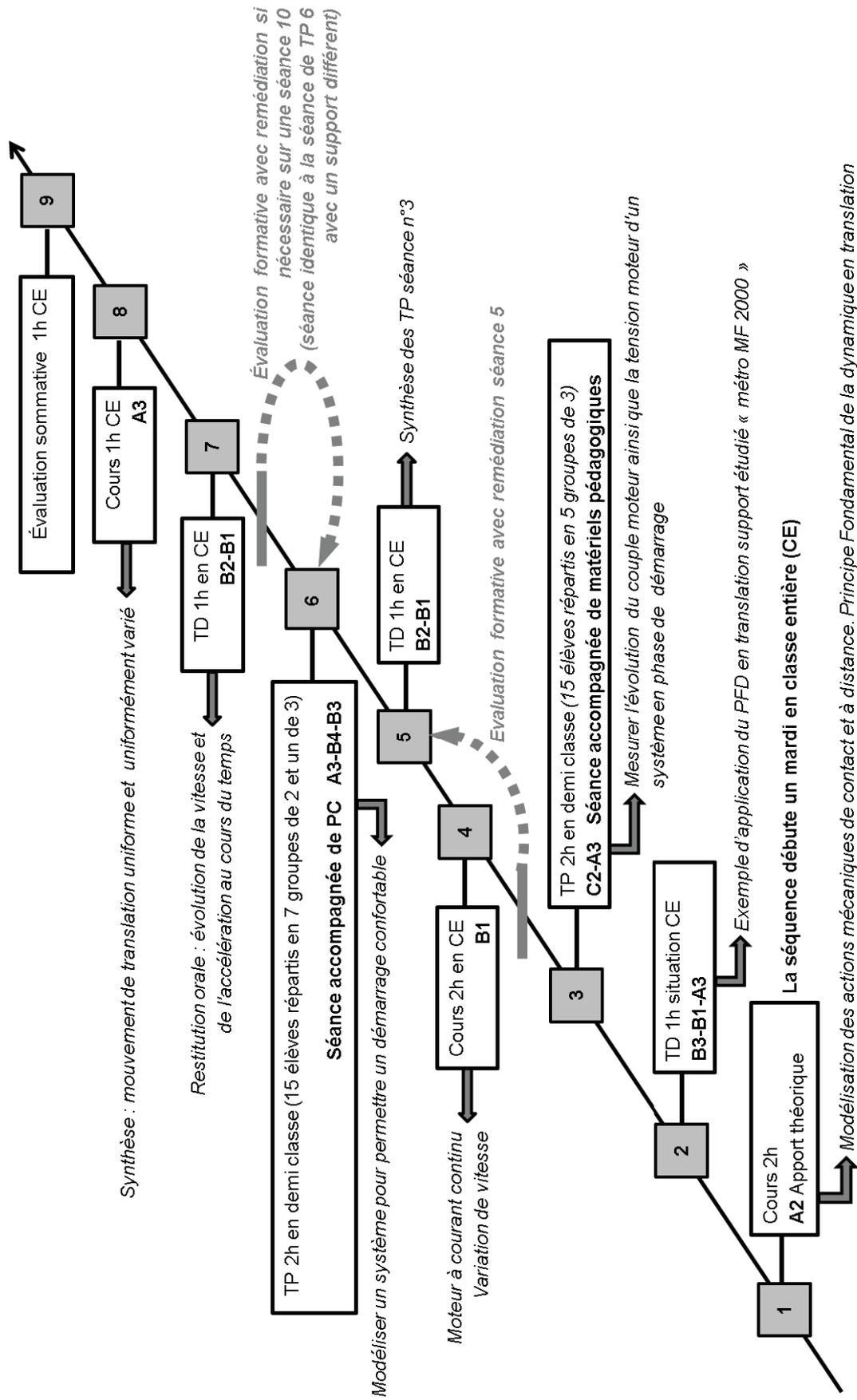
Notes :

\* : CE = Classe Entière / Grpe = Groupe

\*\* : durant cette séquence, pour des modalités d'organisation pédagogique dans le cadre d'une globalisation, les deux heures du vendredi sont consacrées aux TPE.

## Document annexe A6

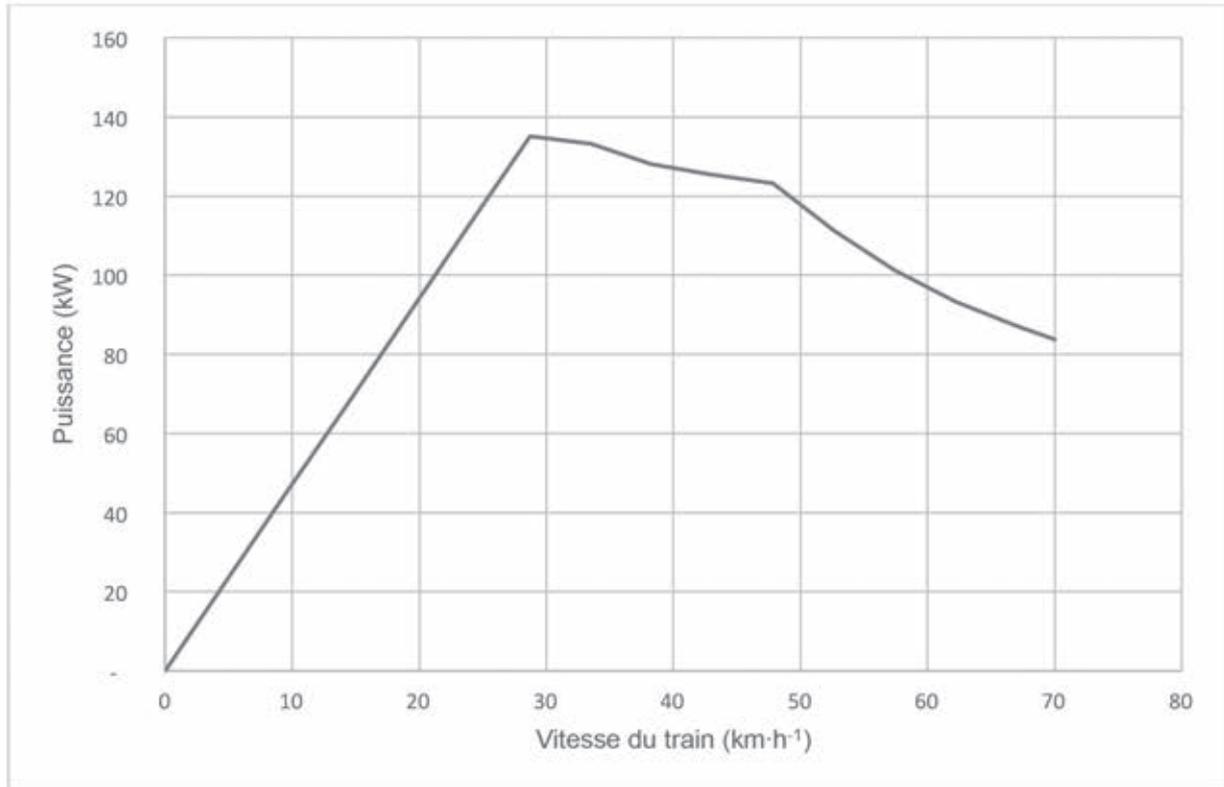
### Description des séances de la séquence – exemple de la séquence n° 5





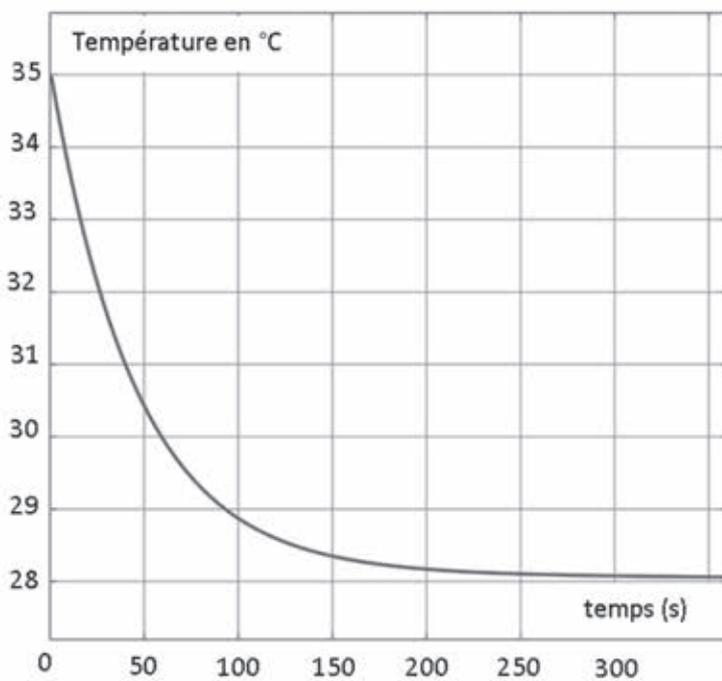
NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DOCUMENT RÉPONSE DR1



Caractéristique de traction d'un moteur 4.LX A.1640

DOCUMENT RÉPONSE DR2



Température intérieure de la voiture en fonction du temps

# DOCUMENT RÉPONSE DR3

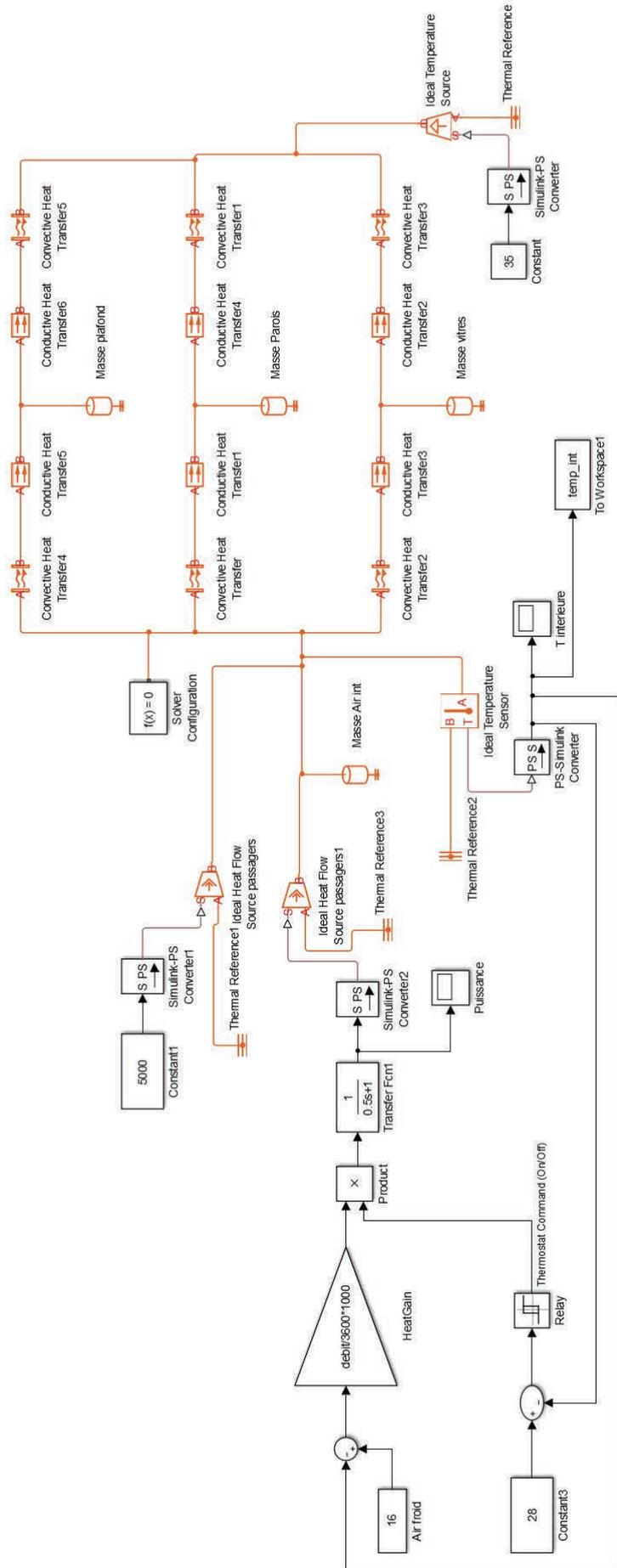
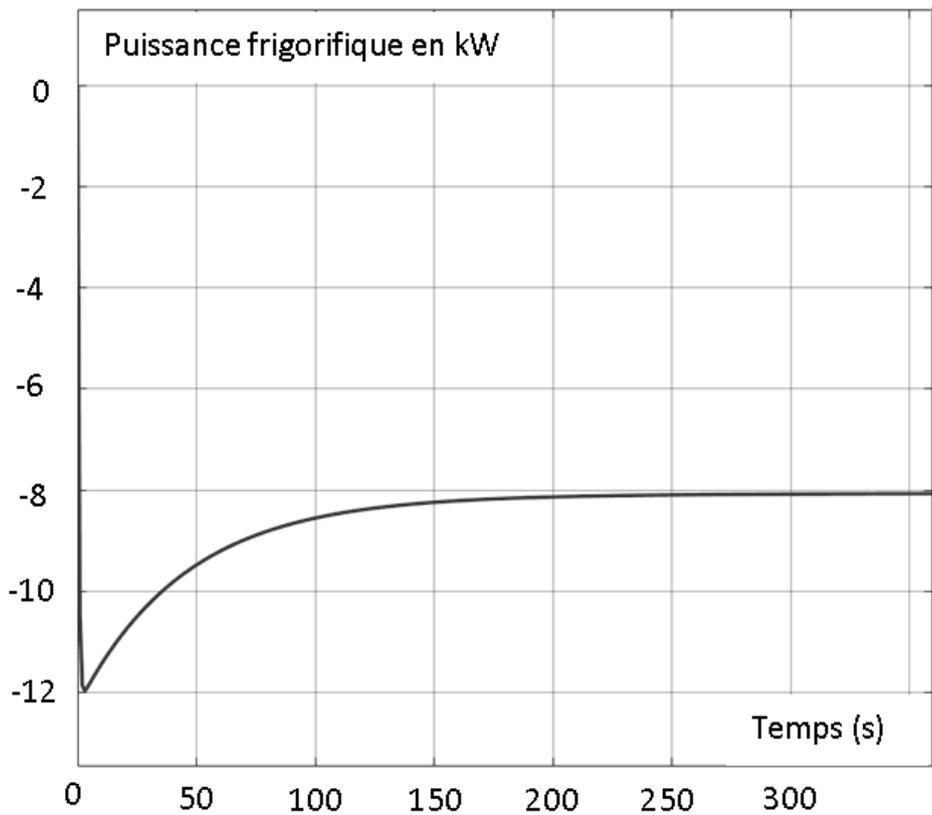


Schéma du modèle multi-physique des échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur d'une voiture en période estivale

**DOCUMENT RÉPONSE DR4**



**Puissance frigorifique rejetée par la ventilation en fonction du temps**

**DOCUMENT RÉPONSE DR5**

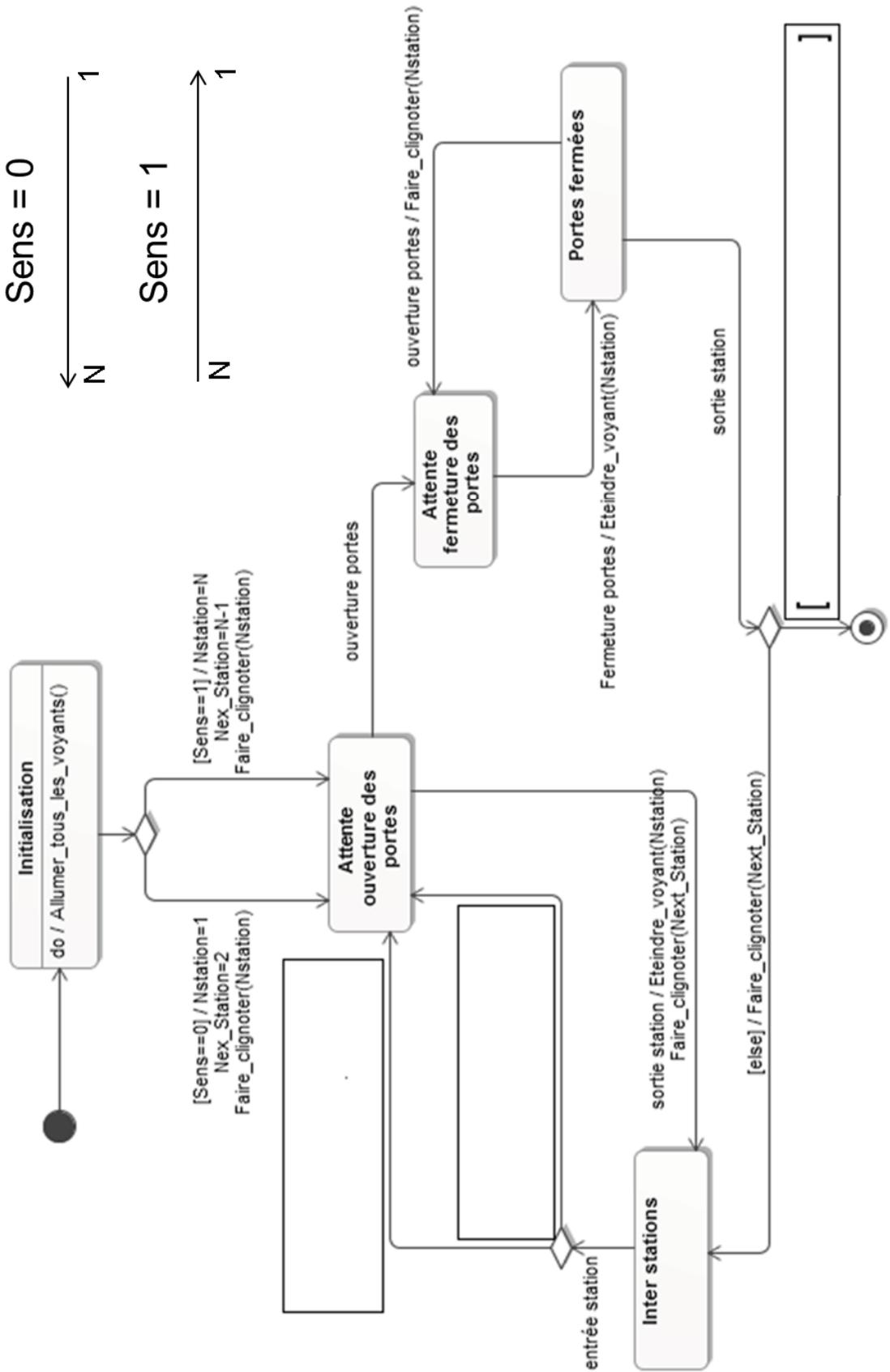
Extrait à compléter du pseudo-code traduisant le diagramme d'états-transitions  
(page 23)

```
2 : SI .....  
   ALORS  
     .....  
     .....  
     .....  
   FIN_SI
```



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

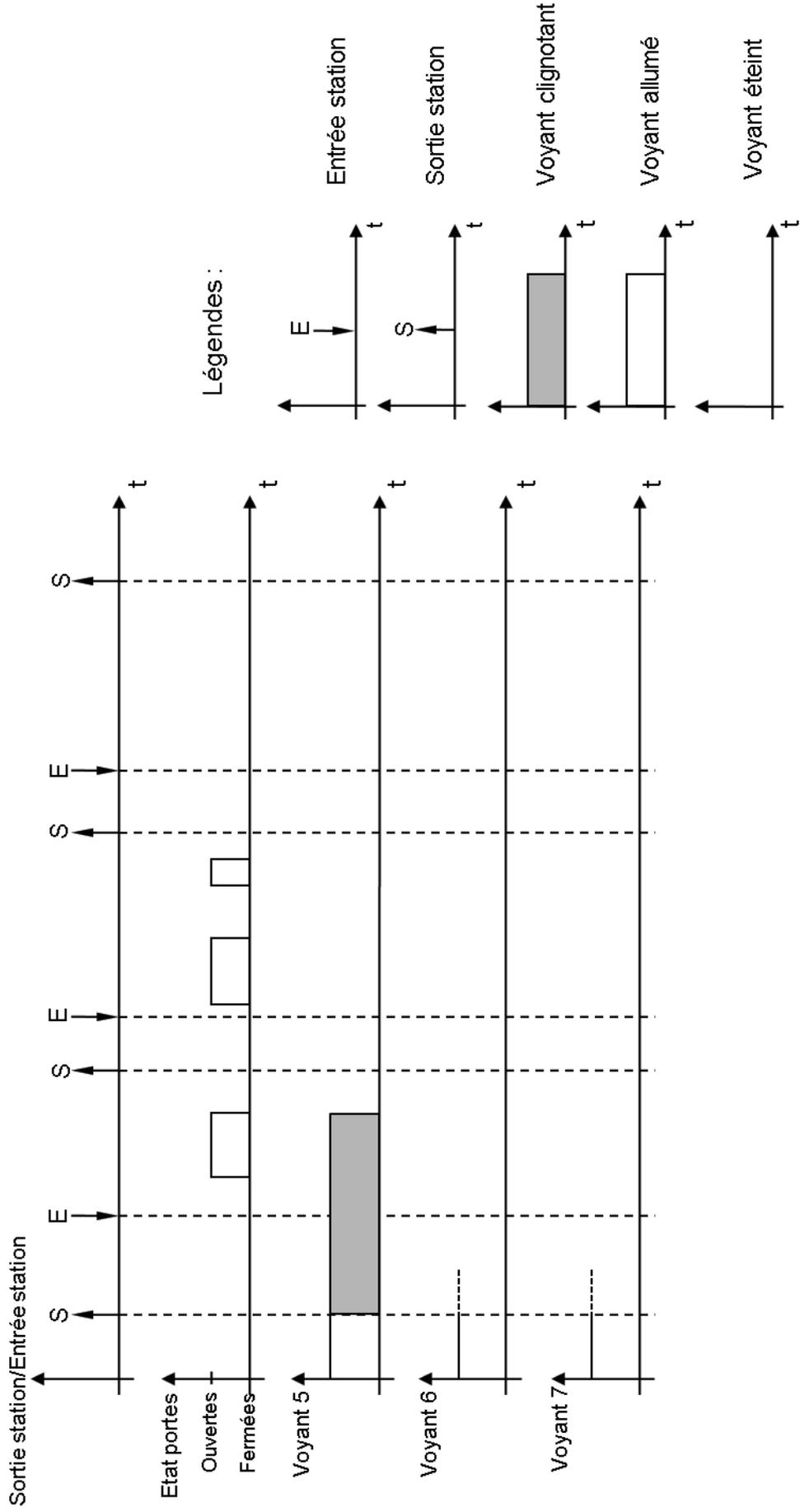
DOCUMENT RÉPONSE DR6



Sens = 0  
 N ← 1

Sens = 1  
 N ← 1

# DOCUMENT RÉPONSE DR7







NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

**DOCUMENT RÉPONSE DR8**

**Fiche séquence de la séquence 18 (document sur 2 pages)**

SÉQUENCE	Automne	Noël	Hiver	Printemps
<b>SSI Terminale</b>				
<b>Problématique</b>	Comment réguler une température			
<b>Thème(s) sociétal(aux)</b>	Confort			
<b>Centre d'intérêt</b>				
Répartition Heures Grpe*	4 heures			
Répartition Heures CE*	4 (2+2) heures			
Projet démarré	non			
Nb de semaines	3 semaines			
Total horaire élève	24 heures			
Horaire élève CE *	12 h			
Horaire élève groupe *	12 h			
	Lu	Ma	Me	Je
				4h Grpe
				Ve
	2h CE			2h CE
<b>Compétences abordées dans la séquence</b>				
<p>A2 analyser le système : identifier les éléments transformés et les flux</p> <p>A3 caractériser les écarts : comparer les résultats simulés avec les critères du cdcf et les résultats expérimentaux avec ceux simulés</p> <p>B1 identifier et caractériser les grandeurs : choisir les grandeurs et les paramètres influents en vue de les modéliser</p>	<p>B2 proposer ou justifier un modèle : préciser ou justifier les limites de validité du modèle envisagé</p> <p>B3 résoudre et simuler : simuler le fonctionnement de tout ou partie d'un système à l'aide d'un modèle fourni</p> <p>C2 mettre en œuvre un protocole expérimental : traiter les données mesurées en vue de traiter les écarts</p>			

Fiche de séquence pédagogique  
Terminale S – Sciences de l'ingénieur

\* : CE = Classe Entière / Grpe = Groupe

**Connaissances abordées dans la séquence**

**Écart :**      **Attendu / Simulé**      **et**      **Simulé / Mesuré**

## DOCUMENT RÉPONSE DR9

### Description des séances de la séquence – séquence 18

