

---

---

**Applications ferroviaires — Calcul  
des performances de freinage  
(freinage d'arrêt, de ralentissement et  
d'immobilisation) —**

Partie 2:

**Algorithmes généraux utilisant le  
calcul pas à pas**

**(standards.iteh.ai)**

*Railway applications — Calculation of braking performance  
(stopping, slowing and stationary braking) —*

*Part 2: General algorithms utilizing step by step calculation*

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c994f9a0-da7d-4383-beed-2526f877efb4/iso-20138-2-2019>



**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO 20138-2:2019

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c99df9a0-da3d-4383-beed-2526f877efb4/iso-20138-2-2019>



**DOCUMENT PROTÉGÉ PAR COPYRIGHT**

© ISO 2019

Tous droits réservés. Sauf prescription différente ou nécessité dans le contexte de sa mise en œuvre, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie, ou la diffusion sur l'internet ou sur un intranet, sans autorisation écrite préalable. Une autorisation peut être demandée à l'ISO à l'adresse ci-après ou au comité membre de l'ISO dans le pays du demandeur.

ISO copyright office  
Case postale 401 • Ch. de Blandonnet 8  
CH-1214 Vernier, Genève  
Tél.: +41 22 749 01 11  
Fax: +41 22 749 09 47  
E-mail: [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web: [www.iso.org](http://www.iso.org)

Publié en Suisse

## Sommaire

Page

Avant-propos.....	iv
Introduction.....	v
<b>1</b> <b>Domaine d'application</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b> <b>Références normatives</b> .....	<b>1</b>
<b>3</b> <b>Termes et définitions</b> .....	<b>1</b>
<b>4</b> <b>Symboles</b> .....	<b>2</b>
<b>5</b> <b>Description générale du calcul pas à pas</b> .....	<b>3</b>
5.1    Méthode.....	3
5.2    Modèles d'efforts retardateurs.....	3
5.3    Algorithme.....	4
5.3.1    Description générale.....	4
5.3.2    Intégration par intervalle de temps.....	4
5.3.3    Détermination des intervalles de temps /écart relatif sur la distance $\xi$ .....	6
5.3.4    Temps de réponse équivalent du système $t_e$ .....	7
5.4    Calculs dynamiques complémentaires.....	7
5.4.1    Énergie dissipée par les différents types d'équipements de frein.....	7
5.4.2    Valeur de l'adhérence roue-rail instantanée requise pour les essieux freinés ( $\tau_{ax}$ ).....	8
5.4.3    Puissance de freinage maximale de chaque type d'équipement de frein.....	8
<b>6</b> <b>Considérations relatives aux distances d'arrêt/ralentissement et aux calculs de décélération</b> .....	<b>9</b>
6.1    Précision des valeurs d'entrée.....	9
6.2    Calcul des distances.....	9
6.3    Caractéristiques générales.....	9
6.4    Caractéristiques des types d'équipement de frein.....	9
6.4.1    Généralités.....	9
6.4.2    Données d'entrée.....	10
6.5    Caractéristiques initiales et d'exploitation.....	10
6.5.1    Conditions nominales.....	10
6.5.2    Diamètre de roue.....	10
6.5.3    Vitesse initiale.....	10
6.5.4    Déclivité de la voie.....	10
6.5.5    Niveau de demande de freinage.....	10
6.5.6    Mode dégradé.....	10
6.5.7    Conditions dégradées.....	10
6.5.8    Coefficient d'adhérence roue-rail disponible.....	11
6.6    Autres calculs de la décélération.....	11
6.6.1    Généralités.....	11
6.6.2    Décélération dues aux efforts générés par chaque type d'équipement de frein ( $a_{j,n}$ ).....	11
6.6.3    Décélération équivalente (moyenne) ( $a_e$ ) basée sur la distance.....	11
<b>7</b> <b>Calcul pour de freinage d'immobilisation</b> .....	<b>12</b>
<b>Annexe A (normative) Diagramme des calculs cinématiques</b> .....	<b>13</b>
<b>Annexe B (informative) Calcul des efforts retardateurs (non statiques)</b> .....	<b>14</b>
<b>Annexe C (informative) Exemples de calculs de freinage</b> .....	<b>19</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>34</b>

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (IEC) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les procédures utilisées pour élaborer le présent document et celles destinées à sa mise à jour sont décrites dans les Directives ISO/IEC, Partie 1. Il convient, en particulier, de prendre note des différents critères d'approbation requis pour les différents types de documents ISO. Le présent document a été rédigé conformément aux règles de rédaction données dans les Directives ISO/IEC, Partie 2 (voir [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives)).

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. L'ISO ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence. Les détails concernant les références aux droits de propriété intellectuelle ou autres droits analogues identifiés lors de l'élaboration du document sont indiqués dans l'Introduction et/ou dans la liste des déclarations de brevets reçues par l'ISO (voir [www.iso.org/brevets](http://www.iso.org/brevets)).

Les appellations commerciales éventuellement mentionnées dans le présent document sont données pour information, par souci de commodité, à l'intention des utilisateurs et ne sauraient constituer un engagement.

Pour une explication de la nature volontaire des normes, la signification des termes et expressions spécifiques de l'ISO liés à l'évaluation de la conformité, ou pour toute information au sujet de l'adhésion de l'ISO aux principes de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) concernant les obstacles techniques au commerce (OTC), voir [www.iso.org/avant-propos](http://www.iso.org/avant-propos).

Le présent document a été élaboré par le comité technique ISO/TC 269, *Application ferroviaires*, sous-comité SC 2, *Matériel roulant*.

Une liste de toutes les parties de la série ISO 20138 se trouve sur le site web de l'ISO.

Il convient que l'utilisateur adresse tout retour d'information ou toute question concernant le présent document à l'organisme national de normalisation de son pays. Une liste exhaustive desdits organismes se trouve à l'adresse [www.iso.org/fr/members.html](http://www.iso.org/fr/members.html).

## Introduction

Le présent document décrit les méthodologies de calcul des performances de freinage telles que la distance d'arrêt, la décélération, la puissance et l'énergie pour le matériel roulant ferroviaire.

Le présent document vise à permettre à l'industrie et aux exploitants ferroviaires d'utiliser des méthodes de calcul communes.

La série ISO 20138 est composée de deux parties complémentaires (l'ISO 20138-1 et le présent document).

Le présent document décrit les méthodes de calcul pas à pas destinées aux applications ferroviaires dans tous les pays. En outre, les algorithmes permettent de comparer les résultats obtenus avec d'autres méthodes de calcul des performances de freinage.

La méthode de calcul pas à pas repose sur une intégration numérique par intervalle de temps.

La méthode de calcul pas à pas ne peut pas être utilisée pour le freinage d'immobilisation. Le présent document traite néanmoins un exemple de freinage d'immobilisation pour une rame automotrice, conforme à l'ISO 20138-1.

Lors du calcul des distances d'arrêt et de ralentissement à l'aide de la méthode de calcul pas à pas, il est prévu d'utiliser conjointement la norme ISO 20138-1 et le présent document.

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO 20138-2:2019

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c99df9a0-da3d-4383-beed-2526f877efb4/iso-20138-2-2019>

**iTeh STANDARD PREVIEW**  
**(standards.iteh.ai)**

ISO 20138-2:2019

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c99df9a0-da3d-4383-beed-2526f877efb4/iso-20138-2-2019>

# Applications ferroviaires — Calcul des performances de freinage (freinage d'arrêt, de ralentissement et d'immobilisation) —

## Partie 2: Algorithmes généraux utilisant le calcul pas à pas

### 1 Domaine d'application

Le présent document décrit les méthodologies de calcul des performances de freinage du matériel roulant ferroviaire.

Le présent document décrit les algorithmes et formules généraux qui utilisent des valeurs instantanées comme valeurs d'entrée pour effectuer les calculs de dimensionnement des équipements de frein et les performances de freinage, en termes de distances d'arrêt et de ralentissement, de puissance et d'énergie de freinage pour tous les types de matériels roulants, qu'il s'agisse de véhicules ou de rames.

Les calculs peuvent être effectués à n'importe quelle étape du processus d'évaluation (conception, fabrication, essais, vérification, investigation, etc.) du matériel roulant ferroviaire. Le présent document ne spécifie pas les critères d'acceptation spécifiques (réussite/échec).

Le présent document n'est pas destiné à servir de guide de conception pour le choix des systèmes de freinage et ne spécifie pas les exigences de performances. Le présent document ne spécifie pas de méthode pour calculer l'allongement des distances d'arrêt en cas de dégradation du niveau d'adhérence disponible (phénomène d'enrayage).

Le présent document donne des exemples de calcul des efforts de freinage pour les différents types d'équipements de frein, ainsi que des exemples de la distance d'arrêt propre à un véhicule isolé ou à une composition de train.

### 2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 20138-1:2018, *Applications ferroviaires — Calcul des performances de freinage (freinage d'arrêt, de ralentissement et d'immobilisation) — Partie 1: Algorithmes généraux utilisant le calcul par la valeur moyenne*

### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'ISO 20138-1 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

**3.1 distance de ralentissement**

$s$   
distance parcourue entre la consigne de freinage initiale et le moment où la vitesse finale  $v_{fin}$  est atteinte

Note 1 à l'article: Lorsque la vitesse finale  $v_{fin} = 0$  m/s, la distance de ralentissement est également appelée «distance d'arrêt».

**3.2 temps de ralentissement**

$t$   
temps écoulé entre la consigne de freinage initiale et le moment où la vitesse finale  $v_{fin}$  est atteinte

Note 1 à l'article: Lorsque la vitesse finale  $v_{fin} = 0$  m/s, le temps de ralentissement est également appelé «temps d'arrêt».

**4 Symboles**

Pour le besoin du présent document, les symboles généraux donnés dans le [Tableau 1](#) du présent document ainsi que dans l'ISO 20138-1:2018, Tableau 1 s'appliquent.

**Tableau 1 — Symboles**

Symbole	Définition	Unité
$a$	Décélération instantanée du véhicule/de la rame	m/s <sup>2</sup>
$a_{f(t) = 100 \%}$	Décélération pour chaque intervalle de temps choisi	m/s <sup>2</sup>
$a_j$	Décélération constante pendant le pas d'itération $j$	m/s <sup>2</sup>
$D_{max}$	Diamètre max. de la roue	m
$D_{min}$	Diamètre min. de la roue	m
$F_{B,ax,st}$	Effort de freinage d'immobilisation sur un essieu donné	N
$F_{pad,i}$	Effort agissant sur une (seule) face de disque ( $i$ est un indice utilisé pour le classement)	N
$F_{r,n}$	Effort retardateur instantané du type d'équipement de frein $n$	N
$F_{r,n,j}$	Effort retardateur instantané du type d'équipement de frein $n$ au pendant le pas d'itération $j$	N
$F_{r,nom}$	Effort retardateur nominal	N
$f(t)$	Facteur dépendant du temps	—
$f(t) = 100 \%$	Indice correspondant à un effort de freinage appliqué à 100 % sans tenir compte des caractéristiques temporelles	—
$f(v)$	Facteur dépendant de la vitesse	—
$f(x)$	Facteur (caractéristique commune) dépendant d'une autre variable $x$	—
$i_{tra}$	Rapport d'amplification de la transmission	—
$j$	Numéro d'itération	—
$P_n$	Puissance de freinage instantanée du type d'équipement de frein $n$	W
$s_j$	Distance parcourue entre la commande de freinage à l'instant $t_0$ et l'instant $t_j$	m
$s_{n,j}$	Distance parcourue pendant l'intervalle d'itération $j$ avec le type d'équipement de frein $n$ appliqué	m
$s_{ref}(\Delta t)$	Distance d'arrêt/de ralentissement calculée pour un intervalle de temps $\Delta t$	m
$s_{comp}(2 \cdot \Delta t)$	Distance d'arrêt/de ralentissement calculée pour deux fois l'intervalle de temps ( $2 \cdot \Delta t$ )	m
$s_{f(t) = 100 \%}$	Distance de freinage, sans tenir compte d'aucune caractéristique temporelle, entre la vitesse initiale $v_0$ et la vitesse finale $v_{fin}$	m
$t$	Temps de ralentissement/Temps d'arrêt	s



Tableau 1 (suite)

Symbole	Définition	Unité
$t_j$	Temps écoulé entre la commande de freinage et le pas d'itération $j$	s
$\Delta t$	Intervalle de temps	s
$v$	Vitesse actuelle	m/s
$v_j$	Vitesse au temps $t_j$	m/s
$v_{1,ECB}$	Vitesse de désactivation du frein à courants de Foucault	m/s
$\varepsilon$	Ecart de vitesse par rapport à $v_{fin}$	m/s
$\mu$	Coefficient de friction (garniture ou semelle de frein)	—
$\xi$	Ecart relatif sur la distance	%
$\tau_{ax}$	Valeur de l'adhérence roue-rail instantanée sollicitée pour les essieux freinés	—
$\tau_{req}$	Adhérence roue-rail requise	—

## 5 Description générale du calcul pas à pas

### 5.1 Méthode

La méthode pas à pas est utilisée lorsqu'il n'est ni approprié, ni souhaitable de représenter les efforts retardateurs et les efforts de freinage non constants sous forme de valeurs moyennes. Pour plus d'informations sur les cas où il est pertinent de recourir à des calculs en valeurs moyennes, consulter l'ISO 20138-1.

Les intervalles de temps sont définis de sorte que les efforts de freinage peuvent être considérés comme constants sur toute la durée de chaque intervalle. La durée de chaque intervalle de temps dépend des variations de l'effort de freinage, et n'est pas nécessairement fixe (c'est-à-dire que les algorithmes peuvent reposer sur des méthodes d'intégration utilisant des intervalles de temps constants ou évolutifs). Chaque intervalle de temps se caractérise par un état initial et un état final, par exemple une vitesse initiale et une vitesse finale.

Pour chaque intervalle de temps, la distance parcourue, ainsi que la vitesse finale, sont calculées et la décélération à la fin dudit intervalle de temps est calculée conformément aux lois de Newton. Les résultats des calculs pour chaque intervalle de temps sont utilisés comme données d'entrée pour les calculs de l'intervalle de temps suivant.

Les calculs doivent être réalisés conformément au diagramme des calculs cinématiques de l'[Annexe A](#).

### 5.2 Modèles d'efforts retardateurs

Les modèles mathématiques correspondant aux systèmes de freinage classiques (p. ex.: freins électromagnétiques, freins électrodynamiques, etc.) sont décrits dans l'[Annexe B](#). Les modèles mathématiques correspondant aux freins à disques, aux freins à semelles et aux efforts retardateurs externes (p. ex.: efforts exercés par le vent, résistance à l'avancement) sont décrits dans l'ISO 20138-1.

L'influence du temps, de la vitesse, de la charge, de la température, etc., sur l'effort retardateur nominal peut également être exprimée par des facteurs sans dimension (fonctions), par exemple variables en fonction du temps  $f(t)$  ou de la vitesse  $f(v)$ . De cette manière, toute caractéristique des efforts de décélération dus à l'application d'un système de freinage ou à l'action d'efforts externes (p. ex.: vent) peut être modélisée.

Ces facteurs sans dimensions peuvent s'appliquer simultanément et sont donc combinables par multiplication, comme indiqué dans la [Formule \(1\)](#).

$$F_r = F_{r,nom} \cdot f(t) \cdot f(v) \cdot \dots \cdot f(x) \quad (1)$$

où

$F_r$  est l'effort retardateur instantané, produit par l'équipement de frein et ramené au niveau du rail, en Newton;

$F_{r,nom}$  est l'effort retardateur nominal, en Newton;

$f(t)$  est le facteur dépendant du temps;

$f(v)$  est le facteur dépendant de la vitesse;

$f(x)$  est le facteur (caractéristique commune) dépendant d'une autre variable  $x$ .

NOTE Pour l'effort retardateur nominal  $F_{r,nom}$ , les facteurs  $f(t)$ ,  $f(v)$  et  $f(x)$  correspondent à 1.

## 5.3 Algorithme

### 5.3.1 Description générale

Les valeurs instantanées constituent les données d'entrée du calcul pas à pas (itératif). Le diagramme des calculs cinématiques de la [Figure A.1](#) doit être utilisé pour le calcul d'arrêts et de ralentissements.

L'intégration numérique est fonction du temps.

Tout calcul commence avec la consigne de freinage initiale et la vitesse initiale du véhicule/de la rame.

Le premier intervalle de temps commence à  $t_0 = 0$  s, moment de la consigne de freinage. Les efforts de freinage exercés au cours de l'intervalle de temps initial sont calculés.

Le résultat du premier pas d'itération se réfère à  $j = 1$ , c'est-à-dire  $v_1 = v_0 - a_0 \Delta t$ , alors que les valeurs initiales (par exemple la vitesse initiale) se réfèrent à l'indice  $j = 0$ .

La vitesse du véhicule/de la rame à la fin de l'intervalle de temps, ainsi que la distance parcourue pendant cet intervalle de temps, sont calculés.

La valeur du paramètre sélectionné (p. ex.: vitesse, distance) à la fin de l'intervalle de temps est comparée à la valeur cible.

Si la valeur cible n'est pas atteinte, les calculs sont répétés pour l'intervalle de temps suivant.

Le calcul pas à pas de temps se poursuit jusqu'à ce que la valeur cible soit atteinte.

### 5.3.2 Intégration par intervalle de temps

Il convient que l'intégration par intervalle de temps se poursuive jusqu'à ce que la valeur calculée du paramètre sélectionné (p. ex.: la vitesse) soit considérée comme égale à la valeur cible de ce paramètre, c'est-à-dire jusqu'à ce que la condition donnée dans la [Formule \(2\)](#) soit remplie (où la vitesse est utilisée comme paramètre sélectionné à titre d'exemple):

$$|v_j - v_{\text{fin}}| < \varepsilon \quad (2)$$

où

- $v_j$  est la vitesse au temps  $t_j$ , en mètre par seconde;  
 $v_{\text{fin}}$  est la vitesse finale, en mètre par seconde;  
 $\varepsilon$  est l'écart de vitesse par rapport à  $v_{\text{fin}}$ , en mètre par seconde.

Il est d'usage de considérer qu'un écart de vitesse inférieur ou égal à  $10^{-3}$  m/s est adapté aux calculs pour les trains à grande vitesse. Pour des vitesses inférieures ou des calculs de ralentissement, d'autres valeurs peuvent être utilisées.

À partir des calculs des efforts retardateurs et des efforts externes, la décélération constante  $a_j$  pendant le pas d'itération  $j$  peut être calculée conformément à la [Formule \(3\)](#):

$$a_j = \frac{(\sum F_{r,n} + \sum F_{\text{ext}})_j}{m_{\text{dyn}}} \quad (3)$$

où

- $j$  est le numéro d'itération;  
 $a_j$  est la décélération constante pendant le pas d'itération  $j$ , en mètre par seconde carrée;  
 $F_{r,n}$  est l'effort retardateur instantané du type d'équipement de frein  $n$ , en Newton;  
 $F_{\text{ext}}$  est l'effort externe, en Newton;  
 $m_{\text{dyn}}$  est la masse dynamique, en kilogramme.

Si la valeur cible du paramètre sélectionné n'est pas atteinte, l'intégration de l'intervalle de temps suivant est effectuée à l'aide des résultats de l'intervalle précédent, comme indiqué dans les [Formules \(4\)](#) à [\(8\)](#):

$$\text{Vitesse au démarrage de l'intervalle } t_{j+1} \quad v_{j+1} = v_j - a_j \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$\text{Distance au démarrage de l'intervalle } t_{j+1} \quad s_{j+1} = s_j + v_j \cdot \Delta t - \frac{1}{2} \cdot a_j \cdot \Delta t^2 \quad (5)$$

$$\text{Décélération à } t_{j+1} \quad a_{j+1} = \frac{(\sum F_{r,n} + \sum F_{\text{ext}})_{j+1}}{m_{\text{dyn}}} \quad (6)$$

$$\text{Prochain pas} \quad t_{j+1} = t_j + \Delta t \quad (7)$$

Incrémentation du prochain pas  $j \rightarrow j+1$  (8)

où

- $a_j$  est la décélération constante pendant le pas d'itération  $j$ , en mètre par seconde carrée;
- $F_{r,n}$  est l'effort retardateur instantané du type d'équipement de frein  $n$ , en Newton;
- $F_{ext}$  est l'effort externe, en Newton (la valeur est **positive** en cas de décélération, et **négative** en cas d'accélération);
- $j$  est le numéro d'itération;
- $m_{dyn}$  est la masse dynamique, en kilogramme;
- $s_j$  est la distance parcourue entre la commande de freinage à l'instant  $t_0$  et l'instant  $t_j$ , en m;
- $t_j$  est le temps écoulé entre la commande de freinage et l'étape d'itération  $j$ , en s;
- $\Delta t$  est l'intervalle de temps, en s.

L'intervalle de temps final peut devoir être adapté, si nécessaire, pour correspondre à la valeur cible du paramètre sélectionné (voir 5.3.1).

D'autres algorithmes plus détaillés peuvent être utilisés en cas de besoin.

iTech STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

### 5.3.3 Détermination des intervalles de temps /écart relatif sur la distance $\xi$

L'écart relatif sur la distance  $\xi$  doit être calculé si la procédure d'intégration impose des intervalles de temps constants. Dans le cas d'une intégration par intervalle de temps évolutive, les exigences spécifiées dans le présent paragraphe ne s'appliquent pas.

L'intervalle de temps  $\Delta t$  doit être choisi de sorte que l'écart relatif sur la distance soit inférieur ou égal à la précision minimale requise. L'écart relatif sur la distance  $\xi$  est obtenu à partir de deux intégrations distinctes. Le calcul d'origine pour l'intervalle de temps  $\Delta t$  détermine la distance d'arrêt/de ralentissement de référence  $s_{ref(\Delta t)}$ . La seconde intégration, pour deux fois l'intervalle de temps ( $2 \cdot \Delta t$ ), détermine une nouvelle distance d'arrêt/de ralentissement  $s_{comp(2 \cdot \Delta t)}$  pour comparaison. L'écart relatif sur la distance  $\xi$  est calculé à l'aide de la [Formule \(9\)](#) et ne doit pas être supérieur à la précision minimale requise.

La valeur de l'écart relatif sur la distance  $\xi$  ne doit pas dépasser une valeur limite prédéfinie, et peut être calculée à l'aide de la [Formule \(9\)](#):

$$\xi = \left| \frac{s_{comp(2 \cdot \Delta t)} - s_{ref(\Delta t)}}{s_{ref(\Delta t)}} \right| \cdot 100 \quad (9)$$

où

- $\xi$  est l'écart relatif sur la distance, en %;
- $s_{ref(\Delta t)}$  est la distance d'arrêt/ralentissement calculée pour un intervalle de temps  $\Delta t$ , en mètres;
- $s_{comp(2 \cdot \Delta t)}$  est la distance d'arrêt/ralentissement calculée pour deux fois l'intervalle de temps ( $2 \cdot \Delta t$ ), en mètres.

Généralement, on considère qu'un écart relatif sur la distance de  $\xi \leq 0,1 \%$  est acceptable. Pour des vitesses faibles et des calculs de ralentissement, des valeurs supérieures peuvent être utilisées pour le ratio d'écart de distances.

NOTE Les exigences de validation d'une procédure d'intégration numérique sont en dehors du domaine d'application du présent document.

### 5.3.4 Temps de réponse équivalent du système $t_e$

Le calcul du temps de réponse équivalent du système permet de supposer que le freinage consiste d'abord en un «temps de fonctionnement libre» avec un effort de freinage égale à zéro, suivi d'un temps de freinage avec un effort de freinage appliqué au maximum. La norme ISO 20138-1 décrit le temps de réponse équivalent lorsque l'on considère le temps de fonctionnement libre.

Le temps de réponse équivalent du système  $t_e$  basé sur la distance d'arrêt et de freinage doit être calculé avec deux intégrations de temps distinctes:

- la distance d'arrêt/ralentissement calculée en tenant compte des caractéristiques temporelles de chaque type d'équipement de freinage agissant à partir du temps  $t_0 = 0$  s simultanément avec le début de la demande de freinage jusqu'à ce que la vitesse finale  $v_{fin}$  soit atteinte;
- la distance d'arrêt/ralentissement calculée en supposant que chaque type de d'équipement de freinage agissant s'applique complètement (100 %) au temps  $t_0 = 0$  s simultanément avec le début de la demande de freinage jusqu'à ce que la vitesse finale  $v_{fin}$  soit atteinte.

Le temps de réponse équivalent du système peut être calculé suivant la [Formule \(10\)](#):

$$t_e = \frac{s - s_{f(t)=100\%}}{v_0} \quad (10)$$

ou

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/c99df9a0-da3d-4383-beed-2526f877efb4/iso-20138-2-2019>

$v_0$  est la vitesse initiale, en m/s

$s$  est la distance d'arrêt/ralentissement avec toutes les caractéristiques du temps prises en compte, exprimée en m;

$s_{f(t)=100\%}$  est la distance de freinage, sans tenir compte d'aucune caractéristique temporelle, entre la vitesse initiale  $v_0$  et la vitesse finale  $v_{fin}$ .

## 5.4 Calculs dynamiques complémentaires

### 5.4.1 Énergie dissipée par les différents types d'équipements de frein

L'ISO 20138-1 décrit le calcul de l'énergie dissipée au cours du freinage à partir des efforts retardateurs moyens.

L'énergie totale dissipée par chaque type d'équipement de frein pendant les pas d'itération  $j = 0$  à  $j = J$  peut être calculée à partir des valeurs instantanées, à l'aide de la [Formule \(11\)](#):