

# BACCALAURÉAT GÉNÉRAL

## SÉRIE SCIENTIFIQUE

### ÉPREUVE DE SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

**Session 2015**

**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.

## Système de Sécurité du Panoramique des Dômes



Panoramique des Dômes (source Wikipédia)

### Constitution du sujet

- Texte.....Page 3
- Documents techniques.....Page 12
- Documents réponses.....Page 19

Le sujet comporte 23 questions.

Les documents réponses DR1 et DR2 sont à rendre  
avec les copies.

## 1. Présentation

Le site du Puy-de-Dôme est devenu un site classé en 2000 et a été labellisé « Grand site de France » en 2008. Afin d'assurer le transport des visiteurs, le conseil général du Puy-de-Dôme a décidé de réaliser une voie ferrée pour un train à crémaillère appelé « Panoramique des Dômes ». Cette voie suit exactement le même tracé que la route déjà existante, qui reste utilisable pour les services de sécurité, de maintenance et d'exploitation forestière.

Les objectifs de cette installation sont :

- de permettre un accès sans danger au sommet en période hivernale ;
- de permettre une augmentation du nombre de visiteurs annuel grâce à une répartition des visites sur la totalité de l'année ;
- de réguler le nombre de visiteurs afin de ne pas dépasser la capacité maximale du site estimée à 4 000 personnes, sous peine d'entraîner des dégradations irréversibles pour la nature ;
- d'augmenter jusqu'à 2 h 40 la durée maximale de présence des visiteurs sur le site afin d'optimiser les retombées économiques. La durée maximale actuelle de présence est de 1 h 30.

La voie est électrifiée et d'une longueur de 5,3 km, dont 4,8 km sur crémaillère. La voie étant unique, une zone de croisement est aménagée au milieu du trajet afin de permettre la circulation simultanée de deux trains, un en montée et l'autre en descente. Le croisement est appelé croisement des Muletiers.

En octobre 2012, au niveau de ce croisement, une rame sans passager a déraillé sur un aiguillage et a basculé. Un audit a montré que l'accident était dû à une erreur humaine, mettant hors de cause le matériel et l'infrastructure. Le non-respect de la signalisation a entraîné le franchissement par le train de l'aiguillage qui était en cours de positionnement, ce qui a provoqué un déraillement (figure 1). La vitesse élevée de 18 km/h a eu un effet aggravant conduisant au basculement de la rame.



Figure 1 : déraillement du train (source Centre France)

Afin de limiter la vitesse des trains dans la zone des Muletiers, un système de surveillance automatique active (S.A.A.) est installé en complément des dispositifs de commande et de signalisation déjà existants.

L'étude qui suit a pour objectif de justifier le choix du système de sécurité mis en place sur ce train et d'en analyser les performances.

## 2. Analyse du besoin relatif au transport des personnes

---

*Objectif(s) de cette partie* : **valider** le cahier des charges du Panoramique des Dômes (nombre maximal de passagers transportés par heure et limite du nombre de personnes sur le site) et **justifier** le choix du mode de fonctionnement des trains.

---

Les caractéristiques de la circulation des trains sont les suivantes :

- durée d'un trajet, 15 min ;
- temps d'arrêt en gare (gare de sommet et gare de pied de site), 5 min ;
- capacité d'une rame (voir document technique DT5), 200 passagers ;
- nombre maximal de rames par train, 2 ;
- nombre maximal de trains sur la voie, 2 (1 en montée et 1 descente).

**Q1. Calculer** le nombre maximal de passagers que peut transporter le Panoramique des Dômes en une heure.

**Q2. Calculer** le nombre maximal de personnes, transportées par le train, qui peuvent être présentes simultanément au sommet. **Valider** le cahier des charges relatif à la capacité du site. **Identifier** les limites de cette estimation.

Une étude des relevés de consommation d'électricité fournis par EDF, pendant une journée type de fonctionnement, a permis d'évaluer les besoins énergétiques d'une rame pour atteindre le sommet.

Dans le cas de la circulation d'un seul train, la consommation d'électricité est de 118 kW·h par rame et par aller-retour.

Dans le cas de la circulation simultanée des deux trains, la consommation d'électricité est de 60 kW·h par rame et par aller-retour.

**Q3. Expliquer** comment la circulation simultanée de deux trains permet de limiter la consommation d'électricité.

**Q4. Justifier** le choix d'une voie unique avec circulation de deux trains.

## 3. Analyse des mesures de sécurité antérieures à la mise en place du système S.A.A.

---

*Objectif(s) de cette partie* : **analyser** et **critiquer** les mesures de sécurité mises en place avant l'accident concernant la gestion des voies au niveau du croisement des rames.

---

Le document technique DT1 décrit le principe de gestion de la circulation des trains sur la voie.

**Q5. Compléter** la première ligne du tableau du document réponse DR1 en y indiquant par une croix les parcours incompatibles.

Les états des parcours sont associés aux variables logiques  $F_{x \rightarrow y}$  ( $x$  et  $y$  étant les repères des feux de signalisation : lettres A à H).

$F_{x \rightarrow y} = 1$  signifie que le parcours  $x \rightarrow y$  est formé.

$F_{x \rightarrow y} = 0$  signifie que le parcours  $x \rightarrow y$  n'est pas formé.

**Q6. Préciser** quel doit être l'état des différentes variables logiques pour empêcher le parcours A→D de passer de l'état « commandé » à l'état « formé » en maintenant le feu au rouge.

**Q7. Expliquer** pourquoi ce dispositif est insuffisant et ne permet pas d'éviter un déraillement comme décrit précédemment.

#### 4. Mise en place du système S.A.A.

---

*Objectif(s) de cette partie : analyser* la pertinence de la mise en place du système S.A.A.

---

Pour éviter qu'une erreur humaine ne conduise à un accident, un système de surveillance automatique active (S.A.A.) est ajouté au système de signalisation et de commande précédemment étudié. Son fonctionnement est décrit sur le document technique DT2.

Le système S.A.A. a pour rôle de prendre le contrôle de la rame en cas de défaillance du conducteur.

Les consignes de conduite au niveau du croisement des Muletiers sont décrites sur le document technique DT3.

Le comportement du système S.A.A. à ce croisement est décrit partiellement par un algorithme fourni dans le document technique DT4.

**Q8. Montrer** que le système S.A.A. intervient seulement si le conducteur ne respecte pas les consignes de conduite.

#### 5. Validation des systèmes de freinage

---

*Objectif(s) de cette partie : valider* le dimensionnement des systèmes de freinage.

---

Le freinage du train peut être effectué grâce à trois systèmes distincts :

- frein électrique ;
- premier frein mécanique appelé frein système 1 ;
- second frein mécanique appelé frein système 2 (non étudié dans ce sujet).

#### Validation du dimensionnement du constituant principal du système de freinage électrique

Le frein électrique est utilisé pour le maintien de la vitesse à la descente, la réduction de la vitesse en service normal, et en appui du freinage système 1 en cas de freinage d'urgence.

Le document réponse DR2 présente sous la forme d'une vue synoptique partielle les chaînes fonctionnelles relatives au freinage.

Les constituants de la chaîne d'énergie sont reliés entre eux par un lien de puissance (demi-flèche) transportant les deux grandeurs dont le produit caractérise le transfert de puissance entre ces constituants.

Par exemple, lorsque l'on souhaite préciser les deux grandeurs précédentes sur un lien de puissance dans le cas d'une puissance électrique, la notation est la suivante :

$$\frac{U(V)}{I(A)}$$

**Q9.** Dans les cadres en pointillés du synoptique de la chaîne d'énergie présenté sur le document réponse DR2, **indiquer** les grandeurs correspondant à la puissance transportée par chacun des liens de puissance.

Lors de la descente, avant le croisement des Muletiers, lorsque la rame atteint la balise amont (BAM) avec une vitesse inférieure ou égale à 23 km/h, le freinage électrique est enclenché par le S.A.A. pour ramener la vitesse à 10 km/h.

Le moteur se comporte alors en générateur et ré-injecte l'énergie de freinage sur la ligne aérienne de contact (L.A.C. voir figure 2). S'il n'y a pas un second train en service pour récupérer cette énergie, celle-ci est stockée dans le condensateur C, situé en amont du convertisseur et provoque une élévation de la tension continue côté L.A.C. (voir figure 2).

Le rôle du hacheur est d'abaisser cette tension en aiguillant l'énergie récupérée vers une résistance de freinage.

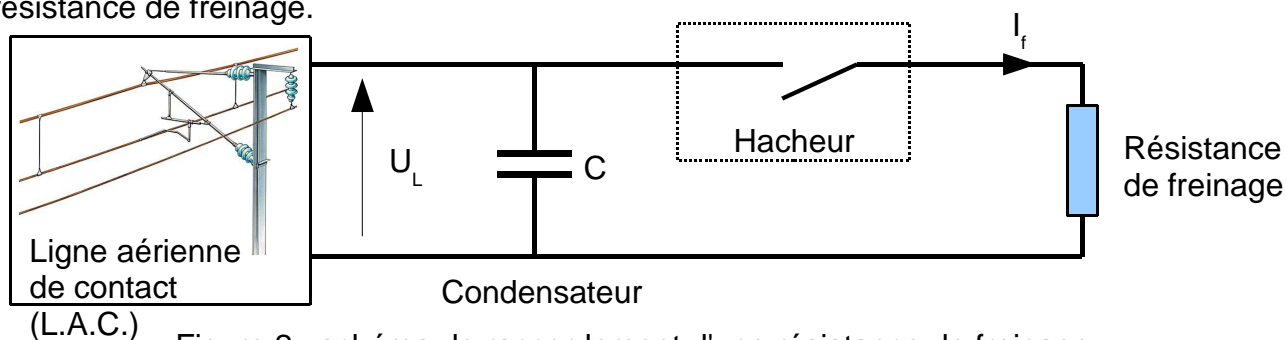


Figure 2 : schéma de raccordement d'une résistance de freinage

Afin d'étudier le comportement thermique de la résistance de freinage, on réalise un modèle multi-physique présenté sur le document technique DT6. Pour renseigner ce modèle, il est nécessaire de déterminer les puissances électriques moyennes fournies à la résistance en début et en fin de freinage.

La figure 3 présente l'allure de l'évolution de la puissance instantanée fournie à la résistance électrique lors du freinage.

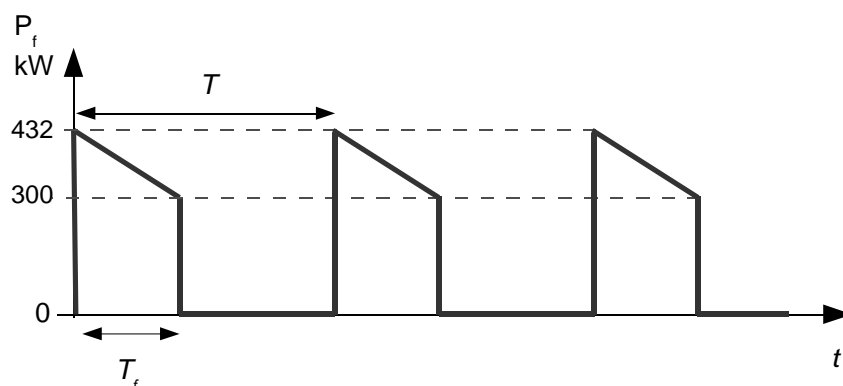


Figure 3 : allure de l'évolution de la puissance instantanée lors du freinage

En début de freinage  $T_f = 0,575 T$  et en fin de freinage  $T_f = 0,25 T$ .

**Q10. Déterminer** la valeur moyenne de la puissance électrique dissipée par cette résistance en début puis en fin de freinage.

La modélisation thermique de la résistance et de son environnement permet de simuler l'évolution de la température de la résistance (voir document technique DT6).

La température maximale admise par la résistance est de 600 °C. Au delà, il y a un risque de détérioration de la résistance.

La durée de freinage est de 10 s et la température initiale, due à des freinages antérieurs, est de 200 °C.

**Q11. Valider** le dimensionnement de la résistance de freinage.

### Validation du système de freinage « frein système 1 »

Le document technique DT5 présente la description d'une rame, ainsi que la répartition des différents dispositifs de freinage.

En cas de défaillance du système de freinage électrique, doublée d'une défaillance humaine, et dans les conditions de vitesse les plus extrêmes, le S.A.A. est chargé de commander le freinage d'urgence système 1, afin d'arrêter le train avant l'aiguillage.

La distance entre la balise et l'aiguillage est de 45 m.

Le dispositif de freinage système 1 est un système de freinage à bande sur un tambour, actionné par un vérin pneumatique. Un tambour est fixé à un essieu du bogie. L'ensemble est schématisé dans le document technique DT7.

Lors du freinage, la pression (notée  $p$ ) dans la chambre alimentée du vérin, est fixée à 6 bar. Les caractéristiques du vérin sont données sur le document technique DT7.

Les cinq questions suivantes ont pour objectif de calculer l'effort total de freinage qu'une rame est capable d'appliquer sur la voie à l'aide du dispositif de freinage 1.

**Q12. Préciser** si la tige du piston doit sortir ou rentrer pour actionner le freinage.  
**Calculer** l'intensité de  $\|\vec{F}_{\text{vérin}}\|$ , effort exercé par la tige (5) du vérin sur le renvoi (6).

**Q13.** En indiquant précisément les théorèmes de la mécanique utilisés et les ensembles matériels isolés, **justifier** la relation  $\|\vec{F}_{7 \rightarrow 1}\| = \|\vec{F}_{\text{vérin}}\|$ .

Pour un dispositif de freinage à bande tel que celui qui est utilisé ici, la relation reliant les intensités des efforts  $\vec{T}_b$  et  $\vec{t}_b$  appliqués par le levier 1 sur chaque extrémité de la bande 3, dépend uniquement de l'angle d'enroulement de la sangle sur le tambour et du coefficient de frottement suivant la formule suivante :

$$\frac{\|\vec{T}_b\|}{\|\vec{t}_b\|} = e^{f\theta} \quad (\text{avec } \theta \text{ en radian})$$

$f$  désigne le facteur de frottement :  $f = 0,37$  .

$\theta$  désigne l'angle d'enroulement :  $\theta = 270^\circ$  .

**Q14.** En indiquant précisément les théorèmes de la mécanique utilisés et les systèmes matériels isolés, **justifier** la relation  $\|\vec{t}_b\| = \frac{AB \cdot \|\vec{F}_{\text{vérin}}\|}{AC \cdot (e^{f\theta} + 1)}$ .

L'effort de freinage que peut exercer un dispositif de freinage système 1 sur la voie s'écrit :

$$\|\vec{F}_{f1}\| = \frac{2}{d_{\text{roue}}} \frac{D_{\text{tambour}}}{2} (e^{f\theta} - 1) \|\vec{t}_b\|$$

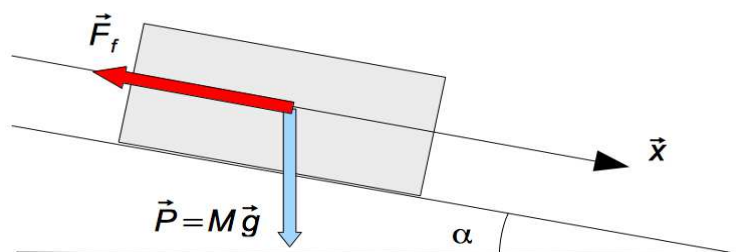
$D_{\text{tambour}}$  désigne le diamètre du tambour (2) .

$d_{\text{roue}}$  désigne le diamètre nominal de la roue dentée (voir document technique DT5).

**Q15.** **Calculer** l'effort de freinage  $\|\vec{F}_{f1}\|$  exercé par un seul dispositif de freinage système 1.

**Q16.** **Calculer** l'effort total de freinage  $\|\vec{F}_f\|$  exercé par l'ensemble des dispositifs de freinage système 1 qui équipent la rame.

Au niveau du croisement des Muletiers, la déclivité de la voie est de 15 %. La figure 4 représente les actions mécaniques auxquelles est soumise la rame en situation de freinage d'urgence avec le dispositif de freinage système 1.



(déclivité =  $\sin \alpha$ )

Figure 4 : actions exercées sur la rame en freinage d'urgence lors de la descente



**Q17.** En appliquant le théorème de la résultante dynamique à la rame suivant la direction  $\vec{x}$ , **démontrer** que l'expression de la distance de freinage est  $d = \frac{V^2}{2\left(\frac{-F_f}{M} + g \sin \alpha\right)}$ . **Calculer** la distance nécessaire pour stopper la rame si la vitesse initiale est égale à 28,4 km/h.

Des essais de freinage d'une rame ont permis d'obtenir la valeur réelle de la distance de freinage qui vaut 35 m.

**Q18.** **Justifier** l'écart entre la valeur mesurée et la valeur calculée de la distance de freinage.

**Q19.** **Valider** le dimensionnement du dispositif de freinage système 1.

## 6. Acquisition et affichage de la vitesse par le système S.A.A.

*Objectif(s) de cette partie :* **vérifier** l'efficacité et la fiabilité du système de surveillance de la vitesse.

Les centrales tachymétriques T.R.A.S. (transportation recording analysing system) sont des éléments essentiels du dispositif de surveillance automatique active (S.A.A.).

Elles ont pour fonction d'acquérir, de traiter, d'enregistrer et de communiquer les données importantes du trafic telles que la vitesse ou la position de la rame (voir figure 5).

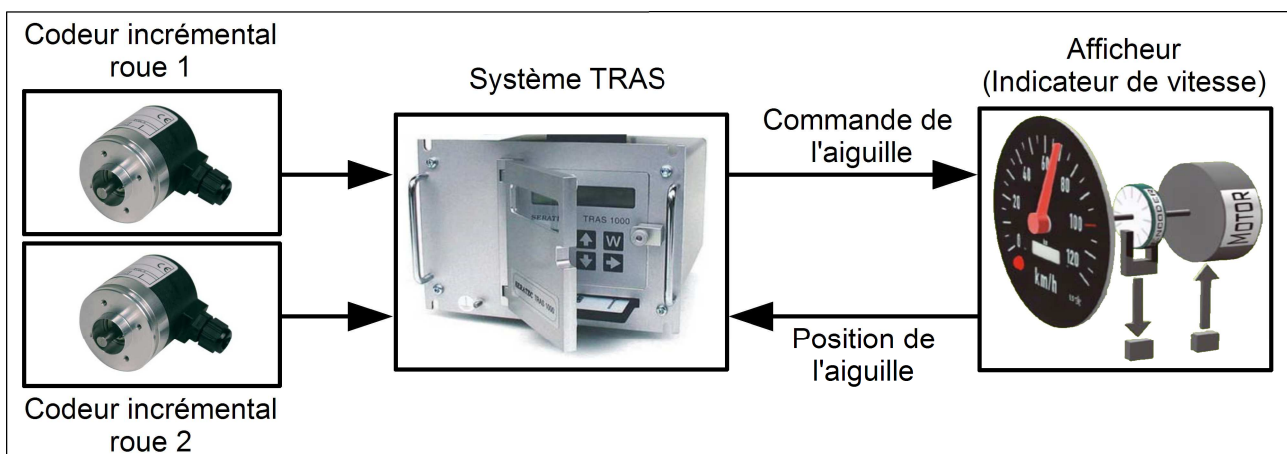


Figure 5 : centrale tachymétrique T.R.A.S.

Chaque centrale tachymétrique calcule la vitesse du train à partir des signaux provenant d'un codeur incrémental placé sur l'axe d'une des roues du train.

Par mesure de sécurité, un second codeur est placé sur une autre roue du train.

Chaque centrale tachymétrique compare les signaux provenant des deux codeurs et signale un défaut si ces signaux sont différents.

La figure 6 représente le relevé du signal issu d'un des deux codeurs.

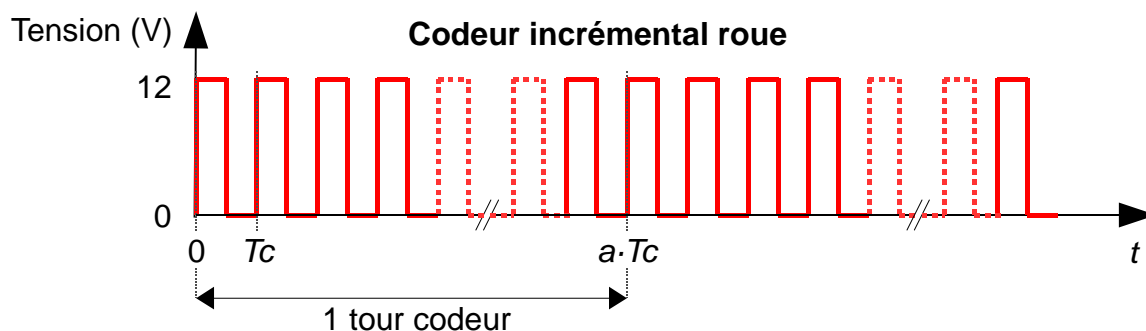


Figure 6 : signal issu d'un codeur incrémental

Le codeur choisi a une résolution  $a$  de 360 impulsions/tour. Le diamètre  $D$  de la roue est de 796 mm.

Le cahier des charges impose une erreur inférieure à 5 % sur l'acquisition de la vitesse.

Afin de vérifier l'exactitude de la mesure de vitesse, on a relevé le signal issu d'un codeur incrémental pour une vitesse affichée de 24 km/h (figure 7).

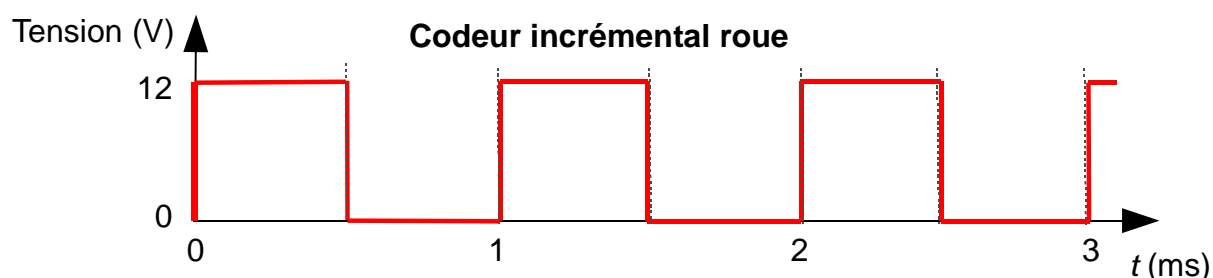


Figure 7 : signal issu d'un codeur incrémental à 24 km/h.

**Q20. Déterminer**, en pourcentage, l'erreur d'acquisition de la vitesse. **Valider** le choix du codeur.

La centrale tachymétrique assure également l'affichage de la vitesse à destination du conducteur.

L'afficheur utilisé est à retour d'information : un codeur incrémental est fixé sur l'axe de l'aiguille et un compteur interne à l'afficheur comptabilise les impulsions issues du codeur. La valeur  $N_C$  du compteur est communiquée via une liaison série RS485 à la centrale tachymétrique.

**Q21. Justifier** le choix d'un afficheur à retour d'information.

## 7. Conclusion

**Q22. Énumérer** les solutions étudiées dans le sujet qui permettent d'assurer la sécurité des passagers du Panoramique des Dômes. **Commenter** ces solutions.

**Q23. En déduire** si oui ou non les systèmes étudiés sont suffisants pour éviter la collision de deux trains ? **Justifier** la réponse et **proposer** une solution si nécessaire.

## Document technique DT1

### Principe de gestion de la circulation des trains

La voie est découpée en « **zones** » délimitées par des compteurs d'essieux<sup>1</sup> (détecteurs de présence) permettant au centre de commande de connaître la position des trains.

Sur la voie, un train peut emprunter différents itinéraires, repérés par des feux de signalisation (de A à H sur la figure 8).

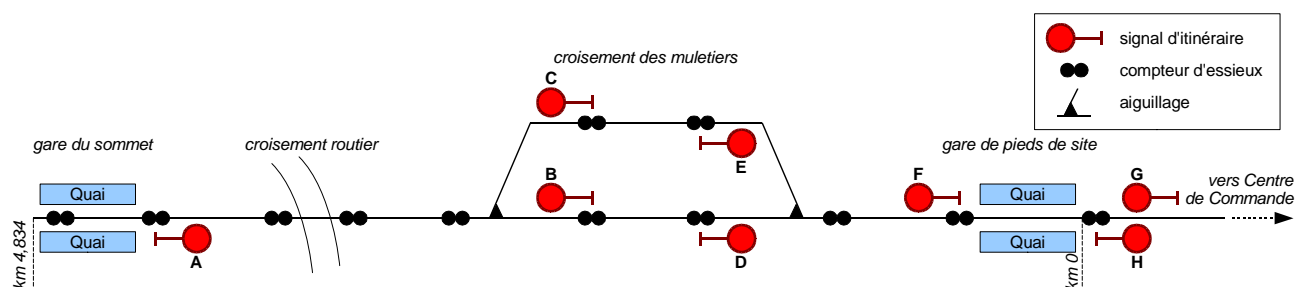


Figure 8 : principe de gestion de la circulation des trains

On appelle « parcours » un ensemble de zones empruntées par un train dans un sens de marche donné.

Des parcours sont dits incompatibles quand ils ne peuvent être empruntés en même temps par les deux trains (voir document réponse DR1). Dans ce cas le feu de signalisation est maintenu au rouge.

Un parcours peut prendre plusieurs états.

1. Un parcours est **commandé** lorsqu'une demande d'autorisation du parcours est faite par un train.
2. Un parcours est **formé** lorsque la protection vis-à-vis des parcours incompatibles est assurée, c'est-à-dire lorsqu'il peut être emprunté en toute sécurité par un train.

Dans tous les cas, c'est le conducteur qui prend la décision de s'engager ou pas sur un parcours.

<sup>1</sup> un essieu est un arbre supportant les roues d'un véhicule (voir document technique DT5).

## Document technique DT2

## Système S.A.A.

Le système de surveillance automatique active (S.A.A.) comprend plusieurs composants qui permettent la communication entre le train, la voie, le conducteur et la société qui exploite le Panoramique des Dômes (figure 9).

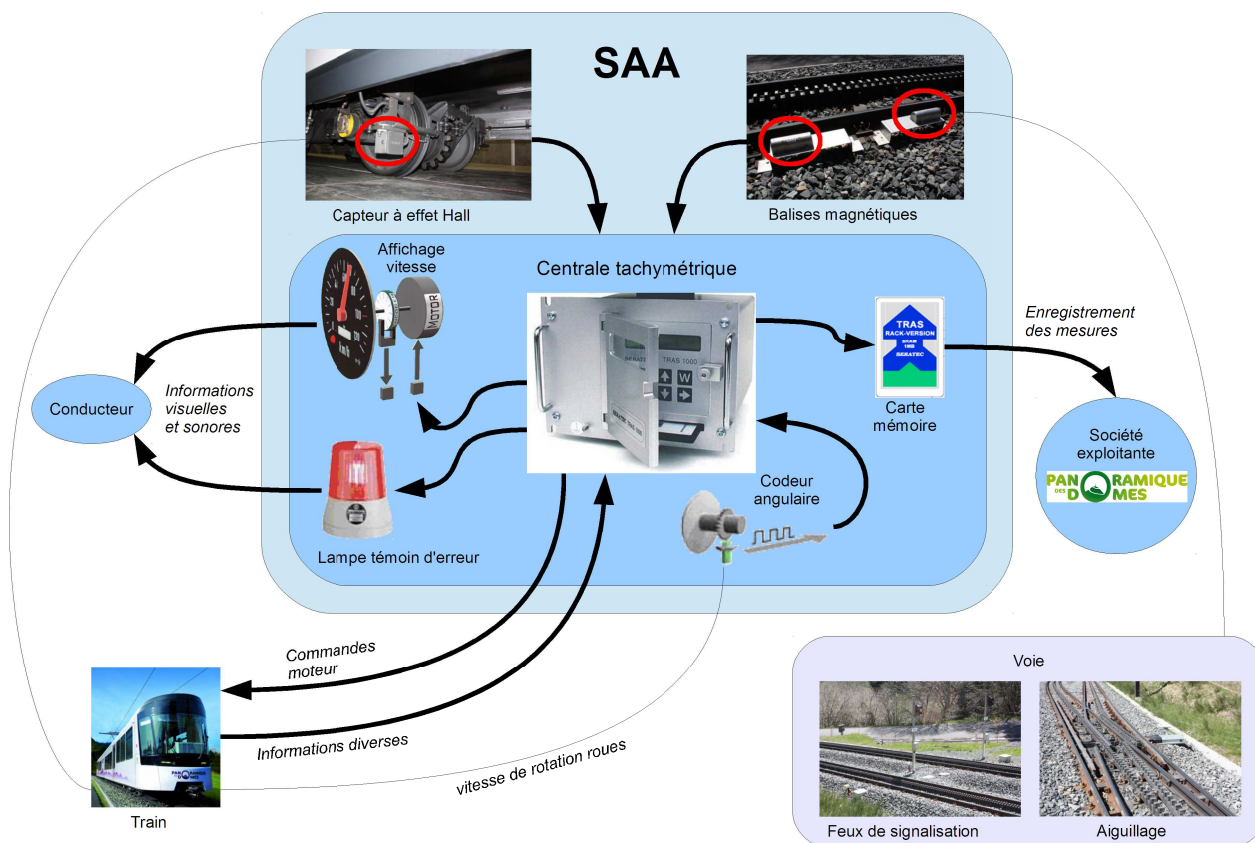


Figure 9 : système S.A.A.

Pour des raisons de sécurité, deux centrales tachymétriques (une seule est représentée sur la figure 9) assurent de façon redondante les mesures de vitesse, la détection des sur-vitesses et l'enregistrement de divers signaux. En cas de dysfonctionnement d'une des centrales un signal visuel d'alarme est activé sur le pupitre du conducteur. Chaque centrale possède deux capteurs de vitesse, ce qui offre une sécurité supplémentaire.

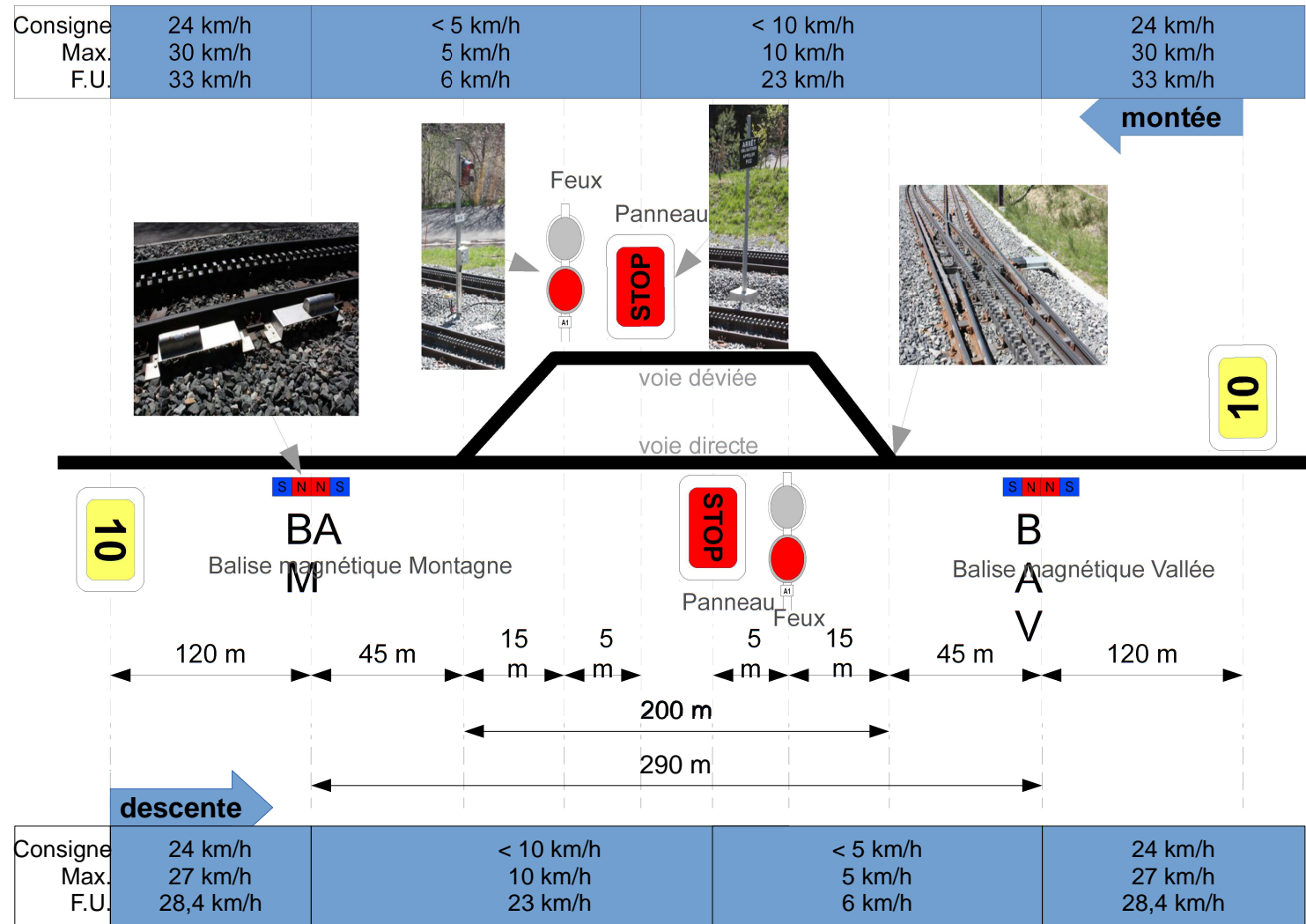
Les centrales reçoivent depuis des balises magnétiques des informations concernant la position de la rame.

Le S.A.A. agit sur le système de commande électrique parallèlement à l'action du conducteur. L'ordre d'augmenter ou de réduire la vitesse est transmis à l'électronique de commande de la rame. En cas d'anomalie constatée, un freinage d'urgence est commandé.

Le freinage d'urgence de la rame comporte deux systèmes. Toutes les commandes de freinage d'urgence du système S.A.A. sont câblées de telle façon que l'action du conducteur puisse rester prioritaire sur les systèmes automatiques de freinage.

### Schéma de conduite au croisement des Muletiers

Figure 10 : schéma de conduite au croisement des Muletiers



Consigne = vitesse conseillée  
 Max = vitesse maximale autorisée  
 F.U. = vitesse déclenchant un freinage d'urgence jusqu'à l'arrêt du train

## Document technique DT4

## Comportement de la S.A.A.

Passage du croisement des Muletiers en descente

```

1 Faire
2   SignalBalise ← AcquérirSignalBalise()
3 Jusqu'à SignalBalise = VRAI

4 Vitesse ← AcquérirVitesse()
5 Distance ← 0
6 Si Vitesse > 23 km/h alors
7   AppliquerFreinageFU1()

8 Sinon
9   Si Vitesse > 10 km/h alors
10    EffortFreinageElectrique ← CalculerEffort(Vitesse)
11    Faire
12      Vitesse ← AcquérirVitesse()
13      AppliquerFreinageElectrique(EffortFreinageElectrique)
14    Jusqu'à Vitesse ≤ 10 km/h
15    Fin Si

16  Faire
17    Distance ← AcquérirDistance()
18  Jusqu'à Distance = DistancePanneau

19  Vitesse ← AcquérirVitesse()
20  Si Vitesse > 6 km/h alors
21    AppliquerFreinageFU1()
22  Fin Si

23  Faire
24    Distance ← AcquérirDistance()
25    Vitesse ← AcquérirVitesse()
26  Jusqu'à Distance = DistanceFeux OU Vitesse = 0

28  Vitesse ← AcquérirVitesse()
29  Si Vitesse > 0 alors
30    AppliquerFreinageFU1()
31  Fin Si

32 Fin Si

33 Faire
34   Vitesse ← AcquérirVitesse()
35 Jusqu'à Vitesse = 0

```

*(commentaire : après l'arrêt complet, le conducteur redémarre le train)*

Constantes
<i>DistancePanneau</i> Distance entre la balise BAM et le panneau d'arrêt
<i>DistanceFeux</i> Distance entre la balise BAM et les feux de signalisation

Fonctions
<i>AcquérirSignalBalise()</i> Renvoie l'état du capteur à effet Hall indiquant la présence d'une balise magnétique
<i>AcquérirVitesse()</i> Renvoie la vitesse instantanée de la rame
<i>AcquérirDistance()</i> Renvoie la distance parcourue par la rame depuis le franchissement des balises BAM
<i>CalculerEffort(VitesseBAM)</i> Calcule et renvoie l'effort de freinage nécessaire en fonction de la vitesse de franchissement de la BAM
<i>LimiterVitesse(vitesse)</i> Limite, si nécessaire, la vitesse de la rame à la valeur donnée
<i>AppliquerFreinageElectrique(intensité)</i> Applique un effort de freinage électrique avec une intensité donnée
<i>AppliquerFreinageFU1()</i> Actionne le système freinage d'urgence 1 jusqu'à l'arrêt complet du train

## Document technique DT5

### Description d'une rame

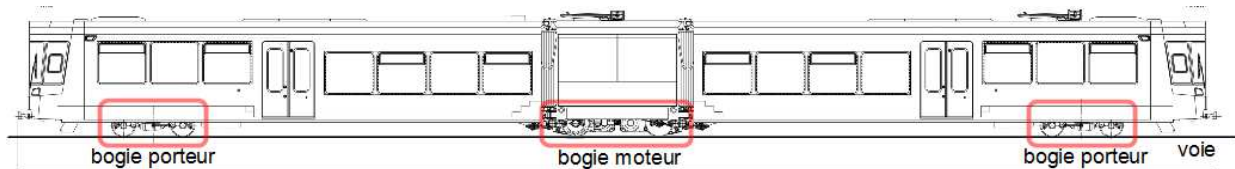


Figure 11 : description d'une rame

#### Caractéristiques générales :

- masse totale maximale en charge, 65 t ;
- longueur, 36,43 m.

#### Description d'un bogie et d'un train à crémaillère

Un bogie est un chariot situé sous la rame qui comprend deux essieux et quatre roues. Il est mobile par rapport à la rame de façon à s'orienter convenablement dans les courbes de la voie.

L'entraînement d'un train à crémaillère est réalisé au moyen d'une roue dentée fixée sur un des essieux moteurs et d'une crémaillère fixée sur la voie.

#### Répartition des dispositifs de freinage

Chaque rame est constituée d'un bogie moteur et de deux bogies porteurs.

Le bogie moteur sur le module central comprend :

- deux dispositifs de freinage système 1 ;
- deux dispositifs de freinage système 2.

Les deux bogies porteurs aux extrémités de la rame, qui comprennent chacun :

- un dispositif de freinage système 1,
- un dispositif de freinage système 2.

#### Caractéristiques de la crémaillère et des roues dentées

Le diamètre nominal de la roue dentée est de 668 mm.

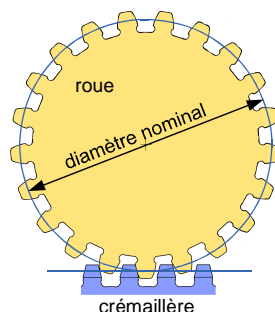


Figure 12 : mécanisme roue / crémaillère



## Document technique DT6

## Modèle multi-physique d'une résistance de freinage

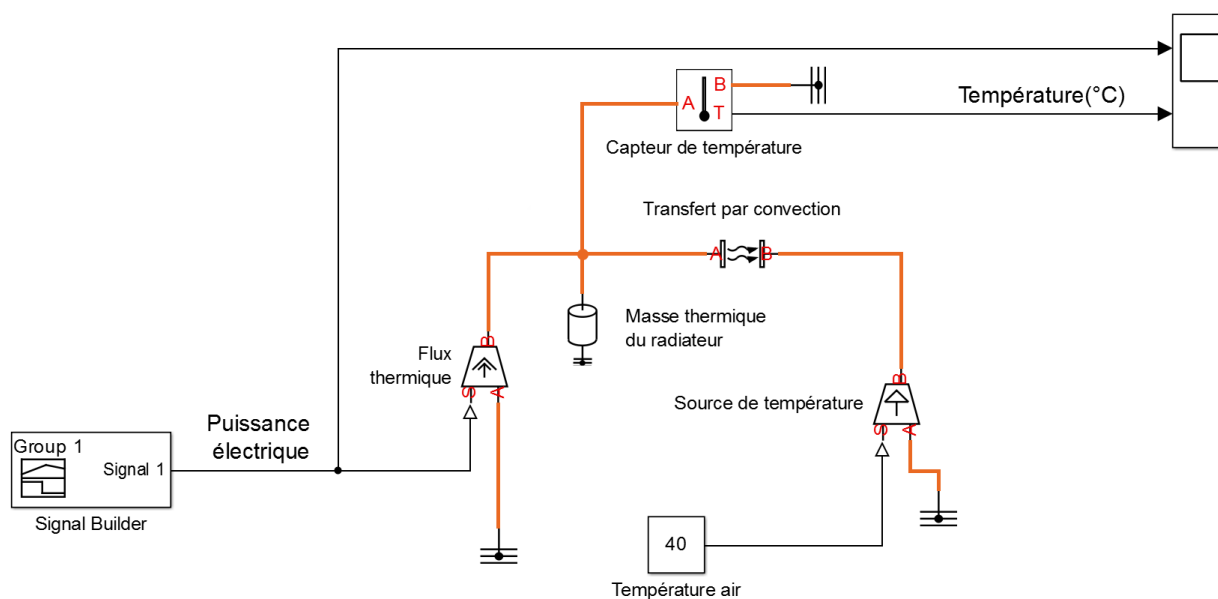


Figure 13 : modèle multi-physique d'une résistance de freinage

## Relevés de la simulation

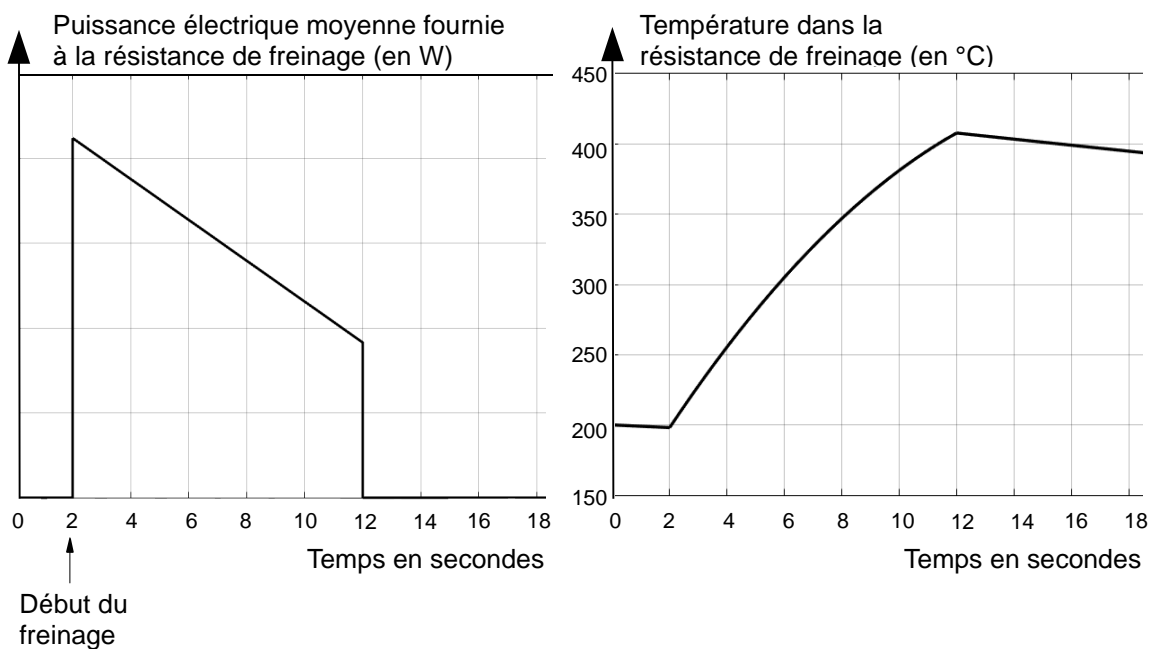


Figure 14 : relevés de simulation

## Document technique DT7

## Schéma cinématique du dispositif de freinage (freinage d'urgence système 1)

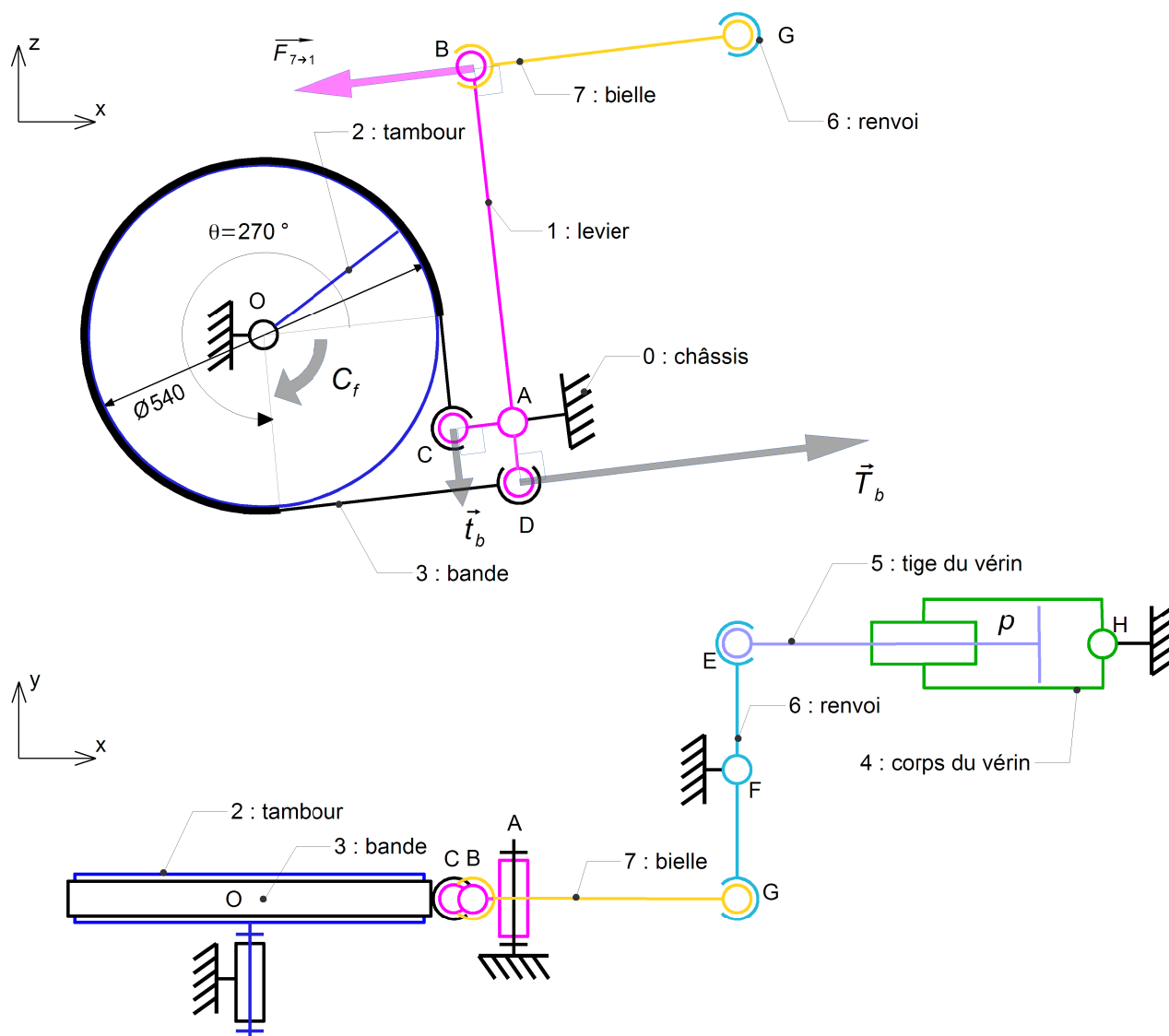


Figure 15 : schéma cinématique du dispositif de freinage

$$AB = 570 \text{ mm}$$

$$AC = AD = 85 \text{ mm}$$

$$EF = FG$$

### Caractéristiques du vérin pneumatique

#### (freinage d'urgence système 1)

- diamètre du piston 160 mm ;
- diamètre de la tige 25 mm ;
- course 50 mm.

## Document réponse DR1

**Parcours incompatibles**

Des parcours sont dits incompatibles quand ils ne peuvent pas être empruntés en même temps par les deux trains.

		Parcours train A							
		G→F	F→B	F→C	B→A	C→A	D→H	E→H	A→E
Parcours train B	A→D								
	A→E			X	X	X			
	E→H	X	X	X			X		
	D→H	X	X	X					
	C→A				X				
	B→A								
	F→C		X						
	F→B								

X = parcours incompatibles  
exemple :  
D→H incompatible avec F→C, ...

Document réponse DR2

# Chaînes fonctionnelles - FREINAGE

