



Date : 1^{er} janvier 2021
Version : 1.3

Référence du dossier : / BAV-511.5-00027/00004/00004/00001

Directive

Attestations relatives au comportement dynamique des chemins de fer à voie métrique, spéciale et à cré- maillère

(Dir. CD-MS C)

Éditeur :	Office fédéral des transports, 3003 Berne
Auteur :	Thomas Schlusemann
Publication :	Site Internet de l'OFT
Disponible en :	allemand (original) français italien

Gestion interne des documents

Échelon :	Directive, public
Accolage QM-SI :	BAV-Ril_FV-MSZ_Nachweis-sicheres-Fahrverhalten_Meter-spur+Spezialspur+Zahnradbahnen_V1.3_2020-08
Domaine d'application :	Processus OFT 42

La présente directive entre en vigueur le 1^{er} janvier 2021 ; elle remplace la version 1.2 du 3 avril 2018.

Office fédéral des transports
Division Infrastructure

Division Sécurité

Anna Barbara Remund, sous-directrice

Rudolf Sperlich, sous-directeur

Versions / suivi des modifications

Version	Date	Auteur	Modifications	Statut ^x
1.1	21.02.2018	Th. Schlusemann	Révision générale, simplifications	remplacée
1.2	03.04.2018	Th. Schlusemann		remplacée
1.3	01.01.2021	Th. Schlusemann	Refonte du chapitre 3.2, Sécurité au déraillement – chemins de fer à crémaillère, Intégration de la démonstration par simulation numérique	en vigueur

^x Les états du document prévus sont : en chantier / en révision / en vigueur (avec visa) / remplacée

Table des matières

1 But de la directive.....	3
2 Stabilité dynamique.....	4
2.1 Exécution.....	4
2.2 Obligation de fournir une attestation.....	4
2.2.1 Méthodes d'attestation.....	4
2.3 Comportement au roulis.....	5
3 Sécurité au déraillement.....	5
3.1 Chemins de fer à adhérence (SD-A).....	5
3.1.1 Méthode 1 (mesures directes des efforts entre roue et rail).....	6
3.1.2 Méthode 2 (procédure indirecte).....	6
3.1.3 Méthode 3 (procédure indirecte simplifiée).....	6
3.1.4 Méthode B (procédure directe par simulation).....	7
3.2 Chemins de fer à crémaillère (SD-C).....	7
3.2.1 Méthode de Borgeaud (programme de calcul quasi-statique, état rigide).....	7
3.2.2 Méthode 2 (procédure quasi-statique par simulation).....	8
3.2.3 Reconnaissance d'une méthode de calcul.....	10
4 Stabilité en cas de vent latéral.....	12
5 Bibliographie.....	12
6 Annexe.....	13
6.1 Abréviations et symboles.....	13
6.2 Modèle de référence et quatre exemples de cas (scénarios).....	16
6.2.1 Configuration des paramètres.....	16
6.2.2 Résultats de référence.....	22

1 But de la directive

La présente directive a pour but de fixer les bases nécessaires à la tenue du dossier de sécurité en rapport avec le comportement dynamique des véhicules ferroviaires à voie métrique, spéciale et à crémaillère.

Elle concrétise les lois, les ordonnances, les dispositions d'exécution et les normes applicables en ce qui concerne l'attestation de la sécurité du roulement.

Les bases légales de la présente directive sont : la loi fédérale sur les chemins de fer (LCdF), état au 1^{er} juillet 2020, l'ordonnance sur les chemins de fer (OCF), état au 12 juin 2020, les dispositions d'exécution de l'OCF (DE-OCF), état au 1^{er} novembre 2020, ainsi que la directive sur l'homologation des véhicules ferroviaires dans sa version du 1^{er} décembre 2019.

La présente directive n'a valeur ni de loi ni d'ordonnance, mais elle est plus contraignante qu'une simple recommandation. Des écarts sont autorisés dans la mesure où l'objectif visé par la loi, par l'ordonnance et par la directive est atteint d'une autre manière.

Si le requérant se conforme à la directive, il est sûr que l'autorité acceptera du point de vue méthodologique les documents qu'il a élaborés. Sinon, il court le risque que l'autorité ne les accepte pas.

2 Stabilité dynamique

Pour les chemins de fer à adhérence et pour les chemins de fer à adhérence et à crémaillère, il y a lieu de fournir l'attestation relative à la stabilité dynamique en accord avec l'OFT, par analogie à la norme SN EN 14363:2016.

En règle générale, il n'est pas nécessaire de présenter d'attestations relatives à la stabilité dynamique pour les véhicules circulant à une vitesse inférieure à 100 km/h.

Si les véhicules sont munis de systèmes dont la défaillance ou le dysfonctionnement peuvent influencer négativement sur la sécurité de roulement ou le profil, ces modes de défaillance doivent être examinés exhaustivement lors des essais.

2.1 Exécution

Les essais ont lieu à vide sur rails secs, le dispositif de graissage de boudin étant déclenché ; ils sont effectués à une vitesse allant jusqu'à 110 % de la vitesse maximale admise.

Les mesures s'effectuent par analogie à la méthode simplifiée prévue par la norme SN EN 14363:2016 :

- La mesure de l'accélération transversale ypp^{++} au châssis au-dessus des essieux est requise,
- La mesure des accélérations ypp^* et zpp^* dans la caisse au-dessus des châssis est recommandée pour considérer le comportement au roulis.

L'évaluation et la vérification du respect des valeurs limites de $ypp^+_{rms,lim}$ sont régies par la norme SN EN 14363:2016.

2.2 Obligation de fournir une attestation

Sur la base des vérifications menées jusqu'ici, l'obligation de fournir une attestation est fixée comme suit :

- La stabilité dynamique doit être prouvée pour les bogies moteurs (creux potentiels dus à la traction) et les châssis non conventionnels (bogies à écartement variable ou Jacob) admis pour une vitesse maximale $v_{zul} \geq 100$ km/h.
- La stabilité dynamique doit être prouvée pour les bogies porteurs (faible moment d'inertie de masse) admis pour une vitesse maximale $v_{zul} \geq 120$ km/h.

2.2.1 Méthodes d'attestation

Une des méthodes suivantes est applicable en accord avec l'OFT :

Méthode 1 : Vérification de la stabilité dynamique par des essais

- Marches d'essai sur un tronçon de référence avec profils neufs (faute de profil d'usure connu) (mesure du profil de roue + évaluation des conicités)
- Marches d'essai sur un tronçon de référence avec profils de roue usés (après la première année d'exploitation ou avant le premier reprofilage réglementaire) ou avec profil d'usure connu (par ex. : RhB W03) (mesure du profil de roue + évaluation des conicités)

Méthode 2 : Surveillance permanente de la stabilité dynamique

- Recensement quotidien des accélérations transversales maximales ypp^+_{rms} et des prestations kilométriques actuelles d'un véhicule de référence en exploitation régulière
- Suivi mensuel jusqu'au premier reprofilage réglementaire (env. 80 à 120 tkm)
- Limite d'avertissement 20 % inférieure aux valeurs limites $ypp^+_{rms,lim,red}$

2.3 Comportement au roulis

La valeur limite du coefficient de souplesse est prescrite par les DE-OCF, DE 18.2 / 47.2. Si cette valeur est dépassée, il faut vérifier le calcul de la limitation.

Le coefficient de souplesse doit être déterminé conformément à la norme SN EN 14363:2016 à partir :

- de la mesure ou de la simulation d'un essai statique (roulis vers l'intérieur de la courbe)
- ou
- de la mesure ou de la simulation d'une course quasi-statique en courbe (roulis vers l'extérieur de la courbe)

3 Sécurité au déraillement

3.1 Chemins de fer à adhérence (SD-A)

Il faut attester par calcul (simulation) l'aptitude d'un véhicule à franchir des gauches de voie sans dérailler, indépendamment de la vitesse de circulation prévue. Pour ce faire, il y a lieu de définir, sur la base de la norme SN EN 14363:2016, la valeur limite Y/Q ou montée de la roue Δz_R et de la comparer avec les valeurs limites admissibles (adaptées par rapport à la norme).

Pour les chemins de fer à adhérence, **la sortie d'une courbe surhaussée** (gauche de la voie) est considérée comme l'état le plus défavorable ; cela correspond à **une diminution de la charge de la roue de guidage extérieure de la courbe (par châssis)**.

Parmi les quatre méthodes d'essai décrites, seules les deux méthodes directes 1 et B¹ sont applicables aux chemins de fer à voie étroite.

Les procédures d'examen ont été adaptées aux conditions spécifiques des réseaux de chemins de fer à voie étroite (voie métrique [M], voie spéciale [S]).

Les examens doivent être effectués avec des profils de roue représentatifs et des profils de rail spécifiques aux réseaux respectifs ainsi qu'avec les états de montage nominaux (écartement des rails, inclinaison des rails).

À titre de marge de sécurité, il y a aussi lieu d'effectuer des calculs à partir de **gauches d'essai majeurs de 10 %**. Le tronçon d'essai entier doit être franchi sans déraillement effectif (montée au-dessus de la hauteur du boudin) – les valeurs limites peuvent être dépassées.

¹ Entendre « méthode selon l'annexe B de la norme SN EN 14636:2016 »

3.1.1 Méthode 1 (mesures directes des efforts entre roue et rail)

Mesure de la résistance au déraillement par circulation (Y, Q) sur une voie d'essai présentant des gauches (VGB).

3.1.1.1 Conditions d'essai adaptées et valeurs limites pour la méthode 1

Paramètre		Définition	Valeurs usuelles (M+S)	Valeurs voie normale (N)	Condition	Remarque
Conditions d'essai VGB	Rayon voie d'essai	$R = 100 \text{ m}$ $R = R_{min}$		150 m		
	Dévers	$u = \pm 45 \text{ mm}$				Mouvement de roulis à faible influence
	Gauche primaire	g^+ : spécifique au réseau	6,0 ‰	7,0 ‰	RhB 20879D	
	Gauche secondaire	g^+ : spécifique au réseau	3,0 ‰	3,0 ‰ .. (4,0 ‰)	R RTE 22546, RhB 20879D	
	Différence de charge par roue	$\Delta q_0 = 5 \%$			DE-OCF, DE 47.1	Valeur maximale admissible
	Vitesse	$v = 1 \text{ m/s}$				Vitesse au pas
	Friction boudin	$\mu_F = 0.40$				
Friction table de roulement		$\tau_{max} = \mu_T(Q_0, \alpha)$	0.42 .. 0.52		$2\bar{Q}_0 = 20 \text{ t} \dots 5 \text{ t}$, SN EN 14363:2016	α angle d'attaque
		$\tau = \frac{Y}{Q_i} - \gamma_t$				γ_t angle de contact
Lim	Valeur limite directe 1	$\frac{Y}{Q} < \frac{Y}{Q_{lim}}$ $= \frac{\tan \beta_F - \mu_F}{1 + \mu_F \cdot \tan \beta_F}$	0.85 .. 1.44	1.2 ($\beta_F = 70^\circ$)	$\mu_F = 0.36$ $\beta_F = 60^\circ \dots 75^\circ$	Coefficient de déraillement ²
	Valeur limite indirecte 2	$\Delta z_R < \Delta z_{R,lim}$ = 5 mm			Si dépassement de la valeur limite 1	Montée des roues ³
	Valeur limite 3	$\Delta Q / Q_0$		-	Observation unique-ment	Diminution relative de la charge verticale de la roue ⁴

Les conditions Influence du mouvement de roulis et friction sont marquées en bleu car elles se distinguent fondamentalement de la méthode B.

3.1.2 Méthode 2 (procédure indirecte)

Le calcul du rapport (Y/Q) repose sur une mesure de l'effort de guidage sur une voie en courbe (Y) et sur une mesure de la réduction de la charge verticale (Q) sur un banc d'essai.

La méthode 2 ne permet d'obtenir des déclarations fiables qu'à des coûts disproportionnés ; c'est pourquoi il est **exclu** de l'appliquer.

3.1.3 Méthode 3 (procédure indirecte simplifiée)

Associe les essais de rotation du bogie et de déchargement des roues.

Étant donné que la plupart des véhicules à voie étroite sont équipés de bogies à couronne de pivotement à billes/rouleaux, cette procédure **n'est pas judicieuse**.

Pour obtenir des déclarations solides en appliquant la méthode 3, les essais et les évaluations représentent des frais disproportionnés ; cette méthode est donc **exclue**.

² Formule de Nadal, avec angle du flanc du boudin β_F et valeur de frottement du boudin μ_F

³ En cas de contact défavorable avec la hauteur du boudin, d'importants rayons d'arrondi du boudin ou de remaniements du champignon du rail, il faut éventuellement réduire la valeur limite $\Delta z_{R,lim}$, afin que le point de contact effectif du boudin ne se situe pas dans le rayon d'arrondi du boudin.

⁴ \bar{Q}_0 : force moyenne d'appui des roues d'un essieu sur une voie horizontale (dans la SN EN 14363:2016, annexe V: Q_{F0})

3.1.4 Méthode B (procédure directe par simulation)

Attestation directement à partir des forces d'interaction roue-rail (Y , Q) sur une sortie de courbe avec dépression locale dont le tracé est représentatif des conditions d'exploitation.

3.1.4.1 Conditions d'essai adaptées et valeurs limites pour la méthode B

Paramètre	Définition	Valeurs usuelles (M+S)	Valeurs voie normale (N)	Condition	Remarque	
Conditions d'essai BAS	Rayon voie d'essai	$R = 100 \text{ m}$ $R = R_{min}$		200 m .. 100 m		
	Dévers	$u = 105 \text{ mm}$ $u = u_{max}(R_{min})$		150 mm .. 50 mm	R RTE 22546	Influence totale du mouvement de roulis
	Dépression	$l_{Senke} = 2a^+$		6 m		Dépression en triangle avec demi-longueur l_{Senke}
	Gauche primaire	g^+ : spécifique au réseau	6.0 ‰	6.7 ‰	RhB 20879D	
	Gauche secondaire	g^+ : spécifique au réseau	3.0 ‰	3.3 ‰	R RTE 22546, RhB 20879D	
	Différence de charge par roue	$\Delta q_0 = 5 \%$			DE-OCF DE 47.1	Valeur maximale admissible
	Vitesse	$v = 1 \text{ m/s}$				Vitesse au pas
	Friction boudin	$\mu_F = 0.32$		0.32	SN EN 14363:2016	Valeur réduite selon norme
	Friction table de roulement	$\mu_r = 0.32$		0.32	SN EN 14363:2016	Valeur réduite selon norme
lim	Valeur limite directe 1	$\frac{Y}{Q} < \frac{Y}{Q}_{lim}$ $= \frac{\tan \beta_F - \mu_F}{1 + \mu_F \cdot \tan \beta_F}$	0.91 .. 1.55	1.2 ($\gamma_F > 68^\circ$)	$\mu_F = 0.32$ $\beta_F = 60^\circ \dots 75^\circ$	Coefficient de déraillement ²
	Valeur limite indirecte 2	$\Delta z_R < \Delta z_{R,lim}$ $= 5 \text{ mm}$		-	Si dépassement de la valeur limite 1	Montée des roues ³
	Valeur limite 3	$\Delta Q / \bar{Q}_0$		-	Observation unique-ment	Diminution relative de la charge verticale de la roue

Contrairement à la méthode 1, l'influence totale du mouvement de roulis et une friction réduite sont spécifiées.

3.2 Chemins de fer à crémaillère (SD-C)

Le calcul (simulation) de la sécurité au déraillement (jusqu'à présent « stabilité longitudinale » et « sécurité au déraillement ») doit être effectué conformément aux DE-OCF, DE 54.1.

Pour les chemins de fer à crémaillère, l'état considéré comme le plus défavorable est **un double freinage en courbe à la descente et par vent latéral** ; cet état entraîne un délestage de la roue côté amont et extérieur de la courbe (par châssis) par les forces de freinage, d'inertie, d'accouplement, du vent latéral et de transmission par engrenage et du gauchissement de la voie (variation du dévers + gauchissement hélicoïdal⁵).

La sécurité au déraillement doit être calculée selon la méthode 2 (cf. 3.2.2). Celle-ci est basée sur la méthode quasi-statique de Borgeaud, qui est cependant adaptée à l'état actuel de la technique.

Si un dispositif de graissage de boudin est efficace, on peut s'attendre à des conditions de frottement favorables conformément aux DE-OCF ad art. 54.1, ch. 3.4.

3.2.1 Méthode de Borgeaud (programme de calcul quasi-statique, état rigide⁶)

La procédure selon Borgeaud appliquée jusqu'ici ne correspond plus à l'état de la technique.

Les valeurs limites conçues pour cette procédure S_Q (facteur de sécurité de la stabilité longitudinale) et S_R (facteur de sécurité de la sécurité au déraillement) sont remplacées par des critères de délimitation

⁵ Gauchissement hélicoïdal : le gauche résultant de la déclivité de la voie N , du rayon de courbure R et de la portée s_w

⁶ État considéré sans déplacements et déformations

courants à l'heure actuelle.

Par conséquent, le commentaire 8 relatif aux DE-OCF n'est plus nécessaire.

Lors de modifications sur des véhicules historiques qui, lors de leur exploitation, n'ont pas présenté de particularités en matière de stabilité et de sécurité au déraillement, la méthode de Borgeaud reste admise à titre exceptionnel puisqu'elle permet de comparer comment les modifications de l'utilisation ou des composants influent sur la stabilité et sur la sécurité au déraillement.

Ce faisant, il faut veiller à ce que les valeurs de sécurité ne baissent pas par rapport à celles de la version d'origine du véhicule puisque l'effet du gauchissement hélicoïdal n'a pas été pris en compte.

3.2.2 Méthode 2 (procédure quasi-statique par simulation)

Attestation directement à partir des forces d'interaction roue-rail (Y, Q) sur une sortie de courbe dont le tracé est représentatif des conditions d'exploitation.

Le processus de freinage est considéré comme quasi-statique. Les effets qui ne sont pas quasi-statiques lors du passage sur la courbe de raccordement gauchie doivent cependant être observés et évalués.

Les examens doivent être effectués avec des profils de roue en série et des profils de rail spécifiques au réseau (tous à l'état nominal) ainsi qu'avec les états de montage nominaux (écartement des rails, inclinaison des rails).

D'autres tolérances de construction ou de fabrication, l'usure et les intempéries ne sont pas prises en compte.

Le véhicule est considéré comme sûr lorsque la valeur limite directe pour la diminution relative de la charge de la roue $\Delta Q/\bar{Q}_0$ est respectée.

Si ladite valeur limite est dépassée, il faut obligatoirement respecter toutes les valeurs limites indirectes (diminution relative de la charge de la roue $\Delta Q/\bar{Q}_0|_{red}$, coefficients de déraillement Y/Q et montée de la roue Δz_R).

3.2.2.1 Conditions d'essai adaptées et valeurs limites

Paramètres	Définition	Valeurs usuelles	Condition	Remarque	
Conditions d'essai SD-C	Rayon de courbure	R : spécifique au tronçon	≥ 60 m	DE-OCF, DE 17, 5.2 R RTE 22546, 7.2	Situation défavorable du tronçon d'exploitation (Combinaison $R u N$)
	Dévers	u : spécifique au tronçon	≤ 28 mm (S800) ≤ 35 mm (M) ≤ 50 mm (N)	DE-OCF, DE 17, 3.4 R RTE 22546, 5.5	
	Déclivité de la voie	N : spécifique au tronçon	≤ 250 ‰	DE-OCF, DE 17, 7.2 R RTE 22546, 9.2	
	Gauche du dévers	g_U : spécifique au tronçon	$\leq 2,5$ (3,0) ‰	DE-OCF, DE 17, 4.2 R RTE 22546, 6.2	
	Défaut de la géométrie de la voie	$\Delta g^+ = 0$ ‰			Pas de double erreur : assiette de la voie + double freinage
	Différence de charge par roue	$\Delta q_0 \approx 0$ ‰	≤ 5 ‰	DE-OCF, DE 47.1, 2.2	Valeur maximale admissible ⁷
	Vitesse	$v = 1$ m/s $v = v_{max} + 10$ ‰			Vitesse au pas
			≤ 40 km/h	DE-OCF, DE 76.1.a, 9f	Selon catégorie de vitesse
	Vitesse du vent	$v_w = 50$ km/h ou spécifique au tronçon		DE-OCF, DE 54.1, 5.3 DB Ril 807.0439	Selon les conditions locales vent latéral 90°
	Friction du boudin	$\mu_F = 0,15$ (non graissé : 0,30)		DE-OCF, DE 54.1, 3.4	Documentation dispositif de graissage de boudin
	Friction de la table de roulement	$\mu_T = 0,30$		DE-OCF, DE 54.1, 3.4	
	Friction de la crémaillère	$\mu_Z = 0,15$		DE-OCF, DE 54.1, 3.4	(répartition selon Borgeaud)
Force de freinage	À partir du calcul de freinage		DE-OCF, DE 54.2, 2.2	Supplément de 15 ‰ (tolérance)	
État du véhicule	Poids à vide (év. brut) suspension nom. suspension pneumatique		Selon l'exploitation	Pas de double erreur : suspension de secours + double freinage	
lim	Facteur de sécurité de la stabilité longitudinale	S_Q	(1.3 .. 1.4)		Supprimé selon 3.2.1
	Facteur de sécurité de la sécurité au déraillement	S_R	(1.2 .. 1.25)		Supprimé selon 3.2.1
	Valeur limite directe 1	$\left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right < \left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right _{lim} = 80$ ‰			Diminution relative de la charge de la roue (stabilité)
	Valeur limite indirecte 1	$\left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right < \left \frac{\Delta Q}{Q_0} \right _{lim,red} = 95$ ‰ ⁷		Si dépassement de la valeur limite directe 1	
	Valeur limite indirecte 2	$\frac{Y}{Q} < \frac{Y}{Q}_{lim} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\tan \beta_F - \mu_F}{1 + \mu_F \cdot \tan \beta_F}$	0.84 .. 1.53	$\mu_F = 0.15$ $\beta_F = 60^\circ .. 70^\circ .. 75^\circ$	Coefficient de déraillement ⁸ (sécurité au déraillement)
Valeur limite indirecte 3	$\Delta z_R < \Delta z_{R,lim} = 5$ mm			Montée de la roue Fehler! Textmarke nicht definiert. (sécurité au déraillement)	

⁷ Véhicules modélisés de manière symétrique avec charge à l'essieu réelle $\Delta q_0 \leq 5$ ‰⁸ Formule de Nadal, réduite d'un tiers en courbe complète par rapport à une courbe de raccordement, par analogie avec la SN EN 14363

À titre de réserve de sécurité supplémentaire⁹, il convient d'effectuer des calculs avec **des valeurs de frottement de crémaillère augmentées de 20 .. 25 %**. Dans ce cas, le chapitre d'essai complété par une entrée en courbe doit être franchi sans déraillement avéré (montée au-dessus de la hauteur du boudin) – les valeurs limites peuvent être dépassées.

- $\mu_z = 0,15 \cdot 120 \% = 0,18$ catégorie de vitesse 2¹⁰ (~ locomotives, trains tirés par des locomotives)
- $\mu_z = 0,15 \cdot 125 \% = 0,1875$ catégorie de vitesse 3¹⁰ (~ rames automotrices)

3.2.2.2 Processus de simulation

Le scénario commence à :

- l'état initial statique ($R = u = N = v = a = v_w = F_{T|B} = 0$).

Les changements d'état suivants se superposent successivement :

- réglage de l'état quasi-statique au freinage (a de $m_{trans|rot}$, w , $F_{T|B}$ et N)
- course en descente avec déclivité de la voie N
- Entrée en courbe avec gauche du dévers g_U
- Courbe complète avec rayon R (gauchissement hélicoïdal $g_H \approx \frac{-N}{1+N^2} \frac{s_w}{R}$) et dévers u
- Application du vent latéral avec la vitesse v_w

3.2.3 Reconnaissance d'une méthode de calcul

Pour que l'OFT reconnaisse une méthode de calcul, il faut élaborer un modèle de référence. Il faut démontrer que les résultats de références puissent être atteints avec les paramètres indiqués.

3.2.3.1 Topologie et effets à représenter

Le modèle de simulation et la simulation de course doivent représenter la topologie et les effets suivants :

- rigidités et élasticités du châssis et de la caisse,
- guidage (contact roue-rail conformément à l'état de la technique),
- engrènement (contact roue dentée-crémaillère),
- Répartition des coefficients de frottement de la crémaillère horizontaux / verticaux (quasi-statique selon Borgeaud),
- Réactions d'entraînement (géométrie de suspension, masses en rotation, état au freinage quasi statique),
- forces d'accouplement dans le convoi,
- forces du vent latéral (stabilité),
- gauchissement hélicoïdal.

⁹ Par analogie à l'actuel supplément de sécurité de 5 à 25 % (DE-OCF, DE 54.1)

¹⁰ Définition selon les DE-OCF, DE 76.1.a, ch. 9f

3.2.3.2 Modèle de référence et quatre exemples de cas (scénarios)

Une locomotive à crémaillère à quatre essieux He 4/4 est utilisée comme modèle de référence. Elle a les caractéristiques suivantes : différents porte-à-faux de caisse, bogies asymétriques (empattement, masse, rigidité de la suspension primaire), roues folles, deux moteurs à crémaillère à suspension par le nez et répartition de freinage asymétrique.

Quatre exemples de cas (scénarios) doivent être calculés :

- Solo locomotive seulement, pas de vent latéral
- Solo (+vent) plus vent latéral
- Composition (+descente non freinée) locomotive + locomotive placée en amont
- Composition (+descente freinée, +vent) plus locomotive poussée freinée et vent latéral

La configuration des paramètres correspondants figure à l'annexe 6.2.1 :

- Modèle de base géométrie principale, niveaux primaires et secondaires, masse ainsi que contact roue-rail
- Moteur données du moteur et contact roue dentée-crémaillère
- Scénarios Géométrie et masse du train, traction/freins, course + tronçon ainsi que vent latéral

En outre, les résultats de référence figurent à l'annexe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** :

- force d'appui stat. des roues Q_0
- coefficient de frottement horizontal quasi-stat. de la dent $\bar{\mu}_{z,y,qst}$
- coefficient de frottement vertical quasi-stat. de la dent $\bar{\mu}_{z,z,qst}$
- force longitudinale quasi-stat. de la dent $Z_{x,qst}$
- effort tranchant quasi-stat. de la dent $Z_{y,qst}$
- force verticale quasi-stat. de la dent $Z_{z,qst}$
- force longitudinale quasi-stat. de la roue $T_{x,qst}$
- force de guidage quasi-stat. de la roue Y_{qst}
- force d'appui quasi-stat. de la roue Q_{qst}
- quotient de déraillement quasi-stat. $Y/Q|_{qst}$
- diminution relative quasi-stat. de la charge des roues $\Delta Q/Q_0|_{qst}$
- montée quasi-stat. de la roue $\Delta z_{R,qst}$

Les résultats de référence doivent être atteints avec une tolérance de $\pm 2\%$ pour les valeurs Q_0 , $\bar{\mu}_{z,y,qst}$ et $\bar{\mu}_{z,z,qst}$ ainsi que de $\pm 5\%$ pour toutes les autres valeurs quasi-statiques (état final du scénario).

4 Stabilité en cas de vent latéral

Si, pour les chemins de fer à adhérence, il faut s'attendre à des conditions de vent latéral déterminantes pour la sécurité lors de l'exploitation, il faut calculer (par simulation) la stabilité du véhicule à homologuer en cas de vent latéral (par ex. sur la base de la directive DB Ril 807.04).

L'exploitant doit extrapoler de ce calcul une limite de vitesse jusqu'à laquelle la sécurité de l'exploitation ferroviaire est garantie.

Pour les chemins de fer à crémaillère, l'étude de l'influence des vents latéraux est un élément essentiel de la preuve de la sécurité au déraillement (SD-C) selon le chap. 3.2.

5 Bibliographie

Terme	Commentaire
Borgeaud, Dr. Gaston (SLM Winterthur)	« Stand- und Entgleisungssicherheit bei Bergbahnen », Schweizer Bauzeitung Jg. 96, Hefte 27/28, 30/31, 32, 35 und 37, 1978 Compléments et corrections dans le cahier 29/1980, ingénieur et architecte suisse
Pribnow, Hans-Hermann (Schindler Waggon Schlieren)	« Zur Entgleisungssicherheit von Zahnradbahn-Fahrzeugen », Eisenbahntechnische Rundschau, cahier 1/2, 1983
Tillmetz, Karl (Stadler Bussnang), Braess, Patrick (Braess Consult)	„Die Helixverwindung – ein kritischer Einflussfaktor bei der Trassierung und Auslegung von Bergbahnen“ Schweizer Eisenbahn-Revue, 12/2020
D RTE 29700	« Ingénierie de système Chemins de fer à crémaillère » Union des transports publics (UTP), 31.03.2010
R RTE 22546	« Conception géométrique de la voie ferrée (écartement métrique) » Union des transports publics (UTP), 15.01.2012
SN EN 14363:2016	« Applications ferroviaires – Essais et simulations en vue de l'homologation des caractéristiques dynamiques des véhicules ferroviaires – Comportement dynamique et essais stationnaires » Comité Européen de Normalisation (CEN), 10.2016
DB Ril 807.04, Modules 0439 et 0433	« Richtlinie Aerodynamik / Seitenwind » Deutsche Bahn AG, 04.2006

6 Annexe

6.1 Abréviations et symboles

Éléments de construction, noms propres

Abréviation	Description
DE-OCF	Dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer (OFT)
AL	Boîte d'essieu
OFT	Office fédéral des transports
DB	Deutsche Bahn AG
EN	Norme européenne
FW	Châssis
MKS	Système multicorps
PF	Suspension primaire
RS	Essieu
RTE	Ouvrage de référence en matière de technique ferroviaire (UTP)
SF	Suspension secondaire
SD-A	Sécurité au déraillement des chemins de fer à adhérence
SD-C	Sécurité au déraillement des chemins de fer à crémaillère
SLM	<i>Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik, Winterthur</i>
SN	Norme suisse
SOK	Niveau supérieur du rail / plan de roulement
TB	Partie du train, en amont
TT	Partie du train, en aval
UTP	Union des transports publics
WK	Caisse
ZOK	Niveau supérieur de la crémaillère

Indices, géométries, rigidités, forces, moments, facteurs et autres valeurs

Symbole	Unité	Description
\square^0		Non suspendu au niveau de la voie
\square^+		Suspension primaire au niveau du châssis
\square^*		Suspension secondaire au niveau de la caisse
\square_0		État initial, à l'arrêt
$2a^+$	[m]	Empattement, primaire
$2a^*$	[m]	Distance entre les pivots des bogies Distance globale du châssis, secondaire/jusqu'à l'articulation
$2b^+$	[m]	Base transversale de la suspension, primaire
$2b^*$	[m]	Base transversale de la suspension, secondaire
a	[m/s ²]	Accélération
a_1^+, a_2^+	[m]	Empattement (asymétrie), par essieu, primaire
a_{K1}, a_{K2}	[m]	Longueur d'accouplement, de l'articulation jusqu'au tampon/attelage
a_{L1}, a_{L2}	[m]	Espace de la caisse (asymétrie), tampon / passerelle d'intercirculation avant arrière
a_q	[m/s ²]	Accélération transversale
b_w	[m]	Écartement des rails
c_t	[Nm/rad]	Rigidité de torsion
c_{tS}^+	[Nm/rad]	Rigidité de torsion, structure du cadre du châssis, autour de l'axe y
c_{tS}^*	[Nm/rad]	Rigidité de torsion, structure de la caisse, autour de l'axe x
$c_{x,AL}^+$	[N/m]	Rigidité de suspension, par boîte d'essieu, primaire longitudinale
$c_{x,SF}^*$	[N/m]	Rigidité de suspension, par côté de caisse, secondaire longitudinale
$c_{y,AL}^+$	[N/m]	Rigidité de suspension, par boîte d'essieu, primaire latérale
$c_{y,SF}^*$	[N/m]	Rigidité de suspension, par côté de caisse, secondaire latérale
$c_{z,AL}^+$	[N/m]	Rigidité de suspension, par boîte d'essieu, primaire verticale

Symbole	Unité	Description
$C_{z,SF}^*$	[N/m]	Rigidité de suspension, par côté de caisse, secondaire verticale
D_n	[m]	Diamètre de la roue, nominal
d_n	[m]	Diamètre (normal) du cercle primitif
$d_{f,e}$	[m]	Diamètre effectif du cercle de pied
$d_{k,e}$	[m]	Diamètre effectif du cercle de tête
$F_{T B}$	[N]	Force de traction force de freinage
g	[-] [%]	Tracé : gauchissement
g_H	[-] [%]	Gauchissement hélicoïdal
g_U	[-] [%]	Gauche du dévers (issu d'une variation du dévers)
g^0	[-] [%]	Gauche de la voie (complet)
g^+	[-] [%]	Gauche (d'essai), primaire (bogie)
Δg^+	[-] [%]	Gauche (d'essai), primaire (dépression)
g^*	[-] [%]	Gauche (d'essai), secondaire (caisse)
h	[m]	Hauteur de la caisse de SOK au sommet du toit
$h_{f,e}$	[m]	Hauteur effective de la ligne de pied au-dessus de SOK
$h_{k,e}$	[m]	Hauteur effective de la ligne de tête au-dessus de SOK
h_n	[m]	Hauteur normale du cercle primitif au-dessus de SOK
J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}	[kgm ²]	Inertie de masse autour des axes x, y, z
k_{R1}, k_{R2}	[-]	Type d'essieu (asymétrie), roues folles (0; 1)
l	[m]	Longueur de la caisse, sans tampon / passerelles d'intercirculation
l_U	[m]	Étude de tracé : longueur de la rampe de dévers
m	[kg]	Masse
m_1^0, m_2^0	[kg]	Masse, non suspendue (asymétrie), par essieu
m^+	[kg]	Masse globale, primaire suspendue, par châssis
m^*	[kg]	Masse globale, secondaire suspendue, par châssis
m_{rot}	[kg]	Masse, rot. (masses en rotation, réduit à d_n ou D_n)
m_{trans}	[kg]	Masse, trans. (inertie de translation, poids)
N	[-] [%]	Tracé : déclivité de la voie
n_{FW}	[-]	Nombre de châssis, par caisse
n_L	[-]	Nombre de lamelles de crémaillère
n_{RS}	[-]	Nombre d'essieux, par châssis
n_Z	[-]	Nombre de dents, par roue dentée (nombre de dents)
p	[m]	Pas de la denture
Q	[N]	Force d'appui des roues
Q_0	[N]	Force statique d'appui des roues
\bar{Q}_0	[N]	Force statique moyenne d'appui des roues de l'essieu
$\Delta Q / \bar{Q}_0$	[-] [%]	Diminution relative de la charge des roues
Δq_0	[-] [%]	Charge des roues statique, relative (déséquilibre de charge)
R	[m]	Tracé : rayon de courbure, projeté au sol
RP	[-]	Profil de rail
S	[m]	Distance du circuit de mesure, essieu
S_m	[m]	Écartement des roues
S_Q	[-]	Facteur de sécurité de la stabilité longitudinale
S_R	[-]	Facteur de sécurité de la sécurité au déraillement
S_w	[m]	Portée roue-rail
T_x	[N]	Force longitudinale de la roue
u	[m]	Étude de tracé : dévers
\ddot{u}_1, \ddot{u}_2	[m]	Passerelle d'intercirculation, milieu du châssis jusqu'au tampon/attelage /articulation
v	[m/s] [km/h]	Vitesse
v_w	[m/s] [km/h]	Vitesse du vent
w	[-] [%]	Effort résistant
WP	[-]	Profil de roue
x	[m]	Position en x (longit.)
x^+	[m]	Position en x (longit.), suspension primaire

Symbole	Unité	Description
x^*	[m]	Position en x (longit.), suspension secondaire
y	[m]	Position en y (transv.)
y^+	[m]	Position en y (transv.), suspension primaire
y^*	[m]	Position en y (transv.), suspension secondaire
Y	[N]	Force de guidage des roues
Y/Q	[-]	Quotient de déraillement
z	[m]	Position en z (vertical)
z^+	[m]	Position en z (vertical), suspension primaire
z^*	[m]	Position en z (vertical), suspension secondaire
z_{K1}, z_{K2}	[m]	Hauteur de couplage
Δz_R	[m]	Montée sur roue
z_S	[m], [m ü. M.]	Tracé : hauteur géographique du point du tronçon
Z_x	[N]	Force longitudinale de la dent (traction/frein)
Z_y	[N]	Force verticale de la dent (guidage par frottement)
Z_z	[N]	Force verticale de la dent (poussée hydrostatique par engrènement et frottement)
α	[rad]	Angle d'attaque entre la roue et le rail
α_n	[rad]	Angle de pression normal (inclinaison des flancs des dents)
β_F	[rad]	Angle des flancs du boudin
μ_F	[-]	Friction des flancs du boudin
μ_T	[-]	Friction de la table de roulement
μ_Z	[-]	Friction du contact de la dent
$\bar{\mu}_{z,y}$	[-]	Friction transversale de la dent, moyennée sur un pas de la denture p (avec indication de la direction ???)
$\bar{\mu}_{z,z}$	[-]	Friction transversale de la dent, moyennée sur un pas de la denture p
ρ_L	[kg/m ³]	Densité de l'air (à partir de z_S)

6.2 Modèle de référence et quatre exemples de cas (scénarios)

6.2.1 Configuration des paramètres

Modèle de base



Description	Remarque	Symbole	Unité	Aval	Amont
				He 4/4	
				1	
				Bogie	Bogie
				2	1

Géométrie principale

Diamètre de roue	nominal	D_n	[m]	0,790	0,790
Empattement	par essieu, primaire.	a_1^+	[m]	1,120	1,120
		a_2^+	[m]	1,520	1,520
Distance entre les pivots des bogies	secondaire/jusqu'à l'articulation	$2a^*$	[m]	5,430	
Caisse	longueur, sans tampons /passerelles d'intercirculation	l	[m]	11,000	
	Espace entre tampon /passerelle d'intercirculation	a_{L1}	[m]	0,765	
		a_{L2}	[m]	0,765	
	hauteur, depuis SOK jusqu'au sommet du toit	h	[m]	3,450	
Type d'essieu	Roues folles (0,1)	k_{R1}	[-]	1	1
		k_{R2}	[-]	1	1

Primaire

Nombre d'essieu	Par châssis	n_{RS}	[-]	2	2
Suspension	Position longitudinale	x^+	[m]	0,000	0,000
	Base transversale	$2b^+$	[m]	1,500	1,500
	Hauteur	z^+	[m]	0,632	0,632
Rigidité de la suspension	Par boîte d'essieu, prim., longit.	$c_{x,AL}^+$	[N/mm]	7000	7000
	Par boîte d'essieu, prim., transv.	$c_{y,AL}^+$	[N/mm]	3500	3500
	Par boîte d'essieu, prim., vert.	$c_{z,AL1}^+$	[N/mm]	1382	1382
		$c_{z,AL2}^+$	[N/mm]	1018	1018
Châssis	Rigidité de torsion	c_{IS}^+	[N/mm]	2000	2000

Secondaire

Nombre de châssis	Par caisse	n_{FW}	[-]	2	
Entraînement longitudinal	Position longitudinale, châssis	$x_{LM,FW}^c$	[m]	-0,400	-0,400
	Position longitudinale, caisse	$x_{LM,WK}^c$	[m]	-0,900	-0,900
	Base transversale (cinématique du mouvement de lacet)	$2b_{LM}^*$	[m]	0,000	0,000
	Hauteur, châssis	$z_{LM,FW}^*$	[m]	0,305	0,305
	Hauteur, caisse	$z_{LM,WK}^*$	[m]	0,305	0,305
Rigidité de l'entraînement longitudinal	Par châssis, sec., longit.	$c_{x,LM}^*$	[N/mm]	10 000	10 000
Suspension	Position longitudinale	x^*	[m]	0,000	0,000
	Base transversale	$2b^*$	[m]	1,500	1,500
	Hauteur	z^*	[m]	0,768	0,768
Rigidité de la suspension	Par côté du châssis, sec., longit.	$c_{x,SF}^*$	[N/mm]	200	200
	Par côté du châssis, sec., transv.	$c_{y,SF}^*$	[N/mm]	400	400
	Par côté du châssis, sec., vertical	$c_{z,SF}^*$	[N/mm]	4800	4800
Caisse	Rigidité de torsion	c_{tS}^*	[N/mm]	10 000	

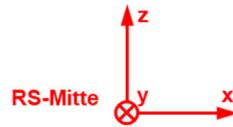
Masse

Masse	Châssis : non suspendu, par essieu, prim.	$m_{FW,1}^0$	[kg]	2170	2170
		$m_{FW,2}^0$	[kg]	2170	2170
	Châssis : primaire suspendu par châssis	m_{FW}^+	[kg]	3141	3141
	Châssis : secondaire suspendu par châssis	m_{FW}^+	[kg]	0	0
	Caisse : secondaire suspendu par caisse	m_{WK}^+	[kg]	17 040	
Centre de gravité	Châssis : non suspendu par châssis	$x_{SP,FW}^0$	[m]	-0,200	-0,200
		$y_{SP,FW}^0$	[m]	0,000	0,000
		$z_{SP,FW}^0$	[m]	0,395	0,395
	Châssis : primaire suspendu par châssis	$x_{SP,FW}^+$	[m]	-0,199	-0,199
		$y_{SP,FW}^+$	[m]	0,005	0,005
		$z_{SP,FW}^+$	[m]	0,501	0,501
	Châssis : secondaire suspendu par châssis	$x_{SP,FW}^*$	[m]	0,000	0,000
		$y_{SP,FW}^*$	[m]	0,000	0,000
		$z_{SP,FW}^*$	[m]	0,711	0,711
	Caisse : secondaire suspendu par caisse	$x_{SP,WK}^*$	[m]	0,059	
		$y_{SP,WK}^*$	[m]	0,016	
		$z_{SP,WK}^*$	[m]	1,492	

Contact roue-rail

Rail	Profil	RP	[-]	EN 13674 46E1	
	Déclivité du montage	$1: i$	[-]	20	
	Portée	s_w	[mm]	1064,0	
	Écartement des rails	b_w	[mm]	1000,0	
Roue	Profil	WP	[-]	RTE 29500 Typ A h28 e27	
	Distance du circuit de mesure	S	[mm]	1050,0	
	Écartement des roues	S_m	[mm]	990,0	
Friction	Table de roulement	μ_T	[-]	0,300	
	Flancs du boudin	μ_F	[-]	0,150	

Transmission



Description	Remarque	Symbole	Unité	Aval		Amont	
				He 4/4			
				1			
				DG		DG	
				2		1	

Contact roue dentée–crémaillère

Crémaillère	Nombre de lamelles	n_L	[-]	1			
	Pas de la denture	p	[mm]	100			
	Angle d'engrènement normal (inclinaison des flancs des dents)	α_n	[rad]	0,245			
	Hauteur de la ligne primitive au-dessus de SOK	h_n	[mm]	66,500			
	Hauteur effective de la ligne de tête au-dessus de SOK	$h_{k,e}$	[mm]	86,000			
	Hauteur effective de la ligne de pied au-dessus de SOK	$h_{f,e}$	[mm]	47,000			
Friction	Roue dentée-crémaillère	μ_z	[-]	0,150			

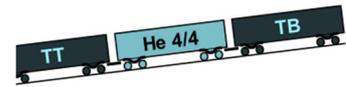
Ensemble

moteur et réducteur

Boîtier du moteur (moteur à suspension sur nez)	Masse	m	[kg]	961,7	961,7	961,7	961,7
Bras de couple	Point de fixation châssis	x	[mm]	1154	-1154	1154	-1154
		y	[mm]	0	0	0	0
		z	[mm]	273	273	273	273
	Point de fixation moteur	x	[mm]	1154	-1154	1154	-1154
		y	[mm]	0	0	0	0
		z	[mm]	73	73	73	73
Moteur stator	Masse	m	[kg]	386,7	386,7	386,7	386,7
rotor	Masse	m	[kg]	193,3	193,3	193,3	193,3
	Inertie de masse	J_{yy}	[kgm ²]	1,750	1,750	1,750	1,750
	Point de fixation	x	[mm]	834	-834	834	-834
		y	[mm]	256	-256	256	-256
z		[mm]	0	0	0	0	
Arbre 0	Masse	m	[kg]	113,7	113,7	113,7	113,7
	Inertie de masse	J_{yy}	[kgm ²]	2,502	2,502	2,502	2,502
Roue dentée 1	Point de fixation	x	[mm]	834	-834	834	-834
		y	[mm]	-303	303	-303	303
		z	[mm]	0	0	0	0
	Nombre de dents	n_z	[-]	21	21	21	21
Arbre 1	Masse	m	[kg]	24,2	24,2	24,2	24,2
	Inertie de masse	J_{yy}	[kgm ²]	0,163	0,163	0,163	0,163
Roue dentée 2	Point de fixation	x	[mm]	647,277	-647,277	647,277	-647,277
		y	[mm]	-303	303	-303	303
		z	[mm]	-21.872	-21.872	-21.872	-21.872
	Nombre de dents	n_z	[-]	50	50	50	50
Arbre 2	Masse	m	[kg]	56,7	56,7	56,7	56,7
	Inertie de masse	J_{yy}	[kgm ²]	0,718	0,718	0,718	0,718
Roue dentée 4	Point de fixation	x	[mm]	317	-317	317	-317

		y	[mm]	-303	303	-303	303
		z	[mm]	0	0	0	0
	Nombre de dents	n_z	[-]	76	76	76	76
Roue dentée 7 (Z)	Point de fixation	x	[mm]	317	-317	317	-317
		y	[mm]	-210	210	-210	210
		z	[mm]	0	0	0	0
	Nombre de dents	n_z	[-]	24	24	24	24
Essieu (roues)	Masse	m	[kg]	386.8	386.8	386.8	386.8
	Inertie de masse	J_{yy}	[kgm ²]	35.202	35.202	35.202	35.202
Arbre 4 (Z)	Masse	m	[kg]	599.1	599.1	599.1	599.1
	Inertie de masse	J_{yy}	[kgm ²]	11.305	11.305	11.305	11.305
Roue dentée 8	Point de fixation	x	[mm]	0	0	0	0
		y	[mm]	-210	210	-210	210
		z	[mm]	0	0	0	0
	Nombre de dents	n_z	[-]	100	100	100	100
Suspension tangentielle	Rigidité de torsion	c_t	[kNm/rad]	473.7	473.7	473.7	473.7
Arbre de la roue dentée	Masse	m	[kg]	85.8	85.8	85.8	85.8
	Inertie de masse	J_{yy}	[kgm ²]	6.705	6.705	6.705	6.705
Roue dentée	Point de fixation	x	[mm]	0	0	0	0
		y	[mm]	0	0	0	0
		z	[mm]	0	0	0	0
	Diamètre du cercle primitif	d_n	[mm]	636.620	636.620	636.620	636.620
	Diamètre effectif de la tête	$d_{k,e}$	[mm]	696.823	696.823	696.823	696.823
	Diamètre effectif du pied	$d_{f,e}$	[mm]	617.612	617.612	617.612	617.612
	Nombre de dents	n_z	[-]	20	20	20	20

Scénarios



Description	Remarque	Symbole	Unité	Aval			Mont		
				TT	He 4/4		TB		
					2	DG		DG	1
					1				
						2	1		

Scénario 1

				Solo			
Géométrie du véhicule	Distance entre les pivots des bogies distance totale entre les bogie	$2a^*$	[m]	0,000	5,430		0,000
	Porte-à-faux du véhicule	\ddot{u}	[m]	0,000	3,750	3,350	0,000
	Longueur d'attelage	a_K	[m]	0,000	1,000	1,000	0,000
	Hauteur d'attelage	z_K	[m]	0,000	0,500	0,500	0,000
Masse du véhicule	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0,0	32 000,0		0,0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0,0	40 536,1		0,0
Traction/freins	Effort résistant	w	[-]	0,000	0,008		0,000
	Force de freinage des roues, par essieu caisse	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]		0	0	
	Force de traction du moteur, par essieu caisse	F_{TM1}	[N]	0	0	0	0
		F_{TM2}	[N]		0	0	
Force de freinage du moteur, par essieu caisse	F_{BG1}	[N]	0	150 000	75 000	0	
	F_{BG2}	[N]		150 000	150 000		
Course + tronçon	Rayon de courbure	R	[m]	-80			
	Dévers	u	[mm]	-30			
	Déclivité de la voie	N	[‰]	230			
	Vitesse	v	[km/h]	-3,6			
Vent latéral	Vitesse du vent	v_W	[km/h]	0,0			
	Densité de l'air	ρ_L	[kg/m ³]	0,000			

Scénario 2

				Solo (+vent)			
Géométrie du véhicule	Distance entre les pivots des bogies distance totale du bogie	$2a^*$	[m]	0,000	5,430		0,000
	Porte-à-faux du véhicule	\ddot{u}	[m]	0,000	3,750	3,350	0,000
	Longueur d'attelage	a_K	[m]	0,000	1,000	1,000	0,000
	Hauteur d'attelage	z_K	[m]	0,000	0,500	0,500	0,000
Masse du véhicule	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0,0	32 000,0		0,0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0,0	40 536,1		0,0
Traction/freins	Effort résistant	w	[-]	0,000	0,008		0,000
	Force de freinage des roues, par essieu caisse	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]		0	0	
	Force de traction du moteur, par essieu caisse	F_{TM1}	[N]	0	0	0	0
		F_{TM2}	[N]		0	0	
Force de freinage du moteur, par essieu caisse	F_{BG1}	[N]	0	150 000	75 000	0	
	F_{BG2}	[N]		150 000	150 000		
Course + tronçon	Rayon de courbure	R	[m]	-80			
	Dévers	u	[mm]	-30			
	Déclivité de la voie	N	[‰]	230			
	Vitesse	v	[km/h]	-3,6			
Vent latéral	Vitesse du vent	v_W	[km/h]	-50,0			

	Densité de l'air	ρ_L		1,200
--	------------------	----------	--	-------

Description	Remarque	Symbole	Unité	Aval		Mont	
				2	He 4/4		1
					DG	DG	
					2	1	

Scénario 3

Composition (+TB non freiné)

Géométrie du véhicule	Distance entre les pivots des bogies distance totale du bogie	$2a^*$	[m]	0,000	5,430		5,430
	Porte-à-faux du véhicule	\ddot{u}	[m]	0,000	3,750	3,350	3,750
	Longueur d'attelage	a_K	[m]	0,000	1,000	1,000	1,000
	Hauteur d'attelage	z_K	[m]	0,000	0,500	0,500	0,500
Masse du véhicule	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0,0	32 000,0		32 000,0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0,0	40 536,1		40 536,1
Traction/freins	Effort résistant	w	[-]	0,000	0,008		0,008
	Force de freinage des roues, par essieu caisse	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]	0	0	0	0
	Force de traction du moteur, par essieu caisse	F_{TM1}	[N]	0	0	0	0
		F_{TM2}	[N]	0	0	0	0
	Force de freinage du moteur, par essieu caisse	F_{BG1}	[N]	0	150 000	75 000	0
F_{BG2}		[N]	0	150 000	150 000	0	
Course + tronçon	Rayon de courbure	R	[m]	-80			
	Dévers	u	[mm]	-30			
	Déclivité de la voie	N	[‰]	230			
	Vitesse	v	[km/h]	-3,6			
Vent latéral	Vitesse du vent	v_W	[km/h]	0,0			
	Densité de l'air	ρ_L	[kg/m ³]	0,000			

Scénario 4

Composition (+TB non freiné, +vent)

Géométrie du véhicule	Distance entre les pivots des bogies distance totale du bogie	$2a^*$	[m]	0,000	5,430		5,430
	Porte-à-faux du véhicule	\ddot{u}	[m]	0,000	3,750	3,350	3,750
	Longueur d'attelage	a_K	[m]	0,000	1,000	1,000	1,000
	Hauteur d'attelage	z_K	[m]	0,000	0,500	0,500	0,500
Masse du véhicule	Masse, trans.	m_{trans}	[kg]	0,0	32 000,0		32 000,0
	Masse, rot.	m_{rot}	[kg]	0,0	40 536,1		40 536,1
Traction/freins	Effort résistant	w	[-]	0,000	0,008		0,008
	Force de freinage des roues, par essieu caisse	F_{BR1}	[N]	0	0	0	0
		F_{BR2}	[N]	0	0	0	0
	Force de traction du moteur, par essieu caisse	F_{TM1}	[N]	0	0	0	200 000
		F_{TM2}	[N]	0	0	0	0
	Force de freinage du moteur, par essieu caisse	F_{BG1}	[N]	0	150 000	75 000	0
F_{BG2}		[N]	0	150 000	150 000	0	
Course + tronçon	Rayon de courbure	R	[m]	-80			
	Dévers	u	[mm]	-30			
	Déclivité de la voie	N	[‰]	230			
	Vitesse	v	[km/h]	-3,6			
Vent latéral	Vitesse du vent	v_W	[km/h]	-50,0			
	Densité de l'air	ρ_L	[kg/m ³]	1,200			

6.2.2 Résultats de référence



Description	Symbole	Unité	Aval								Amont	
			He 4/4									
			DG 2				DG 1					
			RS 2		RS 1		RS 2		RS 1			
l	r	l	r	l	r	l	r	l	r			

Scénario 1

Solo

État initial		Q_0		36,609	34,749	42,321	41,452	37,385	35,525	43,374	42,505
$R = u = N = v = a = v_w = F_{T B} = 0$		ΔQ_0		-2,6%		-1,0%		-2,6%		-1,0%	
Contact de la crémaillère	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$			-0,050		0,035		-0,050		0,035	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$			0,070		0,073		0,076		0,068	
Forces de la crémaillère	$Z_{x,qst}$			87,774		87,758		87,771		12,507	
	$Z_{y,qst}$			-4,367		3,042		-4,349		0,435	
	$Z_{z,qst}$			28,611		28,895		29,128		4,046	
Fatigue de la voie	$T_{x,qst}$			-0,548	-0,152	-0,451	-0,607	-0,585	-0,485	-0,442	-0,685
	Y_{qst}			-9,298	17,060	-16,461	9,254	-7,365	6,858	-1,577	1,676
	Q_{qst}			26,164	46,919	25,957	26,044	20,763	19,848	44,421	5,170
Sécurité au déraillement	$Y/Q _{qst}$			-0,355	0,364	-0,634	0,355	-0,355	0,346	-0,035	0,324
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$			-0,267	0,315	-0,380	-0,378	-0,430	-0,456	0,034	-0,880
	$\Delta z_{R,qst}$			-0,281	0,281	0,318	-0,282	-0,274	0,304	0,294	-0,252

Scénario 2

Solo (+vent)

État initial		Q_0		36,609	34,749	42,321	41,452	37,385	35,525	43,374	42,505
$R = u = N = v = a = v_w = F_{T B} = 0$		ΔQ_0		-2,6%		-1,0%		-2,6%		-1,0%	
Contact de la crémaillère	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$			-0,050		0,035		-0,050		0,035	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$			0,070		0,073		0,076		0,068	
Forces de la crémaillère	$Z_{x,qst}$			87,775		87,759		87,773		12,507	
	$Z_{y,qst}$			-4,367		3,042		-4,350		0,435	
	$Z_{z,qst}$			28,612		28,895		29,125		4,047	
Fatigue de la voie	$T_{x,qst}$			-0,541	-0,168	-0,438	-0,613	-0,565	-0,509	-0,429	-0,692
	Y_{qst}			-9,709	16,462	-17,118	8,694	-8,617	7,173	-2,179	1,047
	Q_{qst}			27,313	45,732	27,461	24,480	24,261	16,320	45,949	3,649
Sécurité au déraillement	$Y/Q _{qst}$			-0,355	0,360	-0,623	0,355	-0,355	0,440	-0,047	0,287
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$			-0,234	0,282	-0,344	-0,416	-0,335	-0,552	0,070	-0,915
	$\Delta z_{R,qst}$			-0,282	0,282	0,316	-0,280	-0,277	0,308	0,293	-0,249

Description	Symbole	é	Aval				Amont			
			He 4/4							
			DG 2				DG 1			
			RS 2		RS 1		RS 2		RS 1	
l	r	l	r	l	r	l	r			

Scénario 3**Composition (+TB non freiné)**

État initial	Q_0		36,609	34,749	42,321	41,452	37,385	35,525	43,374	42,505
$R = u = N = v = a = v_w = F_{T B} = 0$	Δq_0		-2,6%		-1,0%		-2,6%		-1,0%	
Contact de la crémaillère	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$		-0,050		0,035		-0,043		0,043	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$		0,071		0,073		0,076		0,070	
Forces de la crémaillère	$Z_{x,qst}$		123,701		123,685		123,689		48,489	
	$Z_{y,qst}$		-6,153		4,288		-5,278		2,072	
	$Z_{z,qst}$		40,378		40,706		41,141		15,770	
Fatigue de la voie	$T_{x,qst}$		-0,148	0,169	-0,077	-0,248	-0,248	-0,035	-0,185	-0,175
	Y_{qst}		-9,133	14,652	-17,846	4,968	-4,286	17,311	5,463	9,957
	Q_{qst}		25,629	40,282	19,222	13,963	12,055	22,555	22,103	9,330
Sécurité au déraillement	$Y/Q _{qst}$		-0,356	0,364	-0,928	0,356	-0,356	0,767	0,247	1,067
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$		-0,282	0,129	-0,541	-0,667	-0,669	-0,381	-0,485	-0,783
	$\Delta z_{R,qst}$		-0,280	0,286	0,326	-0,267	-0,265	0,312	-0,269	0,320

Scénario 4**Composition (+TB freiné, +vent)**

État initial	Q_0		36,609	34,749	42,321	41,452	37,385	35,525	43,374	42,505
$R = u = N = v = a = v_w = F_{T B} = 0$	Δq_0		-2,6%		-1,0%		-2,6%		-1,0%	
Contact de la crémaillère	$\bar{\mu}_{z,y,qst}$		-0,050		0,035		-0,050		0,035	
	$\bar{\mu}_{z,z,qst}$		0,071		0,073		0,076		0,068	
Forces de la crémaillère	$Z_{x,qst}$		109,787		109,771		109,784		34,665	
	$Z_{y,qst}$		-5,461		3,806		-5,439		1,206	
	$Z_{z,qst}$		35,819		36,131		36,437		11,217	
Fatigue de la voie	$T_{x,qst}$		-0,297	0,047	-0,215	-0,388	-0,343	-0,208	-0,288	-0,440
	Y_{qst}		-9,365	15,967	-17,225	6,291	-6,962	11,922	4,662	1,214
	Q_{qst}		26,301	42,309	22,656	17,700	19,573	17,542	34,827	3,677
Sécurité au déraillement	$Y/Q _{qst}$		-0,356	0,377	-0,760	0,355	-0,356	0,680	0,134	0,330
	$\Delta Q/\bar{Q}_0 _{qst}$		-0,263	0,186	-0,459	-0,577	-0,463	-0,519	-0,189	-0,914
	$\Delta z_{R,qst}$		-0,281	0,284	0,322	-0,272	-0,273	0,310	0,299	-0,248