

SESSION 2016

---

## AGRÉGATION CONCOURS INTERNE ET CAER

### Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Options :** Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique,  
Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique,  
Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des  
constructions.

### ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 4 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.*

Tournez la page S.V.P.

## **Sujet :**

Présentation	page 2
Première partie	page 8
Deuxième partie	page 11
Troisième partie	page 15
Quatrième partie	page 19
Cinquième partie	page 23

## **Documents :**

Documentation technique (DT1 à DT9)	pages 29 à 39
Documents réponses (DR1 à DR6)	pages 40 à 45

- **Le sujet comporte 5 parties indépendantes qui peuvent être traitées dans un ordre indifférent.**
- **Les différentes parties seront traitées sur des copies séparées.**
- **Toutes les réponses devront être détaillées sur la copie et les résultats encadrés ou soulignés.**
- **Préciser les unités des résultats.**
- **Tous les documents réponses DR1 à DR6, remplis ou non, sont à rendre avec les copies.**



## Présentation de l'Electric Green Taxiing System (EGTS)

### Contexte du projet EGTS :

Un des objectifs majeurs des avionneurs et des compagnies aériennes est la réduction de la consommation des aéronefs. Dans cette optique, le recours à **l'énergie électrique** pour les systèmes des avions se développe rapidement dans le secteur aéronautique.

Face à cette évolution, Safran est engagé de manière importante dans le développement de « **l'avion plus électrique** ». L'énergie électrique présente deux avantages importants :

- Simplification de la distribution énergétique dans l'avion.
- Simplification de la maintenance et des coûts (suppression des fuites).

La maturité de l'électronique de puissance a permis de multiplier les usages de l'énergie électrique dans les aéronefs (ex : commandes de vol, actionneurs électro-mécaniques, freins électriques).

Dans ce contexte, Safran développe en partenariat avec Honeywell **l'Electric Green Taxiing System (EGTS)**, présenté pour la première fois au public au salon du Bourget en Juin 2013. Grâce à cet actionneur électromécanique, situé au niveau des roues de l'avion et puisant son énergie dans l'APU (Auxiliary Power Unit), les avions seront en mesure de se déplacer au sol sans avoir recours à l'énergie des réacteurs principaux.



*Prototype de l'EGTS monté sur un train d'atterrissage principal*



### Les principaux avantages du système sont :

- Réduction de la consommation (-4 % de fuel burn sur un vol) et des émissions au sol (-75 % d'émissions de carbone et -50 % des émissions d'oxydes d'azote NOx).
- Maniabilité accrue des avions au sol (plus besoin d'aide au push-back).
- Moins de nuisances sonores dans - et aux alentours - des aéroports.
- Maintenance réduite, notamment des freins.
- Plus de fluidité dans le trafic au sol et réduction des risques au sol (réacteurs).
- Meilleure durée de vie des réacteurs.

A titre d'exemple, le gain potentiel est évalué à 200 000 \$ par avion et par an. Ainsi, pour une compagnie telle qu'Air France, qui possède 145 avions court ou moyen-courriers, l'économie est d'environ **29 millions de \$/an**, ce qui représente un gain financier conséquent. Les compagnies low-cost ont rapidement manifesté leur intérêt pour le système.

Ce projet, lancé en 2007, devrait aboutir à l'industrialisation du produit en **2016-2017** et serait monté à la fois en sortie d'usine et en retro-fit sur les avions déjà en service.

Trouvant son potentiel le plus important dans les avions court-courriers, qui effectuent un grand nombre de rotations par jour et passent donc une importante partie du temps en phase de taxiage (ex : navette Paris-Toulouse), le système est développé pour le moment pour les avions de ligne de petite capacité (gabarit **Airbus A320**). Safran a d'ailleurs acquis un A320 afin d'effectuer les essais réels du système sur avion.

Un des facteurs clés du système est son **poids**. En effet, en ajoutant un système EGTS par train principal, on transporte pendant le vol une masse supplémentaire. Il faut donc optimiser le poids pour avoir un rapport poids/performance permettant des **gains significatifs** de consommation.

### **Fonctionnement du système**

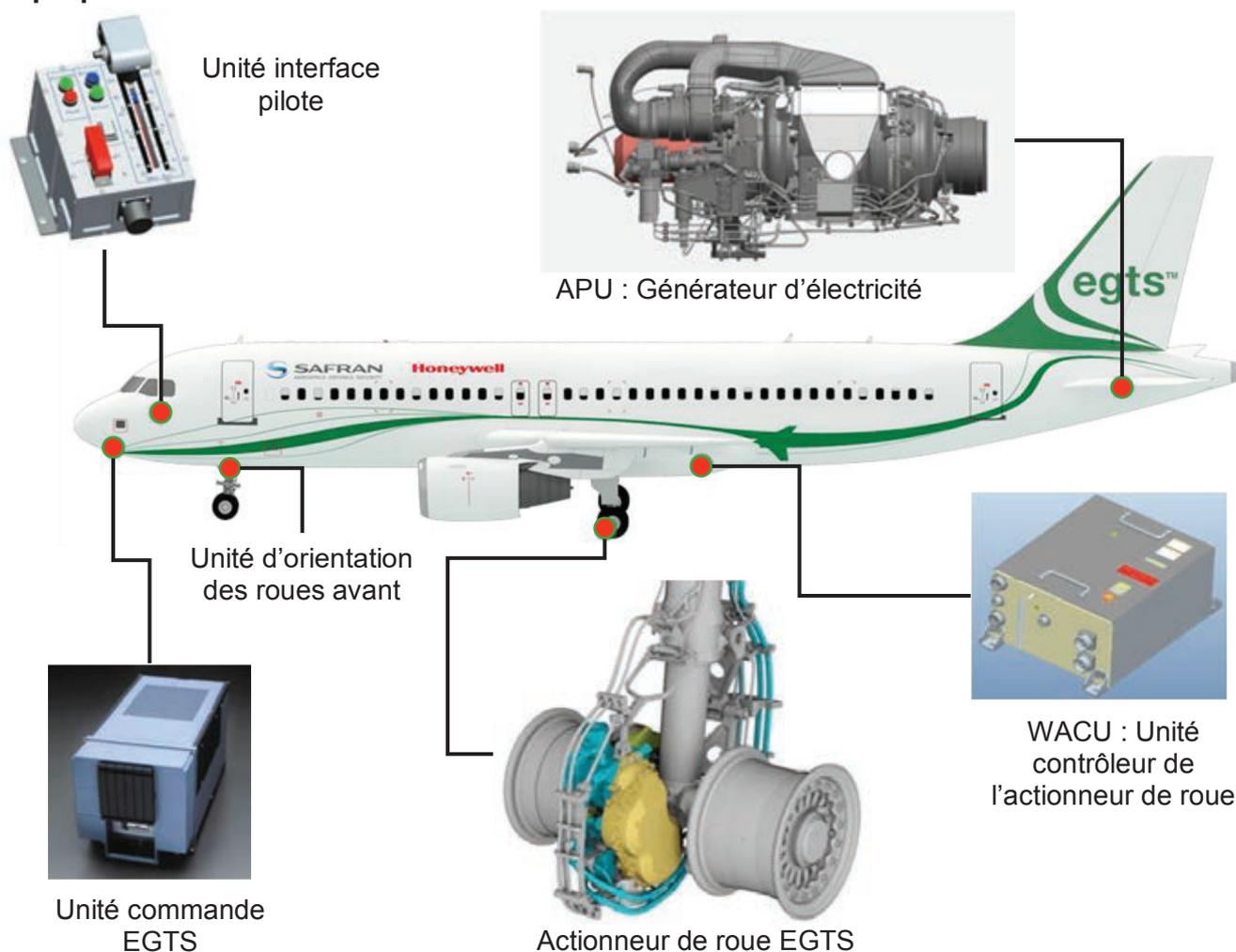
L'Electric Green Taxiing System est un **actionneur électro-mécanique** permettant de déplacer les avions au sol sans avoir recours à l'utilisation des réacteurs. Comme évoqué précédemment, le système vient prélever l'énergie nécessaire à son fonctionnement au niveau de l'**APU** (groupe auxiliaire de puissance, générateur d'énergie électrique lorsque les réacteurs sont à l'arrêt).

Sur l'A320 actuellement utilisé dans le cadre de la conception de l'EGTS, on trouve **un seul actionneur électromécanique par train principal**, donc 2 actionneurs au total pour l'avion. Un train principal comporte deux roues mais seule la roue extérieure est motorisée.

La phase appelée « taxi out » regroupe tous les déplacements de l'avion au sol à partir de son point de stationnement jusqu'à la piste en vue du décollage. Le système Green taxiing doit fonctionner durant toute la phase de taxiage de l'emplacement jusqu'au point d'arrêt. C'est à partir du point d'arrêt que les réacteurs sont mis en route. A ce moment-là, l'EGTS est désactivé afin ne pas entraver le bon déplacement de l'avion. Le système doit donc devenir transparent à partir de cette phase et pendant toute la phase de vol.

La phase de « Taxi In » regroupe tous les déplacements de l'avion à partir du moment où l'avion a dégagé la piste après l'atterrissage et dès que les réacteurs ont été éteints. Cette phase prend fin lorsque l'avion atteint son point de stationnement. L'EGTS est activé pendant cette phase de « Taxi In ».

## Synoptique de l'EGTS :



### Unité interface pilote :

Ce sous-système est une interface Homme-machine. Il permet au pilote d'activer (ou désactiver) le mode EGTS et de commander le mouvement désiré de l'avion (vitesse de déplacement et sens avant ou arrière).

### Unité commande EGTS :

Ce sous-système reçoit les informations du pilote et les convertit en ordre pour l'électronique de puissance.

### Unité contrôleur actionneur roue (WACU) :

Le WACU commande l'actionneur de roue (moteur électrique) en fonction de la commande du pilote délivrée par l'unité de commande EGTS.

### Actionneur de roue EGTS :

Ce sous-système composé d'un moteur électrique, d'un réducteur et d'un embrayage, convertit l'énergie électrique issue du WACU en énergie mécanique transmise à la roue.

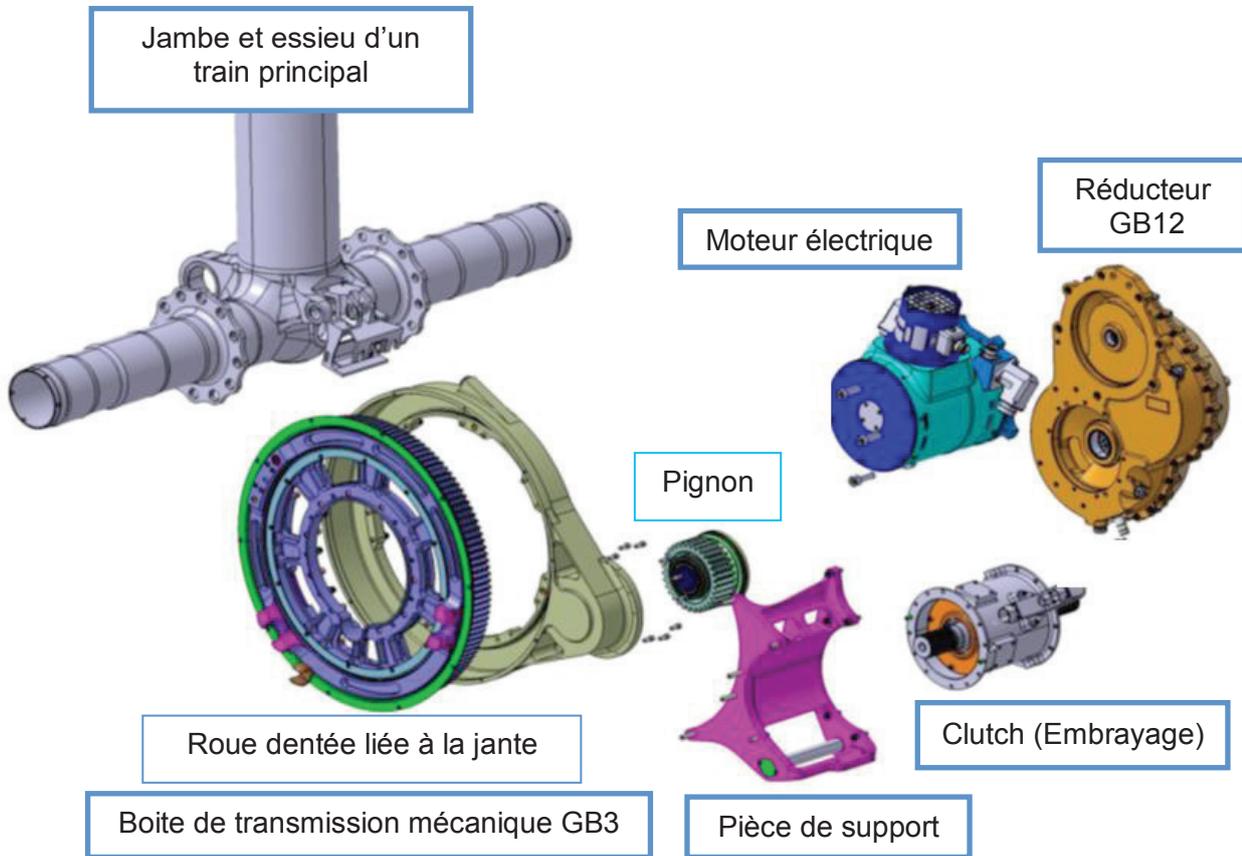
### APU Générateur :

Il alimente en énergie l'avion et en particulier l'EGTS. L'APU (Auxiliary Power Unit ou groupe auxiliaire de puissance) présent sur les avions a dû être modifié pour générer la puissance supplémentaire nécessaire pour alimenter les EGTS.

## Actionneur de roue EGTS :

La chaîne de transmission de puissance de l'EGTS comporte :

- Un moteur électrique PMSM (fourni par Honeywell).
- Un premier étage de réduction (appelé **Gearbox 12** – GB12).
- Un embrayage.
- Une transmission (appelée **Gearbox 3** – GB3) en liaison avec la roue de l'avion.



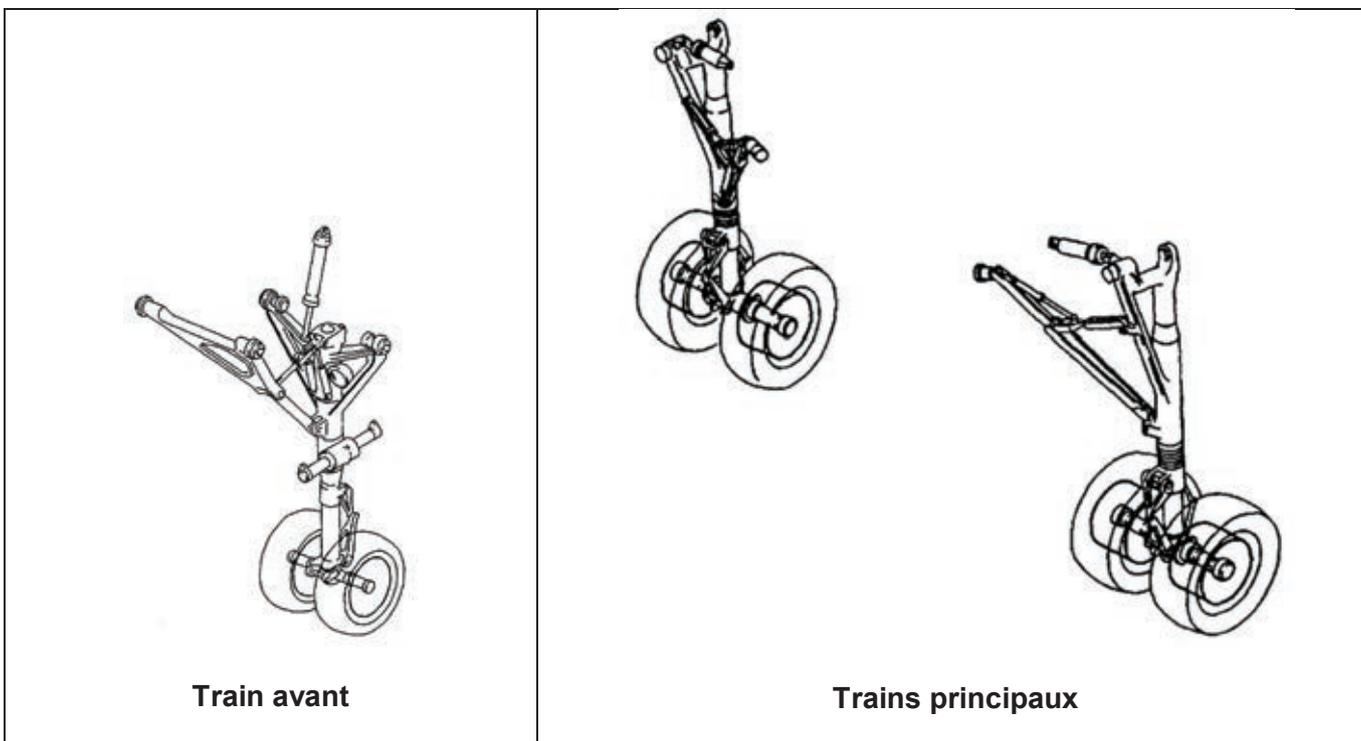
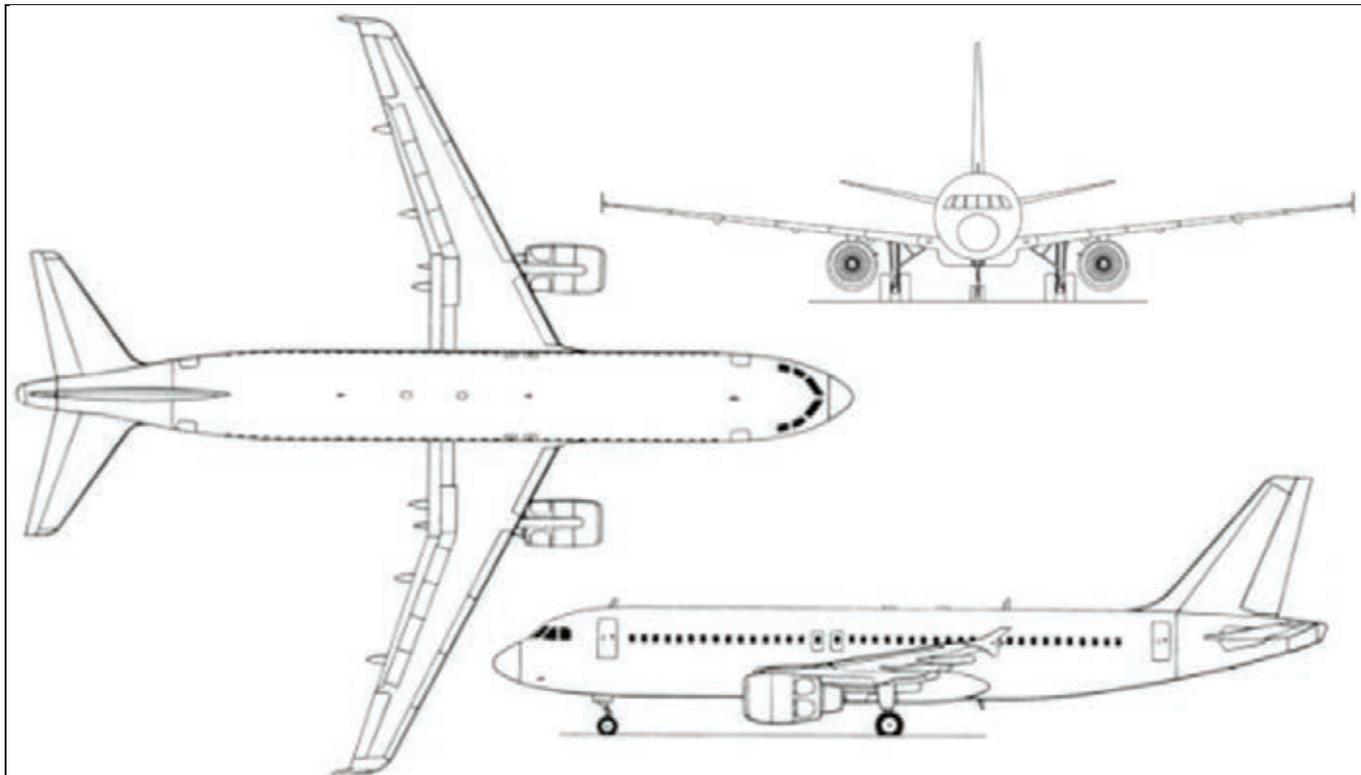
Réducteur GB3	Nombre de dents
Pignon	$Z_{4-5} = 32$
Roue dentée liée à la jante	$Z_5$

Réducteur GB12	Nombre de dents	
	Etape 1	Etape 2
Pignon	$Z_2 = 20$	$Z_{3-4} = 21$
Roue dentée	$Z_{3-2} = 79$	$Z_{4-3} = 71$



L'EGTS est implanté sur un Airbus A320 avion commercial équipé d'un train avant orientable ce qui permet au pilote de modifier la trajectoire de l'avion au sol lors du roulage et de deux trains principaux au niveau des ailes, chacun portant deux roues.

**Airbus A320 :**



**Train avant**

**Trains principaux**

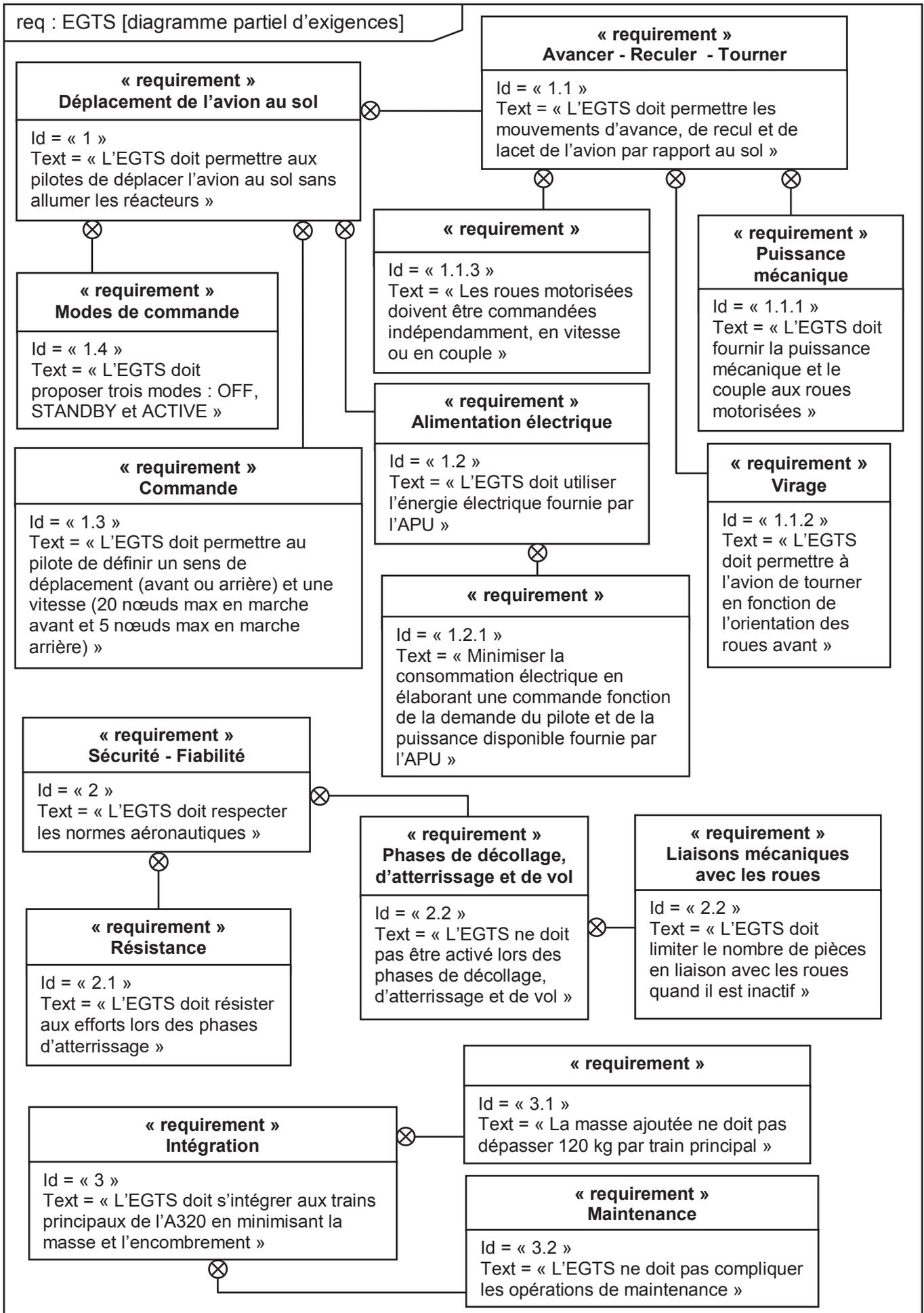
Masse maximale de l'A320 au décollage (MTOW) 79000 kg.

Vitesse maximale lors de l'atterrissage 195 kts (nœuds).

Roues des trains principaux :

- Rayon de roulement 0,55 m
- Coefficient de résistance au roulement des pneus [de 0,006 à 0,007] daN/kg

Diagramme partiel des exigences (*requirement diagram* « req ») :





Les 4 roues des trains principaux sont modélisées par des solides indéformables dont le rayon est noté ( $R = 0,55m$ ).

L'avion avance sur la piste en translation rectiligne, à l'aide des deux roues motorisées. Les réacteurs ne sont pas allumés. La vitesse de l'avion par rapport à la piste est notée  $V(t)$ .

Notation :  $\vec{\Omega}_{i/j} = \omega_{i/j} \vec{x}_a$  vecteur instantané de rotation du solide  $i$  dans son mouvement par rapport au solide  $j$ .

**Question 1.** A partir du modèle cinématique défini sur la **figure 1**, déterminer l'expression de  $k$  avec  $k = \left| \frac{\omega_{2/1}}{\omega_{5/1}} \right| = \left| \frac{\omega_{mot1}}{\omega_{rouem}} \right|$  en fonction des nombres de dents  $Z_i$  des différentes roues  $i$ . En déduire le nombre de dents  $Z_5$  sachant que  $k = 53$ .

**Question 2.** On suppose un roulement sans glissement des roues de l'avion par rapport à la piste. L'avion se déplace en ligne droite, sa vitesse par rapport à la piste est notée  $V(t)$ . Déterminer, en fonction de  $V(t)$ , l'expression de la vitesse de rotation des rotors des moteurs  $M1$  et  $M2$  par rapport au train principal. Ces vitesses seront notées respectivement  $\omega_{mot1}$  et  $\omega_{mot2}$ .

**Question 3.** Lors du taxiage, le CdCF donne une vitesse maxi de l'avion par rapport à la piste de  $20 \text{ kts} = 20 \text{ noeuds}$  ( $1 \text{ noeud} = 1,852 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ), calculer la vitesse de rotation maximale des moteurs en  $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ .

On se place maintenant dans le cas où l'avion effectue un virage. Le mouvement de l'avion par rapport à la piste est un mouvement plan, on définit le point  $I$  (appelé Centre Instantané de Rotation de l'avion/piste) tel que :  $\vec{V}(I, avion/piste) = \vec{0}$ .



Avion lors d'un virage à droite

**Notations :**

- Le repère  $\mathfrak{R}_p(I, \vec{x}_p, \vec{y}_p, \vec{z}_p)$  lié à la piste avec  $\vec{y}_p$  dans l'axe de la piste et  $\vec{z}_p$  normal ascendant à la piste.
- Le repère  $\mathfrak{R}_a(E, \vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$  lié à l'avion (fuselage) avec  $\vec{z}_a = \vec{z}_p$ .
- Le repère  $\mathfrak{R}_{ta}(D, \vec{x}_{ta}, \vec{y}_{ta}, \vec{z}_{ta})$  lié au train avant orientable de l'avion avec  $\vec{z}_{ta} = \vec{z}_a$ .
- Le rayon moyen du virage est noté  $Rvm$ .
- Soit  $E$  le point médian des deux trains principaux, la vitesse du point  $E$  appartenant à l'avion dans son mouvement par rapport à la piste :  $\vec{V}(E, avion/piste) = V(t) \vec{y}_a$  et  $[IE] = Rvm$ .



## Deuxième partie – Étude de la motorisation

**Objectif de cette partie :** Déterminer le couple à appliquer aux deux roues motorisées pour permettre le déplacement de l'avion selon les exigences du CdCF et dimensionner le moteur.

### Phase de démarrage :

On considère le scénario suivant :

A l'instant  $t = t_0$ , l'avion est à l'arrêt et le pilote ordonne un déplacement de l'avion sur la piste. Seules les deux roues motorisées permettent le déplacement de l'avion, les réacteurs ne sont pas allumés.

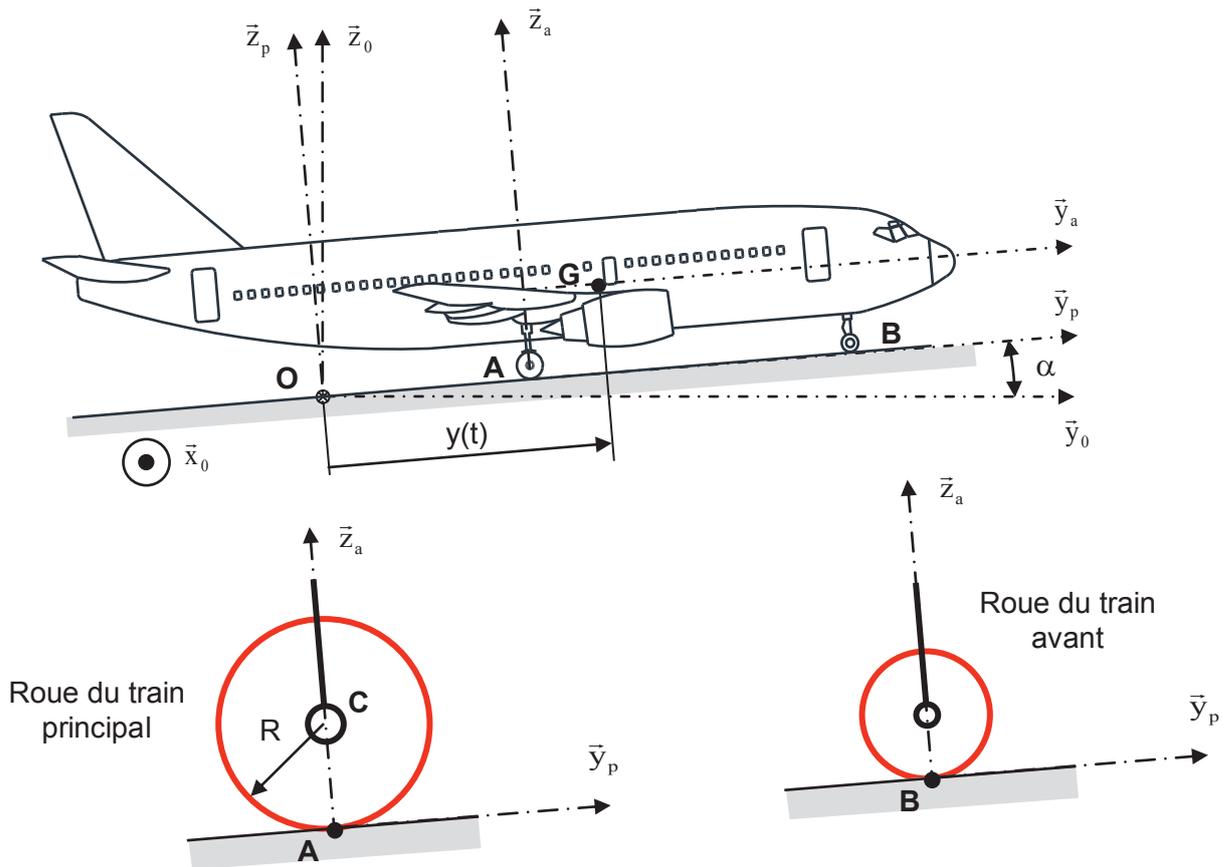


Figure 3 : modèle et paramétrage

### Notations, données numériques et hypothèses :

- Le repère  $\mathfrak{R}_0(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  lié à la Terre, est supposé galiléen.
- Le repère  $\mathfrak{R}_p(O, \vec{x}_p, \vec{y}_p, \vec{z}_p)$  lié à la piste avec  $\vec{x}_p = \vec{x}_0$ .
- Le repère  $\mathfrak{R}_a(G, \vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$  lié à l'avion avec  $(\vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a) = (\vec{x}_p, \vec{y}_p, \vec{z}_p)$ .
- Le centre de masse  $G$  de l'avion est confondu avec son centre de gravité et  $\overrightarrow{OG} = y(t)\vec{y}_a + h\vec{z}_a$ .
- L'avion se déplace en ligne droite dans une phase de montée, le problème est considéré comme un problème plan.
- On note  $\vec{a}(G, avion/0) = \gamma\vec{y}_a$ , le vecteur accélération du centre de masse  $G$  de l'avion dans son mouvement par rapport à la piste.
- La masse totale de l'avion :  $M = 79 \times 10^3 \text{ kg}$ .
- L'accélération de pesanteur :  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .
- $\overrightarrow{AG} = L_1\vec{y}_a + h\vec{z}_a$  et  $\overrightarrow{AB} = L_2\vec{y}_a$  ( $L_1 = 1,5 \text{ m}$ ,  $L_2 = 12,7 \text{ m}$  et  $h = 4 \text{ m}$ ). Les points  $A$  et  $B$  sont les points de contact roue/piste.

Modélisation du contact roue/piste :

Les roues sont modélisées par des solides indéformables, les contacts roue/piste sont supposés ponctuels.

- Le rayon des 4 roues du train principal  $R = 0,55m$ .
- L'inertie des roues et de tous les solides en rotation est négligée.
- Le contact d'une roue motorisée avec la piste est modélisé par le torseur suivant :

$$\{T(\text{piste} \rightarrow \text{roue motorisée})\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{p \rightarrow RM} = T_1 \vec{y}_a + N_1 \vec{z}_a \\ \vec{0} \end{array} \right\}_A$$

- Le contact d'une roue non motorisée avec la piste est modélisé par le torseur suivant.

$$\{T(\text{piste} \rightarrow \text{roue non motorisée})\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{p \rightarrow RNM} = N_1 \vec{z}_a \\ \vec{0} \end{array} \right\}_A$$

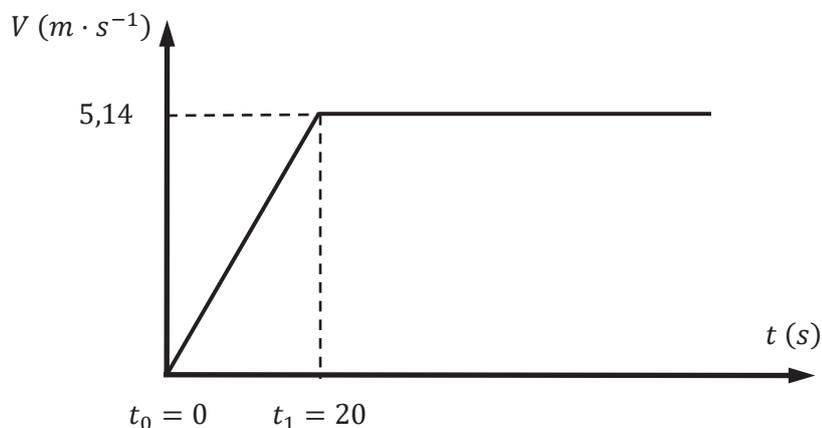
- L'action de la piste sur le train avant est modélisée par le torseur suivant.

$$\{T(\text{piste} \rightarrow \text{train avant})\} = \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{p \rightarrow TA} = N_2 \vec{z}_a \\ \vec{0} \end{array} \right\}_B$$

- Le coefficient d'adhérence roue-piste noté  $f_0$ .
- Afin de prendre en compte la résistance au roulement des pneumatiques due à leur déformation, on définit une action mécanique appliquée à l'avion, modélisée par un glisseur s'appliquant au niveau du sol en  $B$ , de résultante  $\vec{R}_{RR} = -C_{RR} M \frac{\vec{V}(G, \text{avion}/0)}{\|\vec{V}(G, \text{avion}/0)\|}$  avec  $\vec{V}(G, \text{avion}/0) = V(t) \vec{y}_a$  et  $V(t) = \dot{y}$   
Le coefficient de résistance au roulement  $C_{RR} = 0,007 \text{ daN} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- Les liaisons autres que les liaisons roues-motorisées/sol sont considérées comme parfaites.
- Les actions aérodynamiques sont négligées.

Le CdCF impose le profil de vitesse de l'avion défini sur la **figure 4**.



**Figure 4** : profil de vitesse de l'avion  $V$  en fonction du temps lors de son déplacement sur la piste

**Question 6.** En appliquant le Principe Fondamental de la Dynamique en  $A$  à l'avion, déterminer l'ensemble des équations scalaires.

**Question 7.** En déduire l'expression littérale :

- De l'effort tangentiel  $T_1$  en fonction de  $M, g, \alpha, C_{RR}$  et  $\gamma$ .
- De l'effort normal  $N_2$  en fonction de  $M, g, \alpha, L_1, L_2, h$  et  $\gamma$ .
- De l'effort normal  $N_1$  en fonction de  $M, g, \alpha, L_1, L_2, h$  et  $\gamma$ .

**Question 8.** Déterminer la relation entre  $N_1$  et  $T_1$  garantissant l'adhérence entre les roues motorisées et la piste. En déduire la relation entre  $f_0, g, \alpha, C_{RR}, L_1, L_2, h$  et  $\gamma$ .

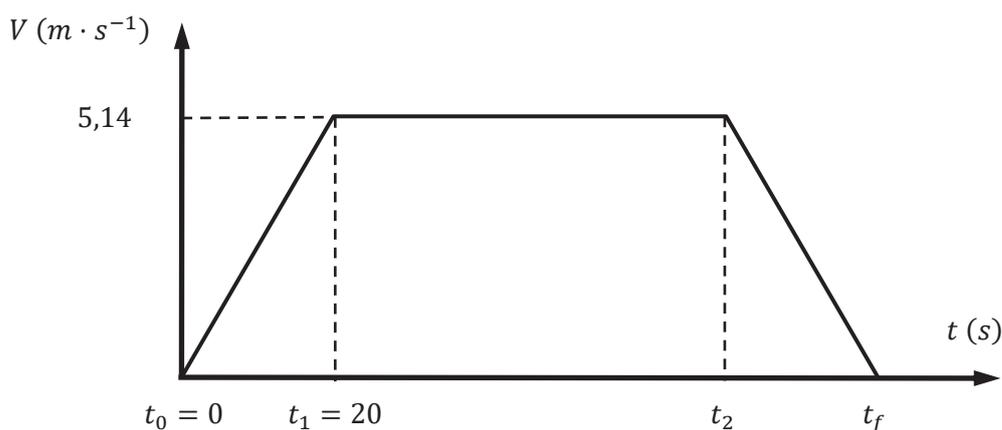
Sachant que la pente de la piste est au maximum de 1,5 % l'adhérence est-elle garantie pour les différents cas définis ci-dessous ?

- Cas N°1 : piste sèche, coefficient d'adhérence :  $f_0 = 0,5$   
 Cas N°2 : piste humide, coefficient d'adhérence :  $f_0 = 0,3$   
 Cas N°3 : piste verglacée, coefficient d'adhérence :  $f_0 = 0,1$

**Question 9.** Le rapport des vitesses de rotation du rotor du moteur électrique et de la roue motorisée est défini par :  $k = \left| \frac{\omega_{mot}}{\omega_{rouem}} \right| = 53$ . En précisant votre démarche, montrer que la relation littérale définissant le couple «  $C_{mot}$  » de chaque moteur est :  $C_{mot} = \frac{RM}{2k} (\gamma + g \sin \alpha + C_{RR})$ .

**Question 10.** On rappelle que la pente de la piste est au maximum de 1,5 %, calculer le couple moteur maximum  $(C_{mot})_{Maxi}$  pour chaque moteur. En déduire la puissance  $P_{max}$  du moteur.

On se place maintenant dans le cas où la piste est horizontale ( $\alpha = 0$ ). La **figure 5** ci-dessous définit le profil de vitesse  $V$  de l'avion en fonction du temps lors de son déplacement sur la piste. Les durées des phases d'accélération et de décélération peuvent être différentes, le temps  $t_f$  représente la durée totale du déplacement.



**Figure 5 :** profil de vitesse de l'avion  $V$  en fonction du temps lors de son déplacement sur la piste

Le temps  $t_2$  n'est pas connu.

**Question 11.** Déterminer la durée  $t_f - t_2$ , qui correspond à la phase de décélération, afin de limiter le couple moteur  $c_{mot}$  à  $+10 \text{ Nm}$ .

Ce résultat sera conservé pour les questions suivantes.

**Question 12.** Pour le profil de vitesse proposé sur la **figure 5**, tracer l'évolution du point de fonctionnement  $c_{mot} = f(\omega_{mot})$  d'un moteur.

Compléter le document **DR1** en précisant bien les indexes temps ( $t_0, t_1, t_2, t_f$ ), puissance, couple et vitesse aux points caractéristiques et commenter.

La phase de décélération, généralement plus longue que la phase d'accélération, permet d'amener l'avion à son point d'arrêt.

Le dimensionnement d'une machine tournante en régime variable fait intervenir la notion de couple équivalent thermique  $c_{th}$ , absolument semblable à la notion de valeur efficace, et de vitesse moyenne  $\omega_{moy}$ . Le couple équivalent thermique est défini par l'expression suivante :

$$c_{th} = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} c_{mot}^2(t) dt}$$

On considérera que le temps moyen de roulage  $t_f$  est de  $10 \text{ min}$ .

L'équilibre thermique est assuré lorsque les deux conditions suivantes sont satisfaites (Cf. **DR1**) :

- Le couple ( $c_{th}, \omega_{moy}$ ) se situe dans la zone du plan couple-vitesse délimitée par la frontière 1.
- L'évolution du point de fonctionnement ( $c_{mot}, \omega_{mot}$ ) reste confinée à l'intérieur de la zone délimitée 2.

Dans la question suivante il n'est pas demandé de calculer explicitement la vitesse moyenne  $\omega_{moy}$ . On cherche simplement à localiser le couple ( $c_{th}, \omega_{moy}$ ).

**Question 13.** Calculer le couple thermique  $c_{th}$ , l'équilibre thermique de la machine est-il assuré ?

Aux grandeurs déterminées par l'étude précédente doit s'ajouter les contraintes d'encombrement et de masse. Le document **DT1** propose un choix de motorisation parmi les produits disponibles « sur catalogue ».

**Question 14.** Au regard des résultats obtenus et des contraintes imposées par le cahier des charges, une motorisation « standard » peut-elle convenir ou faut-il développer un produit spécifique ?

## Troisième partie – Étude de l'asservissement

**Objectif de cette partie :** La motorisation du train d'atterrissage principal de l'avion est assurée par une machine synchrone à aimants permanents. C'est une machine à courant alternatif pour laquelle la stratégie de pilotage à commande vectorielle, qui met en œuvre le modèle de Park, est particulièrement bien adaptée. Ce type de commande permet de linéariser les équations de la machine afin d'obtenir un modèle de comportement dynamique similaire à celui d'une machine à courant continu.

Le questionnement est une contribution à l'analyse, à l'étude de l'asservissement de couple et de vitesse linéarisée de la motorisation autour de son point de fonctionnement.

### Étude de l'asservissement de couple

Dans le cadre de l'hypothèse précédente, le contrôle du couple consiste à réaliser un asservissement de courant. Nous allons, dans un premier temps, étudier l'asservissement en courant de la machine qui a pour modèle le schéma structurel suivant :

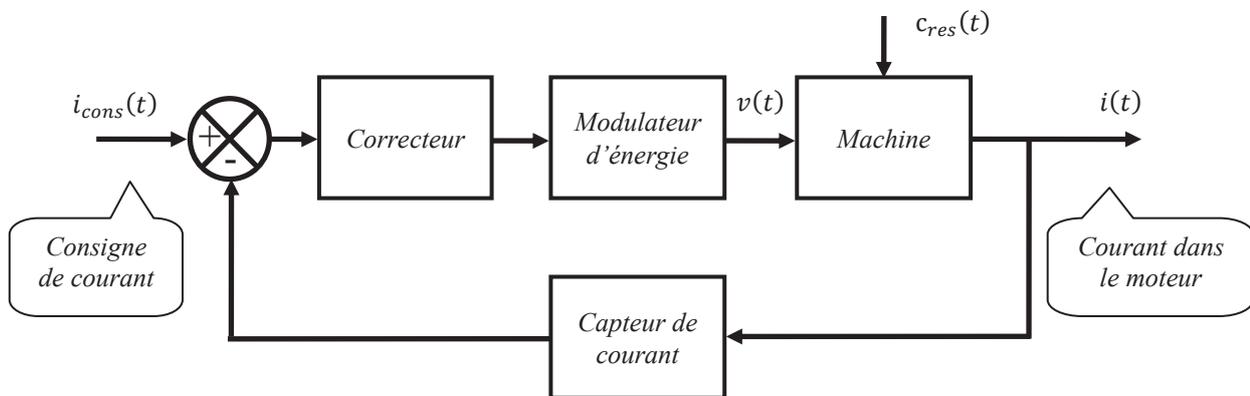


Figure 6 : structure de l'asservissement en courant de la machine

Dans un second temps, l'étude portera sur l'analyse de la performance de la boucle de courant intégrée à la régulation de vitesse.

### Remarques concernant les notations :

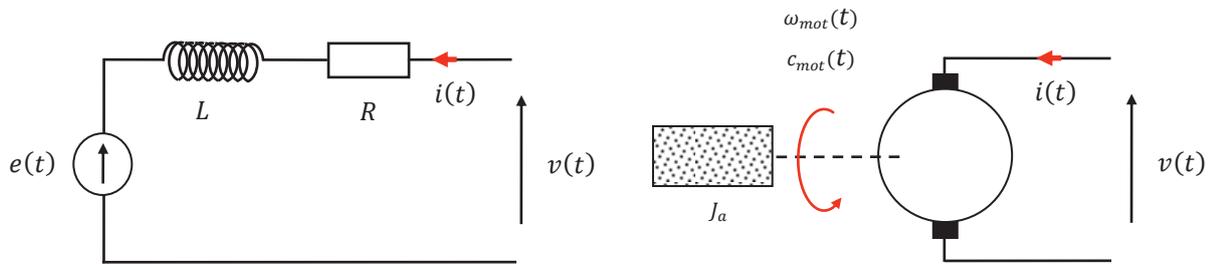
La variable de Laplace est notée  $p$ ,  $G(p)$  désigne la transformée de Laplace de la fonction  $g(t)$ .

Il est demandé de définir clairement les différentes fonctions de transfert en prenant soin de les présenter sous leur forme canonique appropriée du premier ou du second ordre.

### Notations et données numériques :

- Vitesse de rotation de la machine synchrone :  $\omega_{mot} [rad \cdot s^{-1}]$ .
- Couple électromagnétique fourni par le moteur :  $c_{mot} [N \cdot m]$ .
- Force contre électromotrice :  $e [Volt]$ .
- Tension d'alimentation du moteur :  $v [Volt]$ .
- Courant absorbé par une phase de la machine synchrone :  $i [A]$ .
- Moment d'inertie de l'avion ramené sur l'arbre du moteur :  $J_a = 2700 [kg \cdot m^2]$ .
- Inductance d'une phase de la machine :  $L = 3 [mH]$ .
- Résistance d'une phase de la machine :  $R = 0,007 [\Omega]$ .

Le modèle équivalent de la machine synchrone est représenté sur la **figure 7**.



**Figure 7 :** modèle proposé dans le cadre de nos hypothèses

Rappelons les deux équations de liaisons :

- La force électromotrice s'exprime en fonction de la vitesse de rotation de la machine :  
 $e(t) = K\omega_{mot}(t)$  et  $K = 0,45[V/rad \cdot s^{-1}]$ .
- Le couple moteur :  $c_{mot}(t) = Ki(t)$ ,  $i$  est le courant dans la machine et  $K = 0,45 [N \cdot m/A]$ .

On se propose d'établir les équations dynamiques du modèle linéarisé de la machine proposé sur la **figure 7** et d'exprimer, dans le domaine transformé, le courant  $i$  en fonction de la tension  $v$  et du couple résistant  $c_{res}(t)$  ramené sur l'arbre de la machine.

**Question 15.** Ecrire l'équation de la maille du modèle électrique ainsi que l'équation mécanique appliquée au modèle linéaire de la machine représenté sur la **figure 7**.

**Question 16.** A partir des relations établies précédemment, exprimer  $I(p)$  tel que :

$$I(p) = H_1(p)V(p) + H_2(p)C_{res}(p)$$

- Montrer que les fonctions de transfert  $H_1(p)$  et  $H_2(p)$  ont les expressions canoniques suivantes :

$$H_1(p) = H_0 \frac{p}{\omega_1} \frac{\omega_n^2}{(p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2)} \quad \text{avec : } \omega_n^2 = \frac{K^2}{LJ_a}, \quad \omega_1 = \frac{K^2}{RJ_a}, \quad \xi = \frac{1}{2} \frac{R}{K} \sqrt{\frac{J_a}{L}} \quad \text{et } H_0 = \frac{1}{R}$$

- et
- $$H_2(p) = \frac{1}{K} \frac{\omega_n^2}{(p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2)}$$
- Calculer les valeurs numériques du gain statique  $H_0$ , de la pulsation propre non amortie  $\omega_n$ , du coefficient d'amortissement  $\xi$  et de la pulsation  $\omega_1$  ainsi que leur valeur numérique.
  - Conclure quant au comportement du système, est-il sur ou sous-amorti ?

On se référera à la **figure 6**. L'objectif est maintenant de déterminer l'expression du courant  $I(p)$  en fonction de la consigne  $I_{cons}(p)$  et de l'entrée  $C_{res}(p)$ .

$$I(p) = H_{cons}(p)I_{cons}(p) + H_{res}(p)C_{res}(p)$$

Le théorème de superposition peut avantageusement être utilisé. On se limitera au calcul de la contribution de l'entrée  $I_{cons}(p)$ , donc au calcul de la fonction de transfert  $H_{cons}(p)$ , obtenue pour  $C_{res}(p) = 0$ .

Le capteur de courant ainsi que l'ensemble {correcteur + modulateur d'énergie} sont respectivement modélisés par un gain de valeur  $k_i = 10^{-4}$  et  $k_c = 10^3 [V/A]$  qui sont des constantes réelles indépendantes de la fréquence.

**Question 17.** Exprimer la fonction de transfert en boucle fermée  $H_{cons}(p) = \frac{I(p)}{I_{cons}(p)}$  pour  $C_{res}(p) = 0$ .

- Montrer qu'elle peut s'écrire sous la forme suivante :

$$H_{cons}(p) = \frac{I(p)}{I_{cons}(p)} = k_{cons} \frac{p}{\omega_1} \frac{\omega_n^2}{(p^2 + 2\xi' \omega_n p + \omega_n^2)}$$

- Vous préciserez la valeur du gain  $k_{cons}$  ainsi que l'amortissement en boucle fermée  $\xi'$ .

La performance de la boucle de courant est conditionnée par le gain de la chaîne directe  $k_c$  que l'on supposera élevé. Dans le cadre de cette hypothèse, le développement au premier ordre des deux racines de la fonction de transfert  $H_{cons}(p)$  ont pour expression :

$$p_1 = -\frac{\omega_n}{2\xi'} , \quad p_2 = -2\xi' \omega_n \text{ avec } \xi' \approx \frac{1}{2} k_c k_i H_0 \frac{\omega_n}{\omega_1}$$

**Question 18.** Représenter la fonction de transfert  $H_{cons}(p)$  en module et en phase dans le plan de Bode. Compléter le document réponse **DR2**.

Le support spectral  $I_{cons}(\omega)$  de la consigne  $i_{cons}(t)$  est tel que  $I_{cons}(\omega) \neq 0$  pour  $\omega > \frac{\omega_n}{2\xi'}$ .

**Question 19.** Montrer que dans ces conditions la fonction de transfert  $H_{cons}(p)$  admet la représentation asymptotique suivante :

$$H_{cons}(p) = \frac{I(p)}{I_{cons}(p)} \cong \frac{1}{k_i} \times \frac{1}{1 + \frac{p}{\omega_c}} \text{ avec } \omega_c = H_0 k_c k_i \frac{\omega_n^2}{\omega_1}$$

Le modèle de la boucle de courant intégré à la régulation de vitesse est représenté sur le document technique **DT2**. Dimensionnée pour avoir une dynamique élevée, la constante de temps  $\tau_c = \frac{1}{\omega_c}$  est donc faible par rapport aux autres constantes de temps du système. En conséquence, dans la suite du questionnement, on confondra la fonction de transfert de la boucle de courant à son gain statique, c'est à dire que l'on supposera que  $H_{cons}(p) \cong \frac{1}{k_i}$ . Le couple résistant  $c_{res}(t)$  est indépendant du temps.

L'architecture de commande doit sa performance à la mise en place d'un estimateur linéaire continu du couple  $c_{res}(t)$ . L'objectif est maintenant de rechercher la condition qui doit être satisfaite pour que la boucle de retour intègre cet estimateur. On cherche donc à exprimer  $I_{est}(p)$  en fonction de la vitesse  $\Omega_{mot}(p)$  et du couple  $C_{res}(p)$ .

**Question 20.** Calculer  $I_{est}(p)$  en fonction des entrées  $I_{ref}(p)$  et  $\Omega_{mot}(p)$  ainsi que des constantes  $k_\Omega, k_1$  et  $\tau_3$ .

**Question 21.** A partir du précédent résultat et d'une équation supplémentaire sur les courants  $I_{ref}(p), I_{est}(p)$  et  $I_{cons}(p)$ , en déduire la relation entre  $I_{cons}(p), I_{est}(p)$  et  $\Omega_{mot}(p)$  et les constantes du système.

**Question 22.** Déduire des précédents résultats, la relation recherchée entre le courant  $I_{est}(p)$ , la vitesse  $\Omega_{mot}(p)$  et le couple  $C_{res}(p)$ .

**Question 23.** Montrer que pour  $\tau_3 = \frac{k_i J_a}{K k_\Omega}$ ,  $i_{est}(t)$  est une estimation linéaire du couple  $c_{res}(t)$ . On rappelle que  $H_{cons}(p) \cong \frac{1}{k_i}$ .

- Donner l'expression de la fonction de transfert  $\frac{I_{est}(p)}{C_{res}(p)}$ .

Lorsque la proposition précédente est satisfaite, la vitesse  $\Omega_{mot}(p)$  en fonction du couple résistant  $C_{res}(p)$  et de la consigne  $\Omega_{ref}(p)$  est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{mot}(p) = \frac{1}{1 + \frac{\tau_3 p}{k_G}} \times \left( \Omega_{ref}(p) - \frac{k_i}{K k_G k_\Omega} \times \frac{\frac{\tau_3 p}{k_1}}{1 + \frac{\tau_3 p}{k_1}} \times C_{res}(p) \right)$$

Le support spectral du couple résistant est à bande limitée, centré sur zéro (on le supposera donc très lentement variable). La consigne a le profil présenté sur la **figure 5**.

**Question 24.** Discuter des performances de l'architecture de commande proposée en la comparant à une commande sans estimateur du couple  $c_{res}(t)$  c'est à dire pour  $k_1 \rightarrow 0$ .

On vous demande, dans cette question, de faire une synthèse qualitative des performances de la commande.

## Quatrième partie – Étude de l’embrayage

**Objectif de cette partie :** Détermination des efforts lors de la mise en rotation des roues des trains principaux en phase d’atterrissage et étude de l’embrayage implanté dans la chaîne de transmission de l’EGTS.

Les exigences lors des phases de décollage et d’atterrissage imposent que l’EGTS soit désactivé afin de ne pas perturber la rotation des roues du train principal.

**Modèle d’étude :**

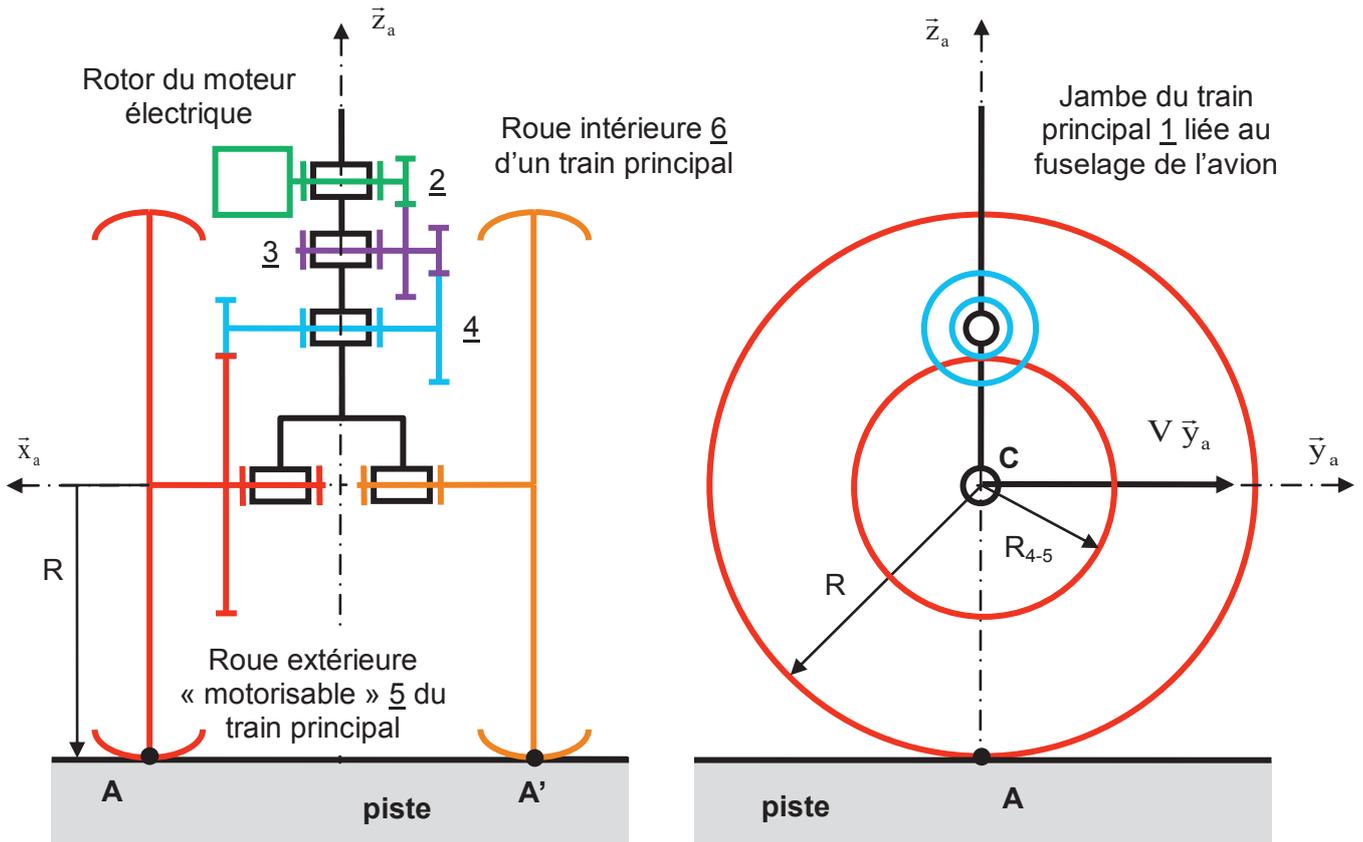


Figure 8 : modélisation cinématique d'un train principal

**Notations, données numériques et hypothèses :**

- Le repère  $\mathcal{R}_p(O, \vec{x}_p, \vec{y}_p, \vec{z}_p)$  lié à la piste, est supposé galiléen.
- Le repère  $\mathcal{R}_a(C, \vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$  lié à l'avion avec  $\vec{x}_a = \vec{x}_p, \vec{y}_a = \vec{y}_p, \vec{z}_a = \vec{z}_p$ .
- Lors de l'atterrissage, on suppose que l'avion a un mouvement de translation rectiligne uniforme par rapport à la piste pendant la mise en rotation des roues,  $\vec{V}(C, avion/piste) = V\vec{y}_a$  avec  $V$  constante.
- Les quatre roues des trains principaux, modélisées par des solides indéformables, touchent la piste au même instant.
- Les liaisons autres que les liaisons roue/piste sont considérées comme parfaites.
- Les engrenages sont tous à denture droite.
- L'action mécanique de la roue dentée 5 (liée à la jante) sur le pignon 4-5 est modélisée par le torseur

$$\text{suivant : } \{T(5 \rightarrow \text{pignon } 4 - 5)\} = \left\{ \begin{array}{c} \vec{R}_{5 \rightarrow 4-5} = F\vec{u} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{I_{45}}$$

Caractéristiques cinétiques :

- $J_2$  est le moment d'inertie de l'arbre moteur 2 (rotor et pignon) par rapport à son axe de rotation :  $J_2 = 0,0152 [kg \cdot m^2]$ .
- $J_3$  est le moment d'inertie de l'arbre 3 par rapport à son axe de rotation  $J_3 = 0,013 [kg \cdot m^2]$ .
- $J_4$  est le moment d'inertie de l'arbre 4 par rapport à son axe de rotation  $J_4 = 0,0561 [kg \cdot m^2]$ .

Lors de l'atterrissage, la mise en rotation des roues des trains principaux par rapport à l'avion est modélisée par le profil de vitesse donné sur la **figure 10**.

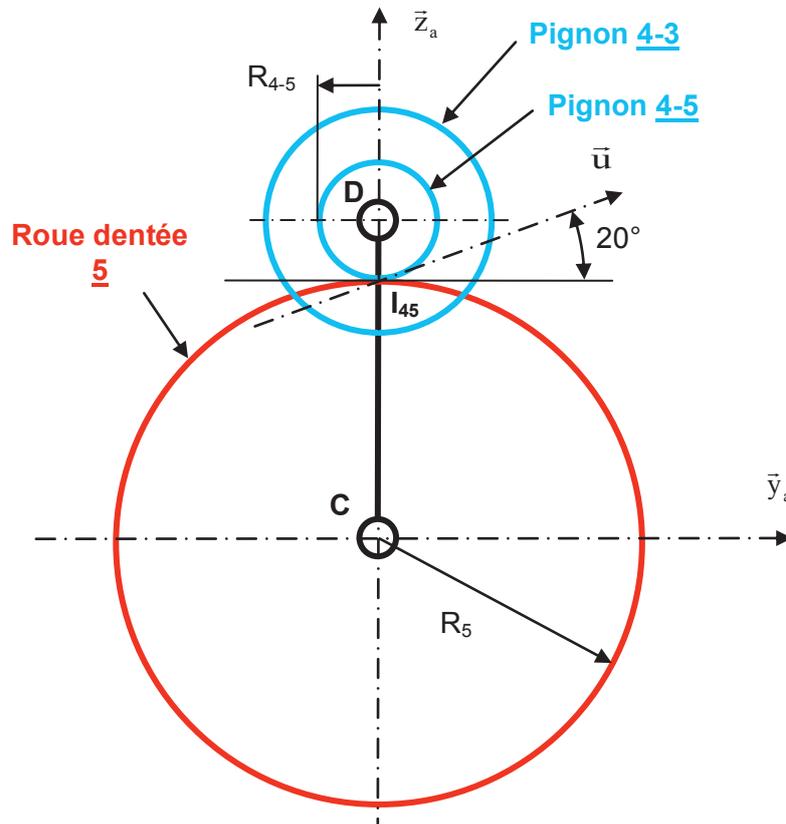


Figure 9 : engrenage - Roue dentée 5 et pignon 4-5

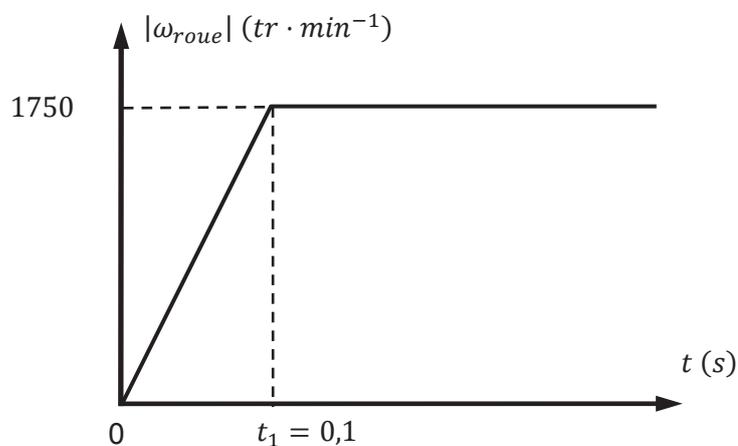


Figure 10 : profil de vitesse de rotation des roues en fonction du temps lors de l'atterrissage

**Question 25.** Déterminer l'inertie équivalente  $J_{eq}$  de l'ensemble {2, 3, 4} ramenée sur l'axe de rotation du solide 4 dans son mouvement par rapport à l'avion. Cette inertie équivalente sera exprimée en fonction de  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $J_4$  et  $Z_i$ .

**Question 26.** Appliquer le théorème de l'énergie cinétique à l'ensemble {2, 3, 4} et en déduire l'expression de  $F$  en fonction  $J_2$ ,  $J_3$ ,  $J_4$ ,  $Z_i$ ,  $R_{4-5}$  et  $\dot{\omega}_{roue}$ .

**Question 27.** Sachant que le module de l'engrenage pignon 4-5 et roue dentée 5 est de 4 mm. Calculer la valeur de  $F$  et conclure.

**Question 28.** A partir des résultats de la question précédente et des exigences du CdCF, justifier l'utilisation de l'embrayage placé entre le pignon 4-5 et la sortie du réducteur GB12.

### Étude de l'embrayage à crabot.

La solution constructive mise en place pour désaccoupler ou accoupler l'arbre de sortie du réducteur GB12 avec le pignon 4-5 engrenant avec la roue dentée liée à la roue est un embrayage à crabot axial. Un actionneur électromécanique (moteur + vis à billes) génère la translation de la pièce mobile (Crabot-M) du crabot. La commande de l'actionneur est élaborée à partir de la demande du pilote et de deux informations issues de la vitesse de rotation de la roue motorisée effectuée par un capteur à effet hall et de la vitesse de rotation du moteur  $M1$  obtenue avec le resolver du moteur  $M1$ . Lors de la phase d'embrayage il y a du frottement de glissement entre le crabot-M et le crabot-F avant l'engagement des dents. Le jeu nécessaire à l'engagement des dents est calibré et minimisé.

Le diamètre d'implantation des six dents du crabot-M est de 70 mm, la surface de contact d'une dent du Crabot-M avec le Crabot-F est de 30 mm<sup>2</sup>.

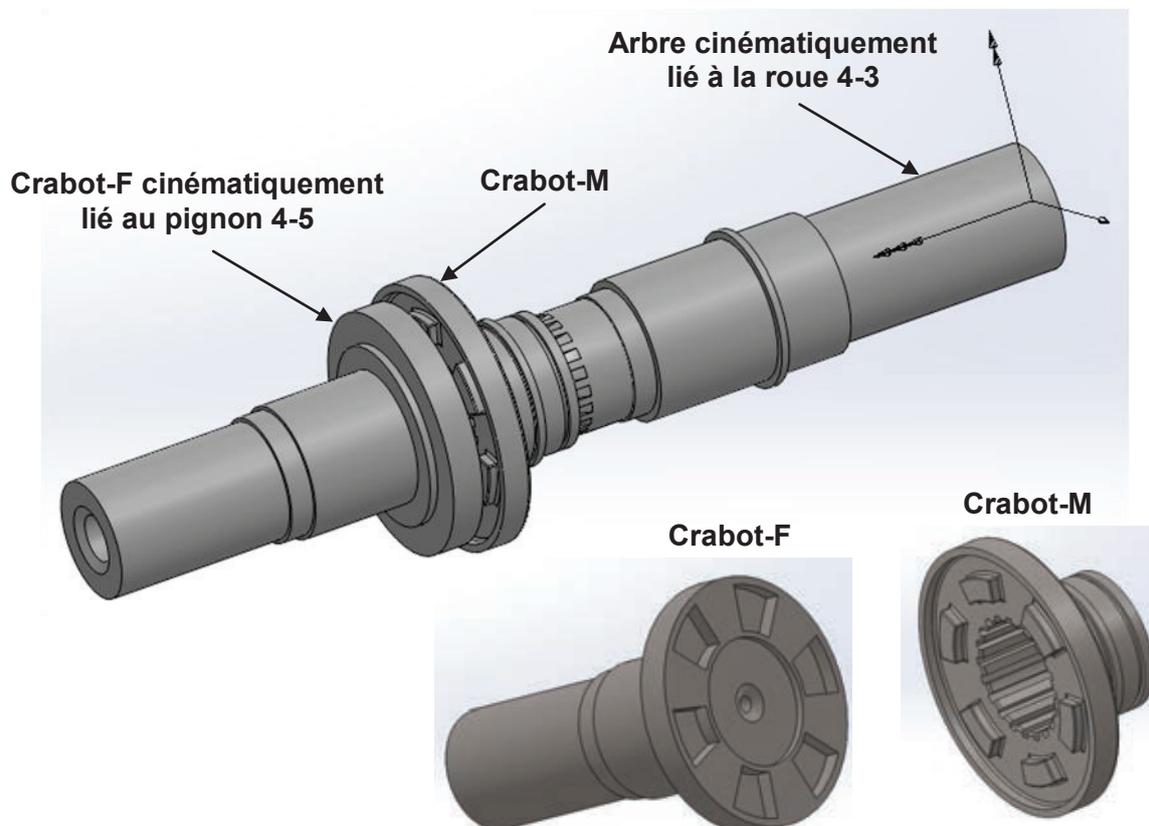


Figure 11 : modèle volumique partiel du crabot axial

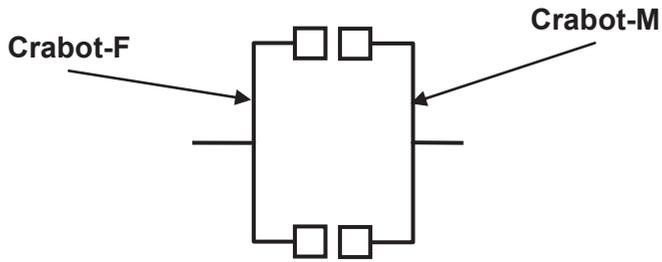


Figure 12a : position débrayée

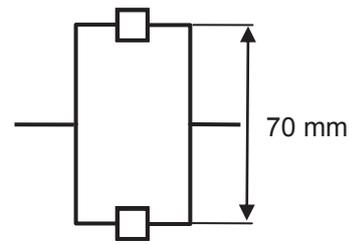


Figure 12b : position embrayée

Figure 12 : schématisation partielle du crabot axial

**Question 29.** Recopier sur votre copie le schéma cinématique ci-dessous (**figure 13**) et le compléter en proposant un modèle cinématique de l'embrayage à crabot en position débrayée ainsi que la chaîne cinématique relative au déplacement du crabot-M.

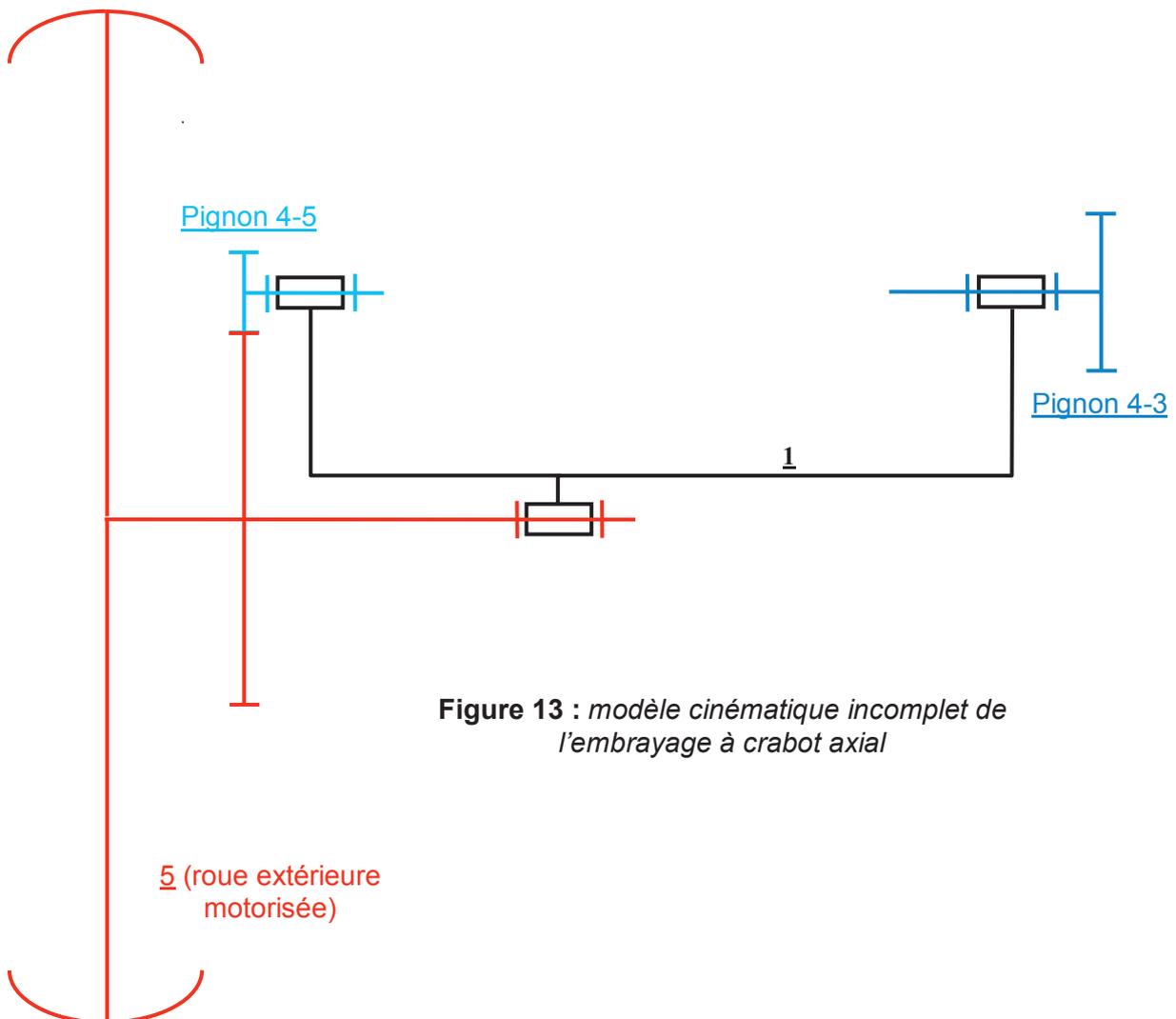


Figure 13 : modèle cinématique incomplet de l'embrayage à crabot axial

## Cinquième partie - Études des infrastructures aéroportuaires.

Ces études aborderont différentes facettes de l'ingénierie des constructions et plus particulièrement :

- L'étude des matériaux de construction.
- La technologie des ouvrages.
- Les principes de dimensionnement basés sur les règlements Eurocodes.

Les données disponibles sont :

- DT3 : Géométrie de la galerie technique.
- DT4 : Résultats de l'essai de cisaillement du sol support de la galerie technique.
- DT5 : Extraits DTU 13.12 - Règles pour le calcul des fondations superficielles.
- DT6 : Organigramme de calcul respectant l'Eurocode 2.
- DT7 : Extraits de la note de calcul.
- DT8 : Tableau des sections des aciers de construction.
- DT9 : Extraits du guide technique de la DGAC de janvier 2014 - Dimensionnement des chaussées aéronautiques souples.

### Présentation de l'étude 1 :

L'étude porte sur la zone de parking des Airbus A320 équipés de l'EGTS. L'alimentation en énergie et la transmission d'informations nécessitent la création d'une galerie technique sous l'aire de stationnement des avions.

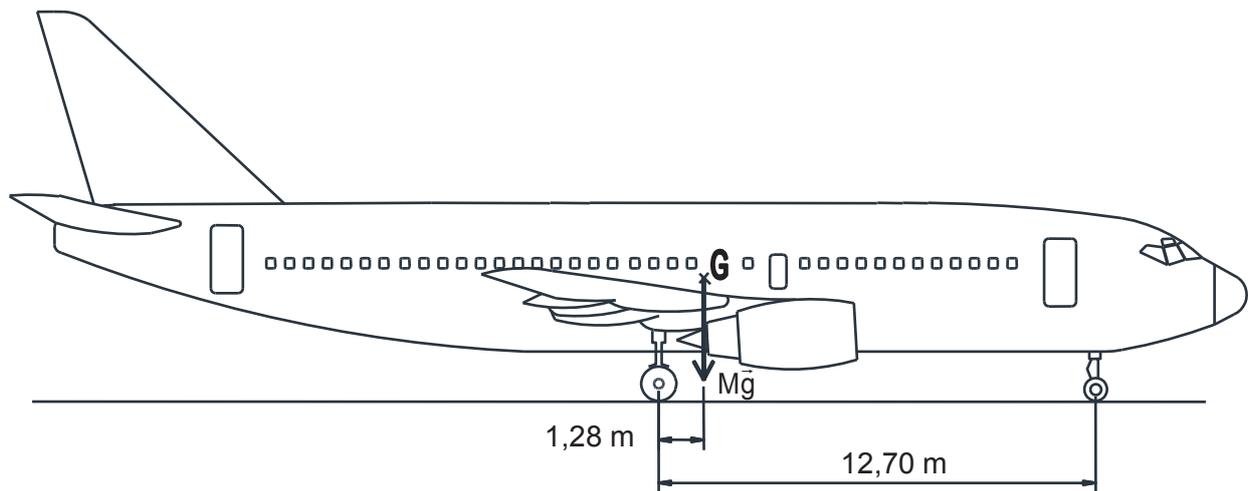
L'objectif de cette partie est d'appréhender le comportement de cette galerie. Le modèle constructif retenu pour cette étude est un cadre en béton armé.



**Objectif de cette étude :** On désire évaluer si le sol support se trouvant sous la future galerie technique résiste sous l'effet des charges permanentes et des charges roulantes d'un avion équipé de l'EGTS.

### ***Notations et données numériques :***

- L'accélération de pesanteur :  $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .
- Les charges des réseaux dans la galerie technique sont estimées à  $5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ .
- Le poids volumique du béton est de  $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- Le poids de la couche de forme est de  $19 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- Le poids du remblai est de  $18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- Le poids du sol support est de  $18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- Majoration des charges permanentes par 1,35.
- Majoration des charges roulantes par 1,5.



**Figure 14** : étude statique - paramétrage

**Question 30.** Sachant que la masse totale de l'avion est de  $79000\text{kg}$  et en utilisant les données de la **figure 14**, déterminer les efforts transmis à la piste par le train avant et les trains principaux d'un Airbus A320. Vous donnerez vos résultats en  $kN$ .

Hypothèse : Les efforts appliqués par les deux roues de chaque train seront regroupés en un effort ponctuel.

**Question 31.** Calculer la répartition des charges en pourcentage entre le train avant et les trains principaux.

**Question 32.** Lorsque un train principal est positionné au droit de la galerie technique, et en admettant que la diffusion de la charge se fait avec une pente de  $2/3$  dans les couches de chaussée et dans la structure en béton de la galerie technique, calculer la longueur de galerie diffusant la charge d'un train principal sur le sol support.

Le document **DT3** comporte les données ayant trait à l'architecture de la galerie technique.

**Question 33.** En considérant que l'ensemble des charges s'appliquent sur l'axe de symétrie de la galerie technique.

Calculer la pression verticale appliquée sur le sol par le radier. L'étude sera conduite pour une longueur de galerie égale à  $5,00\text{ m}$ . Le sol support est supposé élastique et le radier infiniment rigide.

**Question 34.** La contrainte ultime conduisant à la rupture du sol sous une fondation peut être évaluée à partir des résultats d'essais en laboratoire. Un essai de cisaillement à long terme (conditions drainées) à la boîte de Casagrande a été effectué sur le sol support. Calculer la contrainte ultime du sol.

Le document **DT4** comporte les résultats de l'essai de cisaillement du sol support de la galerie technique.

Le document **DT5** présente un extrait du DTU 13.12.

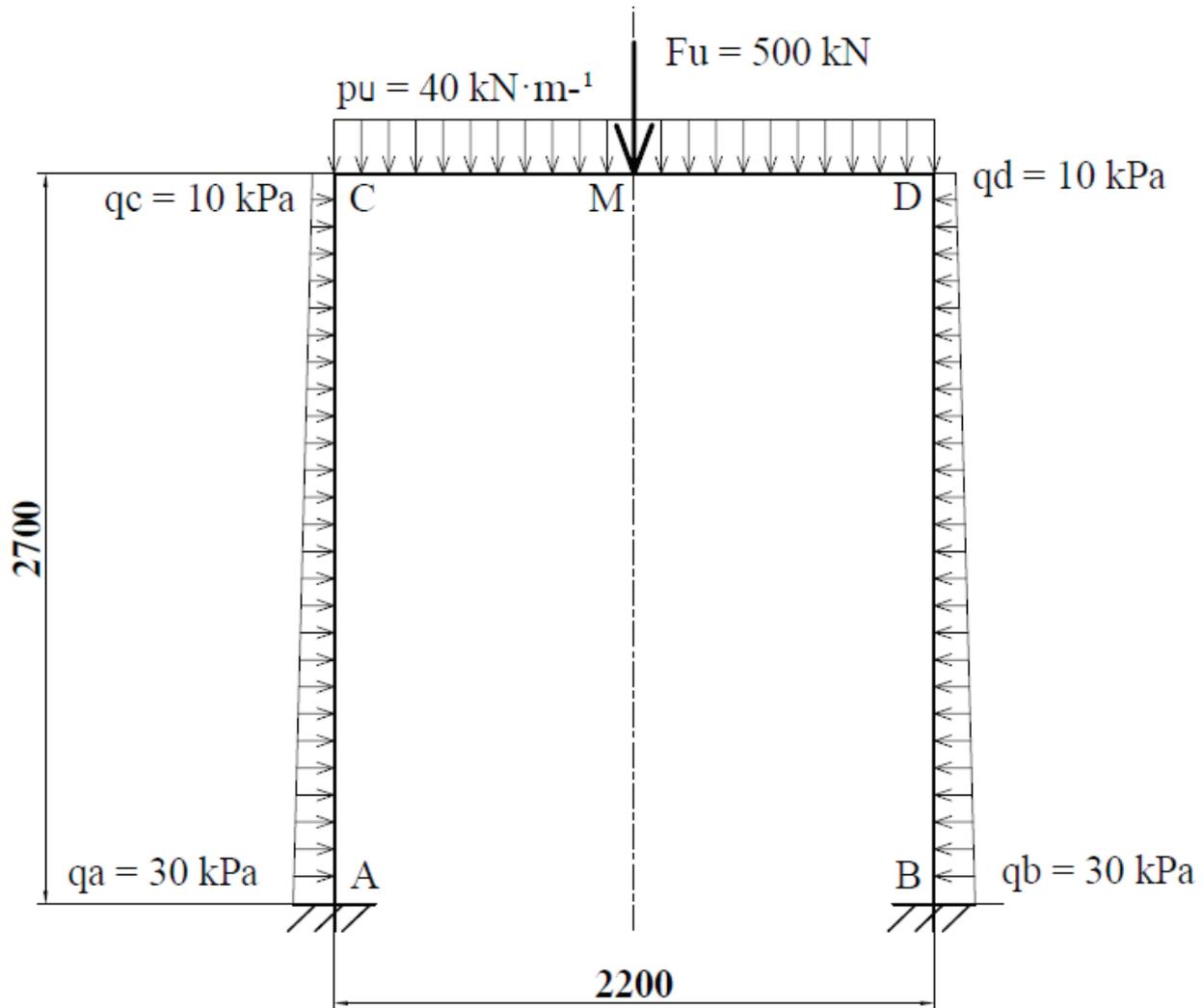
Remarque : pour cette question, le radier de la galerie peut être assimilé à une semelle filante de longueur infinie.

**Question 35.** En comparant votre résultat de la question 33 et celui de la question 34 et en incluant la notion de tassement, conclure sur la résistance du sol support.

On étudie maintenant la structure béton armé de la galerie et plus particulièrement les piédroits et la dalle supérieure.

**Objectif :** On désire connaître la répartition des sollicitations internes à l'intérieur de la structure béton de la galerie technique, afin de dimensionner les sections d'armatures de la dalle supérieure.

Le modèle d'étude retenu est le suivant :



Données complémentaires :

- On travaillera sur une tranche de galerie égale à 1 m.
- On considère que  $E$  et  $I$  sont identiques et constants pour toutes les barres.
- On considère les piédroits encastrés dans le radier.
- La charge pondérée supportée par la dalle supérieure est estimée à  $40 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ .
- La charge pondérée transmise par le train principal d'un airbus A320 est considérée comme une force ponctuelle estimée à  $500 \text{ kN}$ .
- Le remblai est un matériau pulvérulent avec  $C = 0$  et  $\varphi' = 38^\circ$ .
- L'action du remblai sur les piédroits est considérée trapézoïdale avec une valeur maximum de  $30 \text{ kPa}$ .

**Question 36.** Justifier par le calcul les valeurs des pressions retenues sur les piedroits.

Donnée complémentaire : Les efforts de poussée étant repris par le radier et la dalle, le déplacement de l'ouvrage n'existe pas (paroi rigide). Le calcul de la poussée se fera avec le coefficient  $K_0$  (coefficient des terres au repos). La formule de Jaky donne une valeur de  $K_0$  en fonction de l'angle de frottement  $\varphi'$ .

$$\text{Formule de Jaky : } K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad \text{avec } K_0 = 1 - \sin \varphi'$$

**Question 37.** Définir de façon rigoureuse, le degré d'hyperstaticité de la structure.

**Question 38.** Calculer les inconnues de liaison verticale en  $A$  et en  $B$ .

**Question 39.** En utilisant le principe de superposition et des conditions cinématiques, proposer le principe de résolution de cette structure hyperstatique pour cela :

- Vous effectuerez les schémas des différentes structures associées.
- Vous tracerez les diagrammes du moment fléchissant sur vos différentes structures.
- Vous écrirez le système d'équations à résoudre. Par contre la résolution numérique du système n'est pas demandée.

**Question 40.** Tracer les diagrammes de variations des efforts internes [effort normal  $N(x)$ , effort tranchant  $V(x)$  et moment fléchissant  $M_{fz}(x)$ ] dans les piedroits et la dalle. Pour cela vous utiliserez les résultats du calcul informatique fournis dans le **DT7**.

Vous complétez les documents réponses **DR3** à **DR5** en indiquant sur vos diagrammes les valeurs particulières.

**Question 41.** Déterminer la section d'armature en travée pour la dalle supérieure. Les efforts de compression dans la dalle étant faibles, on se placera dans le cas de la flexion simple. Vérifier la valeur réelle de  $d$ , la section minimale et maximale des armatures. Le document **DT6** présente un organigramme de calcul respectant l'Eurocode 2. Le document **DT8** donne les caractéristiques des aciers de construction.

Données complémentaires :

- Moment de flexion ELU  $M_{Ed} = M_u$ .
- $M_u$  maximum en travée en valeur absolue égal à  $200 \text{ kN} \cdot \text{m}$  (valeur arrondie).
- Classe d'exposition : XC3.
- Enrobage identique en partie haute et basse de la dalle  $C_{nom} = 30 \text{ mm}$ .
- Béton : C35/45 de résistance caractéristique  $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ .
- Acier B 500 classe B de résistance caractéristique  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ .
- Coefficient de sécurité sur le béton  $\gamma_c = 1,5$ .
- Coefficient de sécurité sur l'acier  $\gamma_s = 1,15$ .
- Coefficient minorateur sous charge de longue durée  $\alpha_{cc} = 1$ .

**Question 42.** Dédurre de la question 41 la section d'armature sur les appuis. Proposer un schéma de principe des armatures pour la dalle supérieure sur le document réponse **DR5**. Vous préciserez les diamètres des armatures choisies. Le document **DT8** donne les caractéristiques des aciers de construction.

Données complémentaires :

- $M_u$  maximum sur appuis en valeur absolue égal à  $100 \text{ kN} \cdot \text{m}$  (valeur arrondie).
- Classe d'exposition : XC3.
- Enrobage identique en partie haute et basse de la dalle  $C_{nom} = 30 \text{ mm}$ .
- Béton : C35/45 de résistance caractéristique  $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ .
- Acier B 500 classe B de résistance caractéristique  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ .



Enfin on s'attache au procédé de réalisation de cette galerie technique. Le système retenu est du type cadre préfabriqué en béton armé.

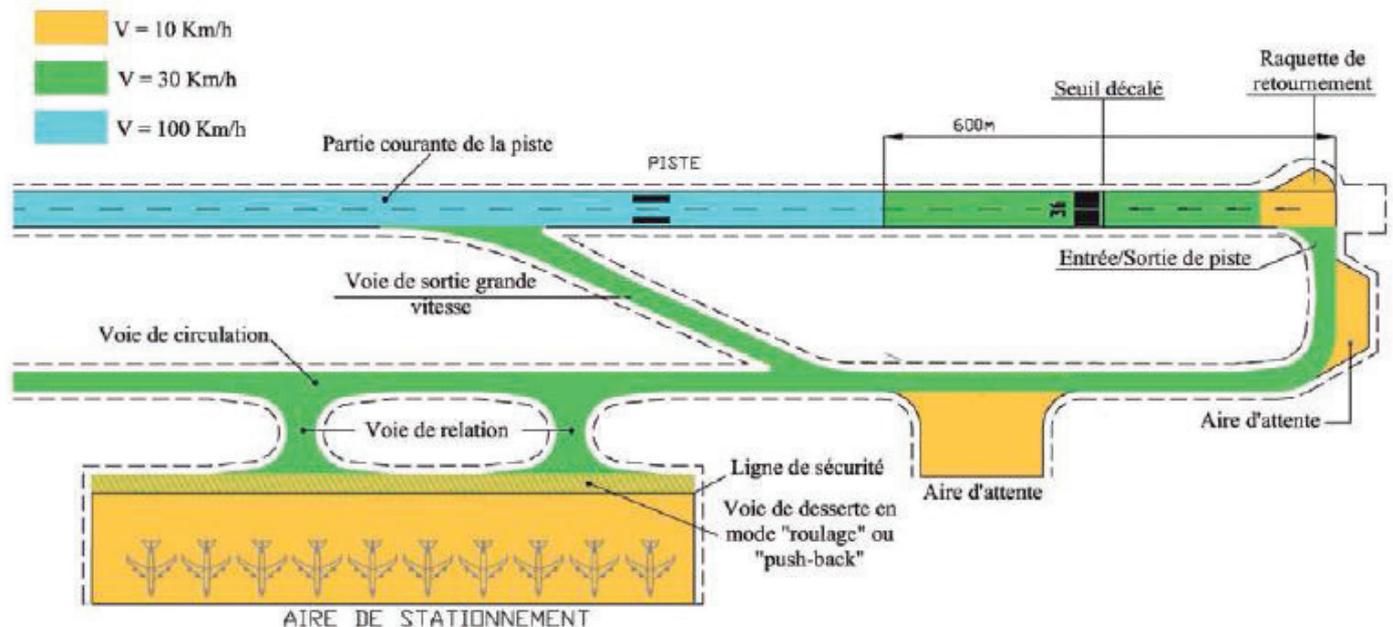
**Objectif :** La présence de venue d'eau dans le sol est possible, il est donc nécessaire d'assurer une parfaite étanchéité de la galerie. On vous demande de proposer une solution permettant d'atteindre cet objectif.

**Question 43.** Proposer une solution permettant d'assurer l'étanchéité de la galerie.

Vous proposerez deux croquis de votre solution : le premier à la liaison piedroits / dalle supérieure et le second au droit d'un joint entre deux cadres préfabriqués.

### Présentation de l'étude 2 :

L'étude porte sur la piste et notamment sur la constitution des différentes familles de sections constituant une piste d'aéroport (voir **figure 15**). La constitution des pistes doit répondre à des critères de résistances, de déformations, sous le poids des aéronefs. L'intégrité de la chaussée doit être maintenue durant une durée de 20 ans minimum en prenant en compte les critères climatiques.



**Figure 15 :** représentation des familles de sections constituant une piste d'aéroport

**Objectif de cette étude :** Lorsque l'isotherme 0°C atteint le sol support et que celui-ci est sensible au gel, l'eau environnante est pompée par cryosuccion vers le front de gel et constitue des lentilles de glace qui provoquent des gonflements pendant la période de gel et s'opposent à l'évacuation de l'eau au moment du dégel. Dans cet état de quasi-saturation, le risque d'une chute significative de portance devient important et nécessite donc une étude du comportement au gel de la structure de chaussée.

La structure retenue pour la partie courante de la piste après dimensionnement mécanique est la suivante :

- Une couche de fondation en grave alluvionnaire non traitée et non gélive GNT de catégorie 1 (réalisée en deux couches de 20 cm).
- Une couche de base (12 cm) en grave bitume GB.
- Une couche de roulement (6 cm) en béton bitumineux aéronautique BBA.

L'ensemble repose sur une plateforme constituée du sol support en marne altérée, surmonté d'une couche de forme en grave alluvionnaire non traitée et non gélive GNT d'épaisseur 40 cm.

**Question 44.** Le CCTP préconise la réalisation d'une chaussée souple pour la piste et une chaussée rigide en béton pour les aires de stationnement.

A l'aide de schémas légendés, préciser la constitution de ces deux chaussées, puis justifier le choix de la chaussée rigide en béton pour les aires de stationnement.

**Question 45.** D'une façon générale, schématiser le principe de fonctionnement mécanique d'une chaussée souple et d'une chaussée rigide. Vous adopterez un modèle de comportement élastique linéaire.

Pour cela, sur le document réponse **DR6**, vous dessinerez le cône de distribution des charges, vous préciserez sans les calculer, la nature des efforts, des contraintes et des déformations, aux interfaces des couches.

**Question 46.** En utilisant la méthode exposée dans le **DT9**, effectuer la vérification au gel-dégel de la partie courante de la piste pour une protection totale.

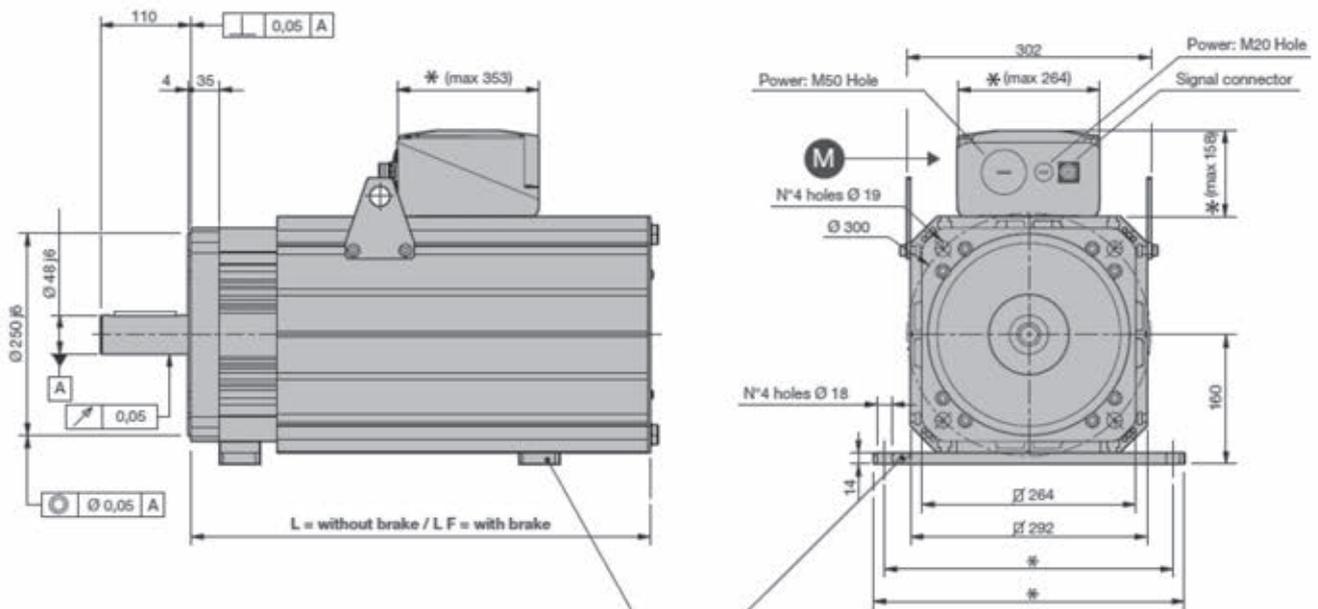
Conclure sur l'intégrité de la chaussée vis à vis des conditions climatiques.

Données complémentaires :

- L'essai de gonflement au gel pour la marne altérée donne une valeur de pente  $p = 0,2 \text{ mm}/(\text{°C} \cdot \text{h})^{1/2}$
- On considère un indice de gel de référence correspondant à l'hiver rigoureux exceptionnel  $I_{HRE} = 170\text{°C} \cdot \text{jour}$ .

## Document DT1

TIPO MOTORE MOTOR TYPE	simbolo symbol	u. mis. u. m.	B26S			B26M			B26L			B26G		
Tensione di alimentazione azionamento Drive operating voltage			400V											
Coppia a rotore bloccato 100K $\Delta t$ Continuous stall torque 100K $\Delta t$	To	Nm	122	120	121	232	236	231	338	338	337	442	442	445
Coppia a rotore bloccato 65K $\Delta t$ Continuous stall torque 65K $\Delta t$	To	Nm	99	97	97	187	190	186	273	273	272	356	356	359
Velocità nominale Rated Speed	n	RPM	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000	1000	2000	3000
Potenza alla velocità nominale 100K $\Delta t$ Power at rated speed 100K $\Delta t$	Pn	W	12810	24453	35168	23835	46189	62800	34230	64372	86350	44205	82137	108330
Coppia alla velocità nominale 100K $\Delta t$ Torque at rated speed 100K $\Delta t$	Tn	Nm	122	117	112	227	221	200	326	308	275	411	393	345
Coppia di picco con S.I.R. 10% Peak torque with S.I.R. 10%	Tpk	Nm	333	333	333	638	638	638	931	931	931	1241	1214	1214
Inerzia rotorica Rotor Inertia	Jm	mKgm <sup>2</sup>	22,0	22,0	22,0	36,0	36,0	36,0	49,0	49,0	49,0	63,0	63,0	63,0
Inerzia rotorica (motore con freno) Rotor Inertia (motor with brake)	Jmb	mKgm <sup>2</sup>	30,1	30,1	30,1	44,1	44,1	44,1	62,0	62,0	62,0	76,0	76,0	76,0
Accelerazione rif. alla coppia di picco Acceleration at peak torque	apk	rad/s <sup>2</sup>	15149	15149	15149	17733	17733	17733	19007	19007	19007	19271	19271	19271
Accelerazione rif. alla coppia di picco (motore con freno) Acceleration at peak torque (motor with brake)	apkb	rad/s <sup>2</sup>	11000	11000	11000	14400	14400	14400	15000	15000	15000	16000	16000	16000
Massa Weight	M	Kg	55	55	55	85	85	85	116	116	116	146	146	146
Massa con freno Weight with brake	Mb	Kg	85	85	85	115	115	115	151	151	151	181	181	181



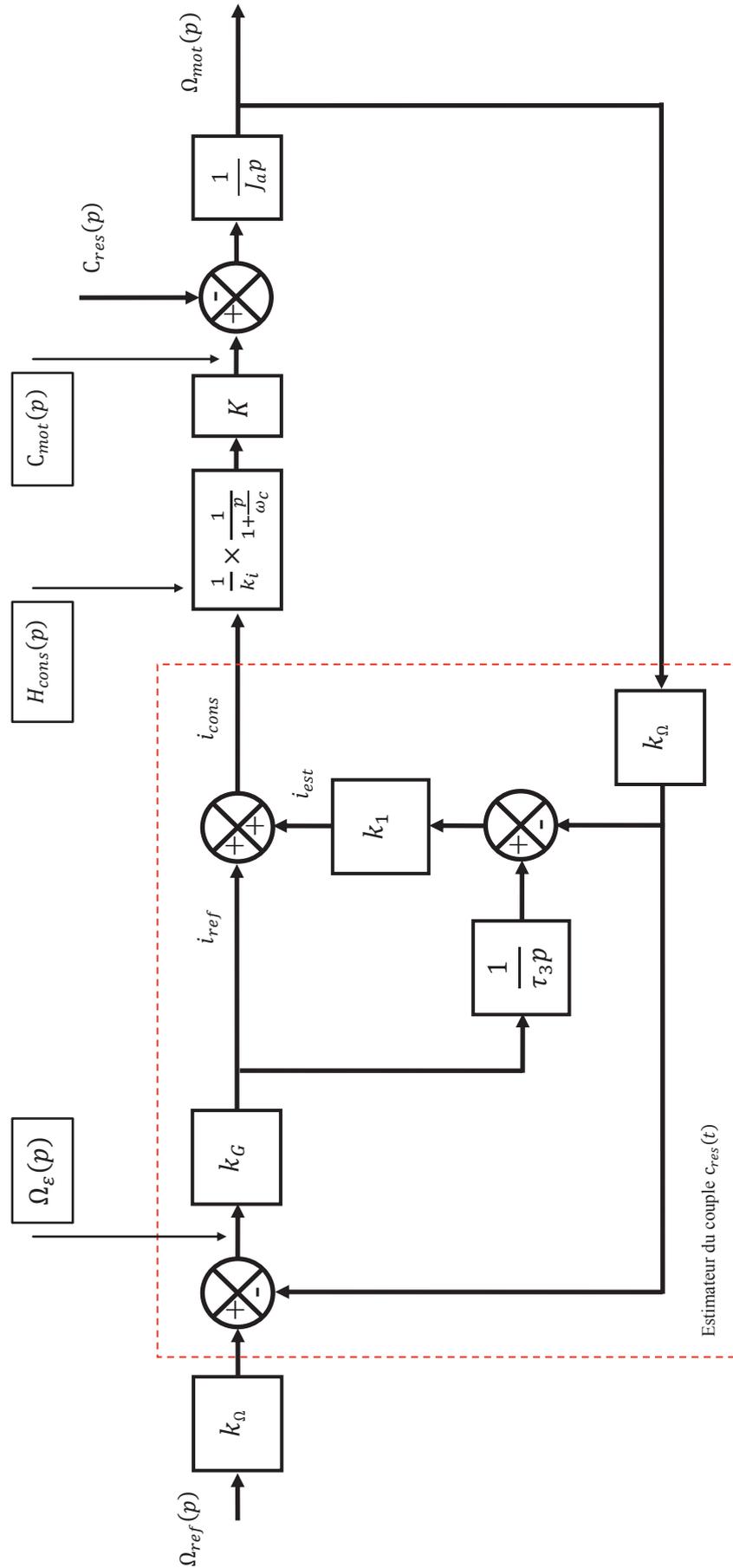
Opzione: Piedi d'appoggio B3 a richiesta  
Option: Baseplate B3 on demand

\* Consultare il manuale per le dimensioni  
Refer to the manual for the dimensions

TIPO MOTORE MOTOR TYPE	L	LF	NOTE NOTES	ALIMENTAZIONE VENTILATORE FAN SUPPLY	u. mis. u. m.	
B26S	470	605	1) Il paraolio viene montato solo se è previsto un accoppiamento in bagno d'olio.	Tensione di alimentazione monofase Fan voltage	VAC	230V
B26M	577	712		Corrente alimentazione Fan current	A	0,66÷0,94
B26L	684	819	1) The oil seal is assembled only if oil bath coupling is foreseen.	Frequenza Frequency	Hz	50/60
B26G	791	926		Temperatura di accensione Temperature threshold	°C	70

# Document DT2

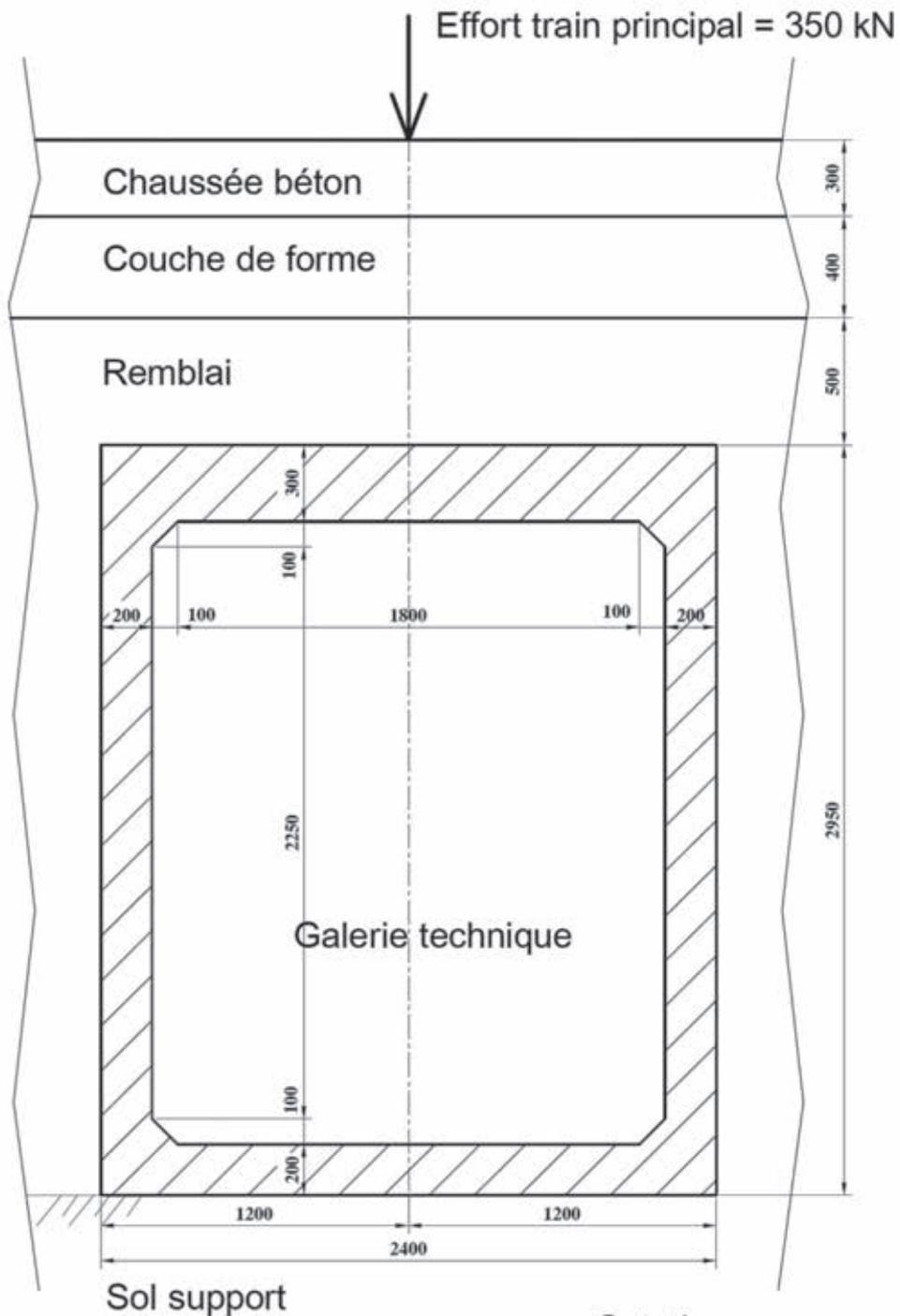
## Boucle de vitesse avec son estimateur



# Document DT3

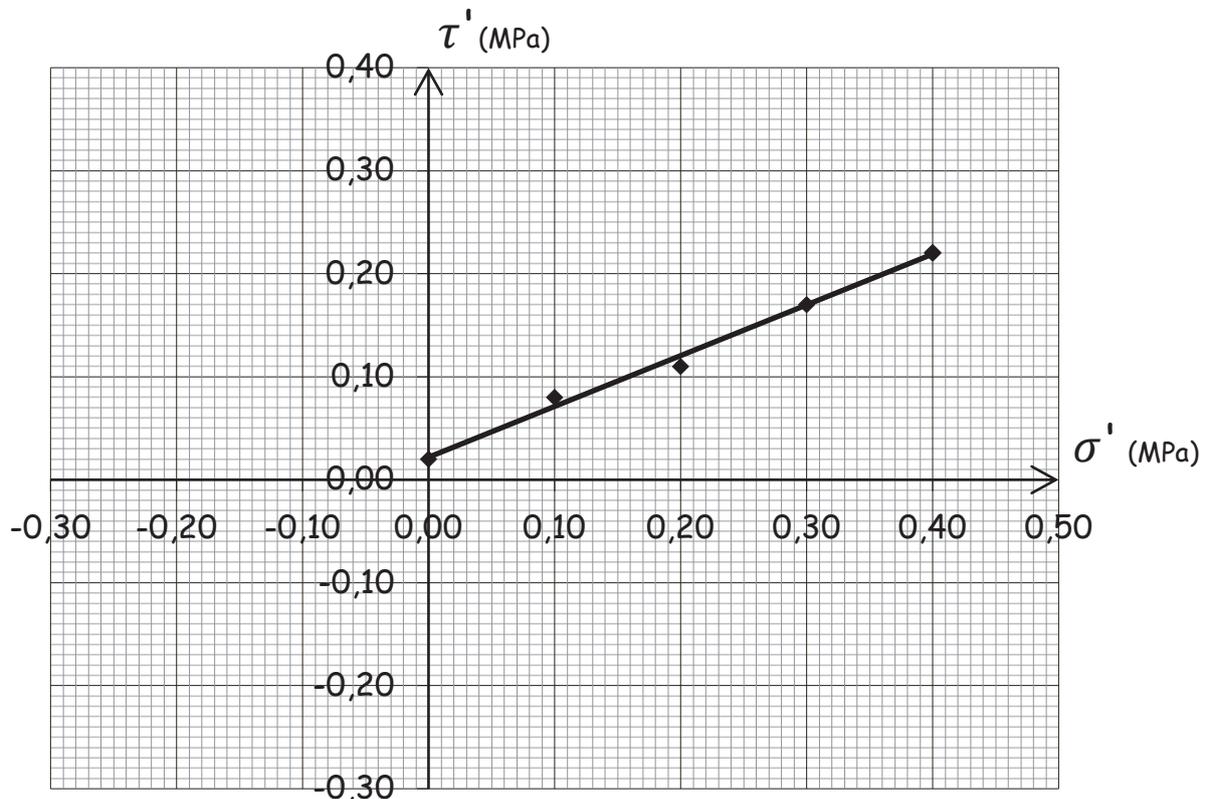
## Géométrie de la galerie technique

### Coupe transversale



## Document DT4

### Résultats de l'essai de cisaillement du sol support de la galerie technique



Rappel : On obtient cette droite en effectuant plusieurs essais sur le sol. Il s'agit d'un modèle linéaire représentant la variation de la contrainte tangentielle appliquée sur un sol au moment de sa rupture, en fonction de la contrainte normale appliquée. Cette droite est tangente aux cercles de Mohr correspondant à la rupture, elle est appelée droite de Coulomb.

Pour les sols cohérents : la droite ne passe par l'origine des axes, il existe une résistance au cisaillement sous contrainte normale nulle : la cohésion est notée  $c'$ .

L'angle de la droite avec l'axe (0,00 ;  $\sigma'$ ) noté  $\varphi'$  est appelé angle de frottement interne.

L'équation de la droite de Coulomb s'écrit :  $\tau' = C' + \sigma' \cdot \tan\varphi'$

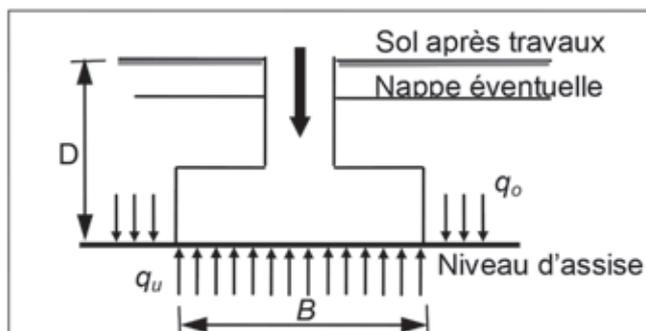
# Document DT5

## Extrait DTU 13.12 Règles pour le calcul des fondations superficielles

### Estimation de la contrainte ultime sous une fondation

La contrainte ultime, conduisant à la rupture du sol sous une fondation superficielle peut être évaluée à partir des résultats d'essais en laboratoire ; essais qui ont permis de connaître la cohésion ( $C'$ ), l'angle de frottement interne ( $\varphi'$ ) ainsi que le poids volumique apparent du sol ( $\gamma$ ).

Pour une semelle de largeur ( $B$ ), de longueur ( $L$ ), de profondeur d'encastrement ( $D$ ), soumise à une charge verticale centrée, on a :  $q_u = \frac{1}{2} \cdot S_\gamma \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma + S_c \cdot C' \cdot N_c + S_q \cdot q_0 \cdot N_q$



$S_\gamma ; S_c ; S_q$  : étant des coefficients de forme.

Les valeurs des coefficients de forme, conformément à l'eurocode 7, sont déterminées à l'aide des formules du tableau ci-dessous :

Fondations	Conditions non drainées		Conditions drainées	
	rectangulaires	carrées ou circulaires ( $B/L = 1$ )	rectangulaires	carrées ou circulaires ( $B/L = 1$ )
$s_\gamma$			$1 - 0,3 \frac{B}{L}$	0,7
$s_c$	$1 + 0,2 \frac{B}{L}$	1,2	$\frac{(1 + \frac{B}{L} \sin \varphi') N_q - 1}{N_q - 1}$	$\frac{(1 + \sin \varphi') N_q - 1}{N_q - 1}$
$s_q$	1	1	$1 + \frac{B}{L} \sin \varphi'$	$1 + \sin \varphi'$

$N_\gamma N_c N_q$  : étant des paramètres dépendant de la valeur de ( $\varphi'$ ).

Les tableaux ci-dessous indiquent les valeurs à retenir pour les facteurs de portance selon les recommandations de l'eurocode 7 :

$\varphi'$	$N_\gamma$	$N_c$	$N_q$
0°	0	5.14	1.00
5°	0.10	6.49	1.57
10°	0.52	8.35	2.47
15°	1.58	10.98	3.94
20°	3.93	14.83	6.40
21°	4.66	15.80	7.07
22°	5.51	16.90	7.82
23°	6.50	18.10	8.66
24°	7.66	19.30	9.60
25°	9.01	20.72	10.66
26°	10.59	22.25	11.85
27°	12.43	23.94	13.20
28°	14.59	25.80	14.72

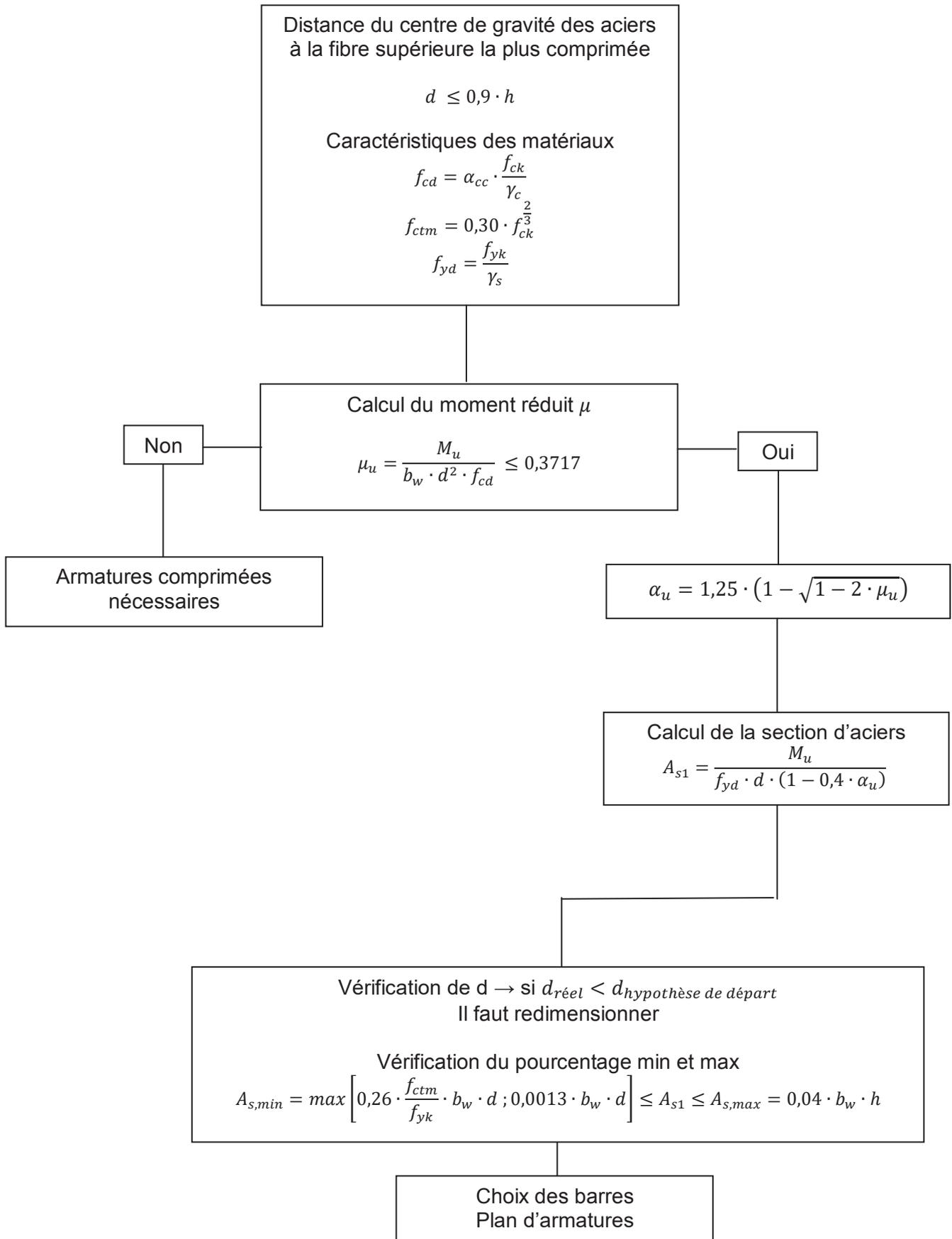
$\varphi'$	$N_\gamma$	$N_c$	$N_q$
29°	17.12	27.86	16.44
30°	20.09	30.14	18.40
31°	23.59	32.67	20.63
32°	27.72	35.49	23.18
33°	32.59	38.64	26.09
34°	38.37	42.16	29.44
35°	45.23	46.12	33.30
36°	53.40	50.59	37.75
37°	63.18	55.63	42.92
38°	74.90	61.35	48.93
39°	89.01	67.87	55.96
40°	106.05	75.31	64.20
45°	267.75	133.87	134.87

$q_0$  étant la contrainte verticale régnant à la profondeur d'assise de la fondation. Cette contrainte est due, notamment, au poids des couches de terrains, elle est égale à :  $q_0 = \sum_i h_i \cdot \gamma_i$

# Document DT6

## Organigramme de calcul respectant l'Eurocode 2

Organigramme de calcul des armatures longitudinales en flexion simple, section rectangulaire :



## Document DT7

### Extraits de la note de calcul (Logiciel pyBar)

Principales valeurs numériques pour le chargement "cas Aribus A320"

Valeurs des degrés de liberté	Calcul des réactions d'appui
<b>Point A = Noeud N1</b> $u=0,0\text{ m}$ $v=0,0\text{ m}$ $w=0,0\text{ rad}$	<b>Point A = Noeud N1</b> $F_x=16,6448796377\text{ kN}$ $F_y=294,0\text{ kN}$ $M_z=-30,7043979307\text{ kN}\cdot\text{m}$
<b>Point C = Noeud N2</b> $u=1,11013382288e^{-05}\text{ m}$ $v=-0,0001134\text{ m}$ $w=-0,00256461655369\text{ rad}$	<b>Point B = Noeud N4</b> $F_x=-16,6448796377\text{ kN}$ $F_y=294,0\text{ kN}$ $M_z=30,7043979307\text{ kN}\cdot\text{m}$
<b>Point D = Noeud N3</b> $u=-1,11013382288e^{-05}\text{ m}$ $v=-0,0001134\text{ m}$ $w=0,00256461655369\text{ rad}$	
<b>Point B = Noeud N4</b> $u=0,0\text{ m}$ $v=0,0\text{ m}$ $w=0,0\text{ rad}$	

## Document DT8

Tableau des sections des aciers de construction

$\Phi$ mm	Nombre de barres									Masse kg/m
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
6	0,28	0,57	0,85	1,13	1,41	1,69	1,98	2,26	2,54	0,22
8	0,50	1,00	1,50	2,01	2,51	3,01	3,51	4,02	4,52	0,395
10	0,79	1,57	2,35	3,14	3,92	4,71	5,45	6,28	7,07	0,617
12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,78	7,92	9,04	10,18	0,888
14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,85	1,210
16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,10	14,07	16,13	18,15	1,580
20	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27	2,466
25	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18	3,850
32	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,30	64,34	72,38	6,313
40	12,57	25,13	37,70	50,27	62,83	75,40	87,96	100,53	113,10	9,864

# Document DT9

## Extraits du guide technique de la DGAC de janvier 2014 - Dimensionnement des chaussées aéronautiques souples

### 1. Les niveaux de protection

La caractérisation de la rigueur d'une période hivernale pour laquelle une structure de chaussée doit être protégée est fournie par l'indice de gel atmosphérique  $I$ , qui est en pratique référencé pour deux situations :

- l'hiver exceptionnel, noté HE, qui est l'hiver le plus rigoureux rencontré entre 1951 et 1997,
- et l'hiver rigoureux non exceptionnel, noté HRNE, défini comme étant l'hiver décennal sur la période 1951-1997.

Trois niveaux de protection contre le gel, dépendant de l'importance de l'aérodrome et de la fonction de la chaussée, sont possibles :

- La protection totale qui est déterminée de façon à ce que la profondeur de gel correspondant à l'hiver rigoureux exceptionnel (HRE) ne puisse atteindre les couches gélives du sol support ou celles de la chaussée s'il se trouvait en exister.
- La protection forte qui est définie sur le même principe que la protection totale, l'hiver rigoureux non exceptionnel (HRNE) se substituant à l'hiver exceptionnel.
- La protection réduite qui, quant à elle, laisse admettre que dans les conditions de l'hiver rigoureux non exceptionnel :
  - le gel peut légèrement pénétrer dans les couches gélives,
  - le trafic peut être réduit pendant le dégel.

Sans qu'il dispense de considérer chaque cas comme étant particulier, les distinctions faites par le tableau 1 ci-après peuvent servir de guide à la réflexion.

Trafic annuel de passagers de l'aérodrome	Niveau de protection
Supérieur à 200 000	totale
Compris entre 50 000 et 200 000	forte
Inférieur à 50 000	réduite

Tableau 1 : Niveau de protection contre le gel

Selon la profondeur atteinte par le gel et le niveau de protection retenu, les dispositions à adopter sont :

- soit de remplacer les matériaux gélifs des couches atteintes par le gel par des matériaux non gélifs,
- soit d'augmenter l'épaisseur des couches supérieures non gélives.

### 2. Caractérisation de la gélivité d'un sol

Pour caractériser la sensibilité au gel des matériaux, ceux-ci peuvent être soumis à l'essai de gonflement (NF P 98-234-2). Représentatif du phénomène, il consiste à mesurer, à intervalle régulier, l'allongement d'une éprouvette cylindrique du sol à tester maintenue à une température négative sur sa face supérieure et mise à sa base au contact d'une eau distillée.



Figure 1 : Éprouvettes après essai de gonflement.

L'essai de gonflement met en évidence la relation sensiblement linéaire reliant l'allongement de l'éprouvette à ce que l'on désigne comme étant la quantité de gel qui lui est transmise et dont la valeur est à chaque instant égale à la racine carrée du produit de la température négative maintenue en partie supérieure de l'éprouvette par le temps écoulé d'exposition au gel de celle-ci.

Cette relation permet de classer un sol ou un matériau granulaire testé en fonction de la pente  $p$  de sa courbe représentative, exprimée en  $\text{mm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{heure})^{1/2}$ . Ainsi, il est défini que :

- les matériaux sont non gélifs (SGn), lorsque  $p \leq 0,05$ ,
- les matériaux sont peu gélifs (SGp), lorsque  $0,05 < p \leq 0,40$ ,
- les matériaux sont très gélifs (SGt), lorsque  $p > 0,40$ .

### 3. Le principe de la vérification au gel-dégel

L'indice de gel atmosphérique  $I$  caractérisant, selon le cas choisi, l'hiver rigoureux exceptionnel ou rigoureux non exceptionnel statistiquement connu pour le site de l'aérodrome, il convient de vérifier que, déterminé pour ne transmettre à son sol support que des contraintes mécaniques admissibles, le corps de chaussée protège celui-ci de manière suffisante contre le gel.

La démarche consiste, dans un premier temps, à traduire cet indice de gel en quantité de gel  $Q_s$  transmise à la surface de la chaussée, puis à vérifier que la protection thermique apportée par le corps de chaussée ne laisse transmettre à la plate-forme de chaussée qu'une quantité de gel  $Q_t$  inférieure à la valeur admissible  $Q_{PF}$  à ce niveau.

### 4. sensibilité au gel de la plate-forme de chaussée

Le corps de chaussée étant constitué de matériaux non gélifs, le sol situé sous le niveau de plate-forme de chaussée est découpé, à partir de ses couches gélives, en tranches telles que leur sensibilité au gel ne puisse aller qu'en croissant avec la profondeur. Ceci revient à dire que toute couche de sol se voit affecter la sensibilité au gel de la couche la plus gélive située au-dessus d'elle, si le cas se présente.

#### 4.1. Quantité de gel admissible en surface des couches gélives situées sous la plate-forme de chaussée.

Dans le cas d'une protection totale ou forte, la quantité de gel  $Q_g$  admissible en surface d'une couche gélive est nulle.

L'examen des courbes de nombreux essais de gonflement a permis de déterminer les quantités de gel admissibles, correspondant à un gonflement limité à 5 mm, pour une protection réduite, en surface d'une couche gélive. Exprimées non plus en  $(^\circ\text{C}\cdot\text{heure})^{1/2}$  mais en  $(^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$ , ces quantités limites sont, selon la sensibilité au gel de la couche gélive considérée, retenues comme étant égales à :

$$Q_g = \begin{cases} 4 & \text{si } 0,05 < p \leq 0,25 \\ 1/p & \text{si } 0,25 < p \leq 1 \\ 0 & \text{si } p > 1 \end{cases} \quad \text{avec } p \text{ en } \text{mm}/(^\circ\text{C}\cdot\text{jour})^{1/2}$$

La formule ci-dessus est directement applicable lorsqu'une seule couche gélive est située sous la plate-forme (une seule susceptibilité thermique à prendre en compte).

Dans le cas d'une protection réduite où plusieurs couches gélives ayant des susceptibilités thermiques différentes se superposent, le principe suivant s'applique :

- si la première couche de matériau gélif sous la plate-forme a une épaisseur inférieure à 20 cm, la quantité de gel admissible en surface de cette couche est reconnue comme pouvant être égale à :

$$Q_g = Q_{g2} + (Q_{g1} - Q_{g2}) \times \frac{h_1}{20}$$

Avec :

$Q_{g1}$  = quantité de gel admissible de la première couche de matériaux gélifs (couche supérieure),

$Q_{g2}$  = quantité de gel admissible de la seconde couche de matériaux gélifs (couche inférieure),

$h_1$  = épaisseur en centimètres de la couche supérieure de matériaux gélifs.

- si la première couche de matériau gélif a une épaisseur supérieure ou égale à 20 cm, la quantité de gel admissible en surface de cette couche est :

$$Q_g = Q_{g1}$$

4.2. Protection thermique apportée par les matériaux non gélifs situés sous la plate-forme de chaussée.  
La protection thermique  $Q_{ng}$ , apportée par les matériaux non gélifs de la couche de forme et du sol support situés au-dessus de la première couche gélive de ce dernier est donnée par la formule :

$$Q_{ng} = \frac{A_n \times h_n^2}{h_n + 10}$$

dans laquelle :

$h_n$  est l'épaisseur en centimètres de la tranche supérieure de sol non gélif,

$A_n$  est un coefficient dépendant de la nature du matériau, dont la valeur est donnée par le tableau 2 ci-après :

Matériaux	Non traités		Traités	
	GNT et matériaux insensibles à l'eau dont le passant à 80 µm est ≤ à 3%	(C1) A1 - A2 - A3 traités à la chaux et au liant hydraulique	(C1) B2 à B6 traités au liant hydraulique (avec ou sans chaux)	Cendres Volantes
$A_n$ (°C·jour) <sup>1/2</sup> cm <sup>-1</sup>	0,12	0,14	0,13	0,17

A – B – C – D : classes de matériaux définies par la norme NF P 11-300

GNT : graves non traitées définies par les normes NF P 18-545 et NF EN 13-285

Tableau 2 : Valeurs de  $A_n$  en fonction de la nature du matériau de la couche de forme.

4.3. Quantité de gel admissible au niveau de la plate-forme de chaussée.

La quantité de gel  $Q_{PF}$  tenue pour admissible au niveau de la plate-forme de chaussée est déduite des termes précédents par la relation :

$$Q_{PF} = Q_{ng} + Q_g$$

## 5. protection thermique apportée par la structure de la chaussée

5.1. Quantité de gel transmise à la surface de la chaussée.

En altitude moyenne, avec un ensoleillement faible à moyen et un indice de gel atmosphérique  $I$  ne dépassant pas 210°C·jour, les phénomènes de convection et de rayonnement en surface de chaussée étant pris en compte, on admet que la quantité de gel  $Q_s$  transmise à la surface de la chaussée est fournie par la formule :

$$Q_s = \sqrt{0,7 \times (I - 10)}$$

5.2. Quantité de gel transmise au niveau de la plate-forme de chaussée.

La quantité de gel  $Q_t$  transmise à la plate-forme, protégée par le corps de chaussée d'épaisseur  $h$ , peut être déterminée avec une méthode simplifiée.

Selon la méthode simplifiée,

$$Q_s = (1 + a \times h) \times Q_t + b \times h$$

D'où :

$$Q_t = \frac{Q_s - b \times h}{1 + a \times h}$$

où  $a$  et  $b$  sont des coefficients caractéristiques des matériaux constituant les différentes couches du corps de chaussée, s'obtenant à partir des expressions :

$$h = \sum h_i,$$

$$a = \frac{1}{h} \sum (a_i \times h_i), \quad b = \frac{1}{h} \sum (b_i \times h_i)$$

avec  $h_i$  épaisseur de la couche  $i$  exprimée en cm.

avec  $a_i$  et  $b_i$  en  $(^\circ\text{C} \cdot \text{jour})^{1/2} \text{cm}^{-1}$  dont les valeurs sont indiquées dans le tableau 3.

	$a_i$	$b_i$
Matériaux bitumineux	0,008	0,06
Matériaux granulaires	0,008	0,10

Tableau 3 valeurs de  $a_i$  et  $b_i$  en  $(^\circ\text{C} \cdot \text{jour})^{1/2} \text{cm}^{-1}$

## **6. Comparaison de $Q_t$ et $Q_{PF}$**

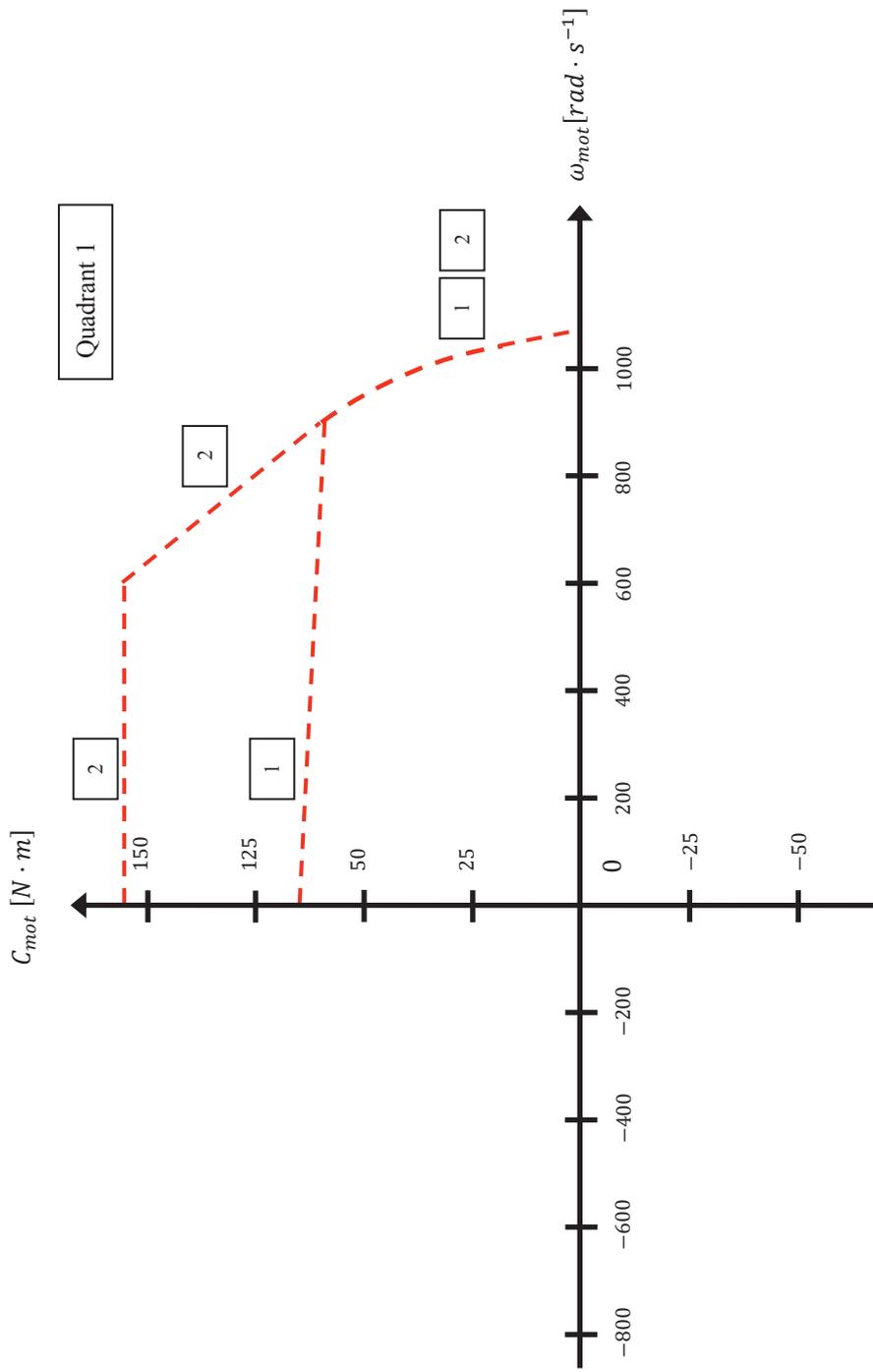
La méthode consiste à comparer la quantité de gel  $Q_t$  transmise au niveau de la plate-forme de chaussée à la quantité de gel  $Q_{PF}$  admissible au niveau de celle-ci. La condition à satisfaire est :

- pour une protection totale :  $Q_t(I_{HRE}) < Q_{ng}$
- pour une protection forte :  $Q_t(I_{HRNE}) < Q_{ng}$
- pour une protection réduite :  $Q_t(I_{HRNE}) < Q_{ng} + Q_g$



# Document Réponse DR1

Evolution du point de fonctionnement dans le plan couple-vitesse



Quadrant 2

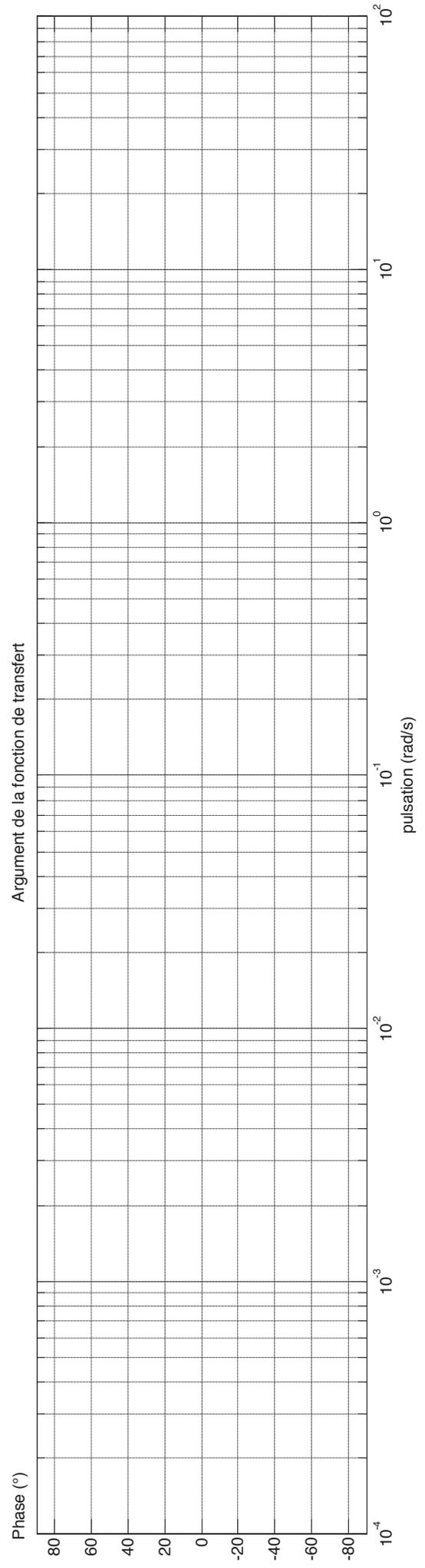
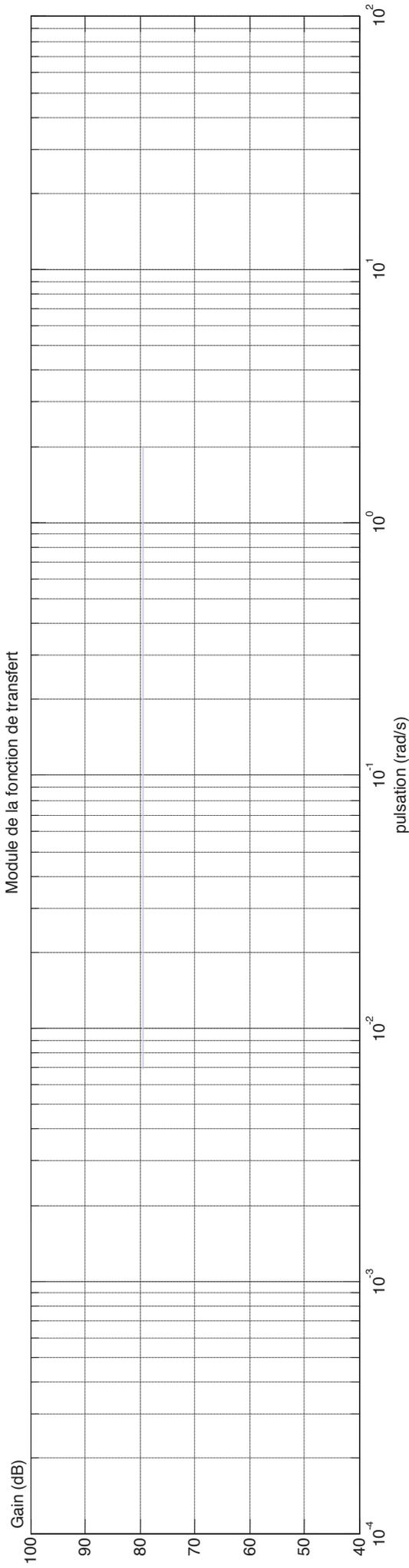
Quadrant 1

Quadrant 3

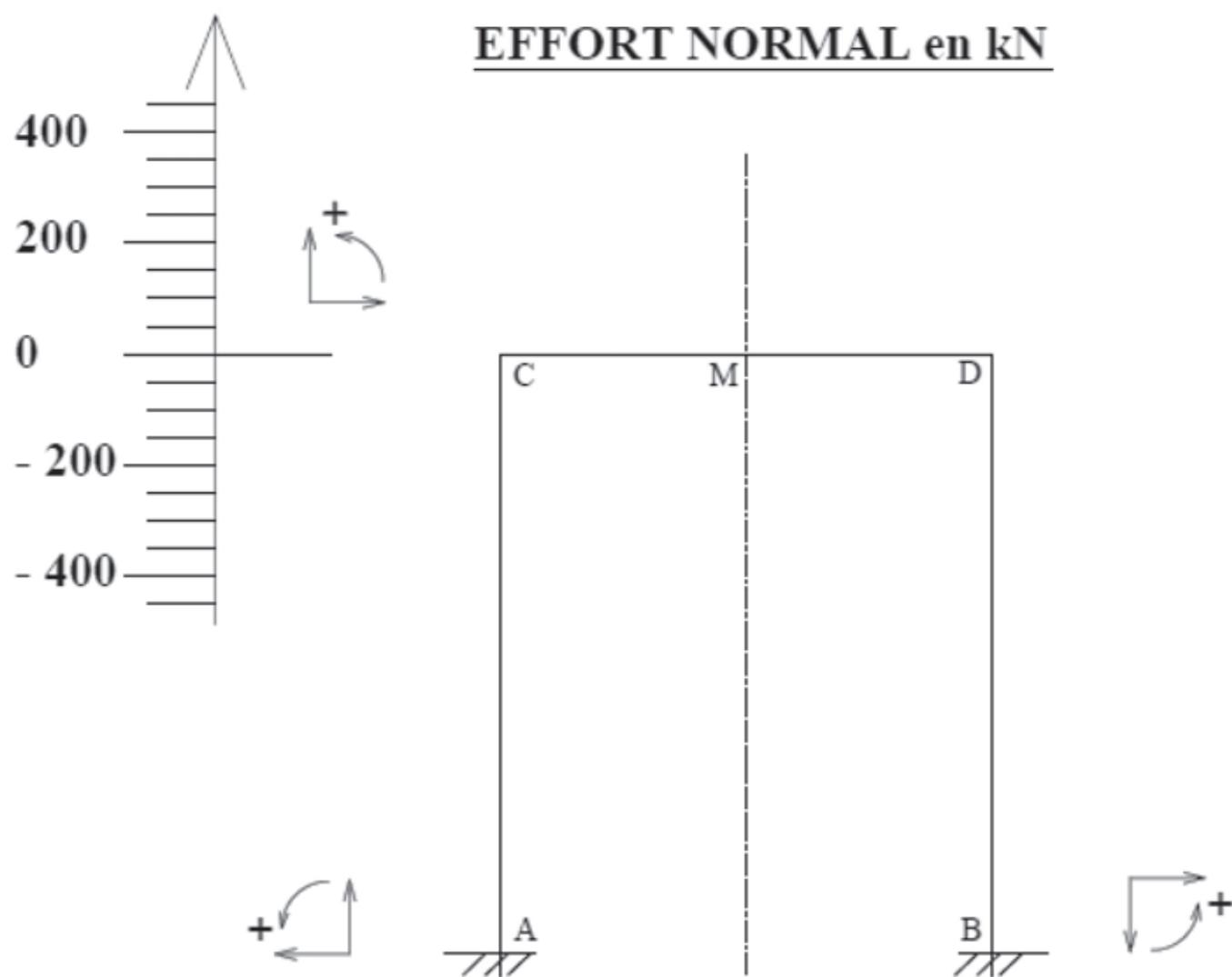
Quadrant 4

# Document Réponse DR2

Représentation du module et de la phase dans le plan de Bode de la fonction de transfert  $H_{cons}(j\omega)$

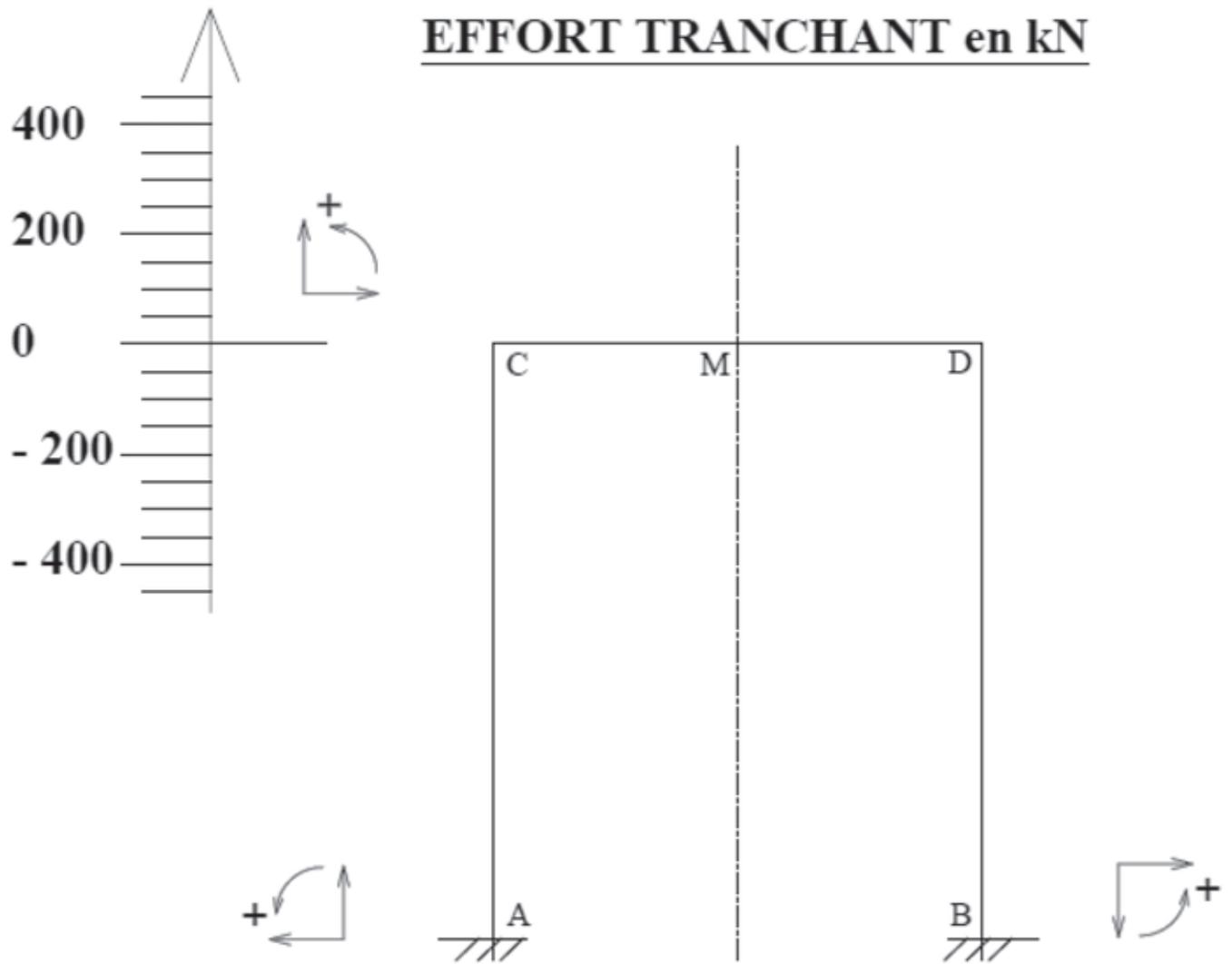


# Document Réponse DR3



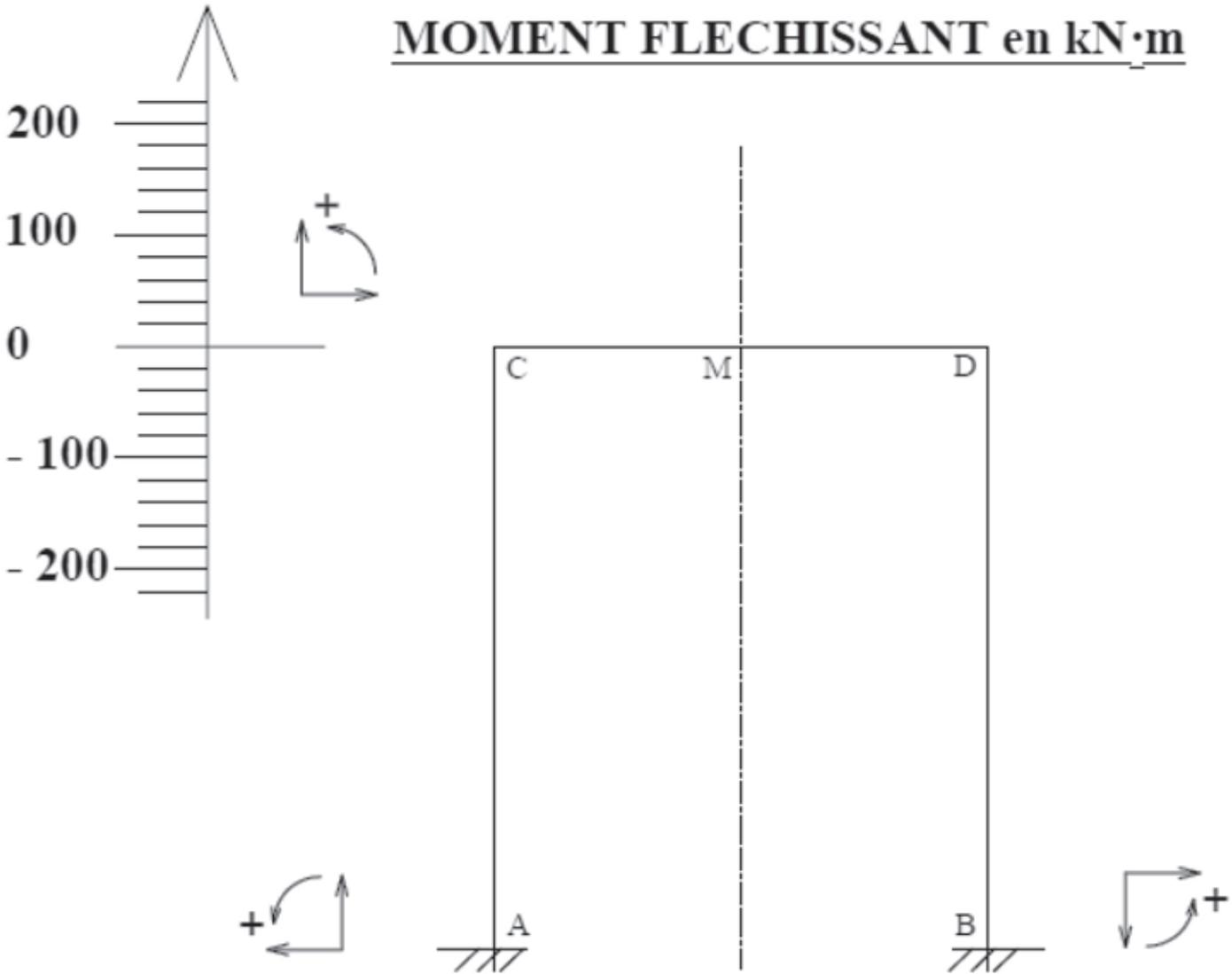


# Document Réponse DR4

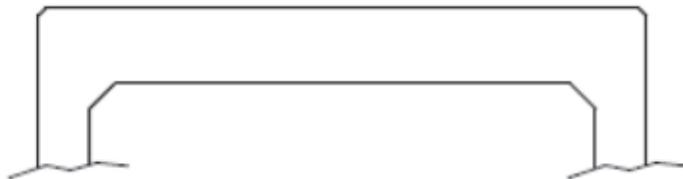


## Document Réponse DR5

### MOMENT FLECHISSANT en kN·m

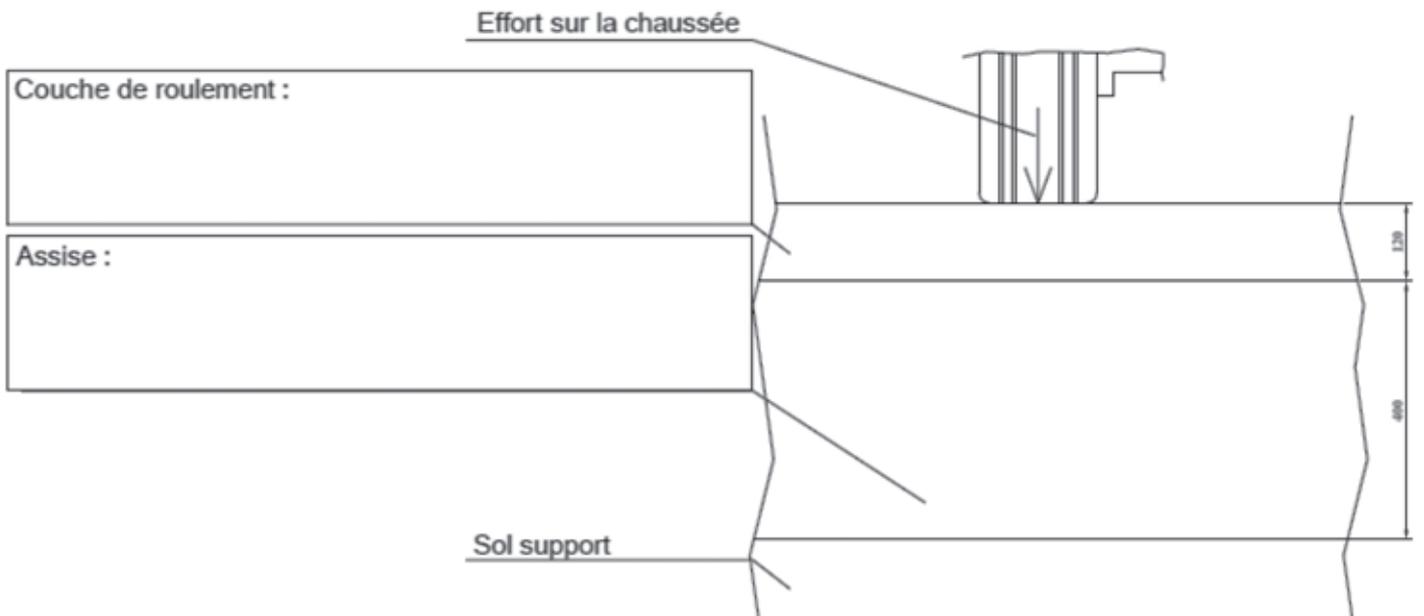


### SCHÉMA DE PRINCIPE DES ARMATURES POUR LA DALLE DE LA GALERIE TECHNIQUE



# Document Réponse DR6

## Chaussée souple



## Chaussée rigide

