



HAL
open science

Distances de Sécurité & Simulations

Patrick Gilliéron

► **To cite this version:**

Patrick Gilliéron. Distances de Sécurité & Simulations. [Rapport de recherche] Chercheur indépendant. 2021. <hal-03092409>

HAL Id: hal-03092409

<https://hal.science/hal-03092409v1>

Submitted on 2 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Copyright - All rights reserved

Distances de Sécurité & Simulations

Patrick Gilliéron
chercheur indépendant
rdmfa.pgillieron@orange.fr

Résumé : Les équations de la mécanique sont utilisées pour identifier la valeur de la décélération généralement associée à l'arrêt d'un véhicule se déplaçant en ligne droite à vitesse stabilisée. Cette valeur est retenue pour déterminer l'évolution de la distance qui sépare deux véhicules engagés dans un processus de freinage, estimer les distances minimales à respecter pour éviter la collision et analyser les influences de la vitesse, de la valeur de la décélération et du temps de réaction. Les processus de ralentissement ou d'arrêt ainsi que de collision sont enfin modélisés et analysés.

1. INTRODUCTION - Au-delà des chiffres si souvent rappelés par les différents acteurs de la prévention routière, il paraissait intéressant de fournir les éléments théoriques nécessaires à leur meilleure compréhension. Les équations à l'origine des préconisations diffusées par les médias sont ainsi rappelées pour identifier les valeurs moyennes des décélération associées aux distances de freinage relevées expérimentalement pour différentes vitesses et valeurs de temps de réaction. Ces ordres de grandeur étant identifiés, les équations sont utilisées pour estimer l'évolution de la distance qui sépare deux véhicules engagés dans un processus de ralentissement, déterminer les distances minimales de sécurité à respecter pour éviter la collision en fonction de la vitesse, de la décélération et du temps de réaction des conducteurs de part et d'autre de valeurs moyennes. Les processus de ralentissement ou d'arrêt et de collision sont ensuite modélisés et analysés.

2. LES HYPOTHÈSES – La simulation et l'analyse s'effectuent par rapport à un train de $N=10$ véhicules identiques de longueur $d=5$ m régulièrement espacés d'une distance L_0 à l'instant de date t_0 . Chaque véhicule roule initialement à la même vitesse stabilisée V_0 sur une trajectoire rectiligne d'axe x dans une masse d'air immobile par rapport au repère terrestre (pas de vent).

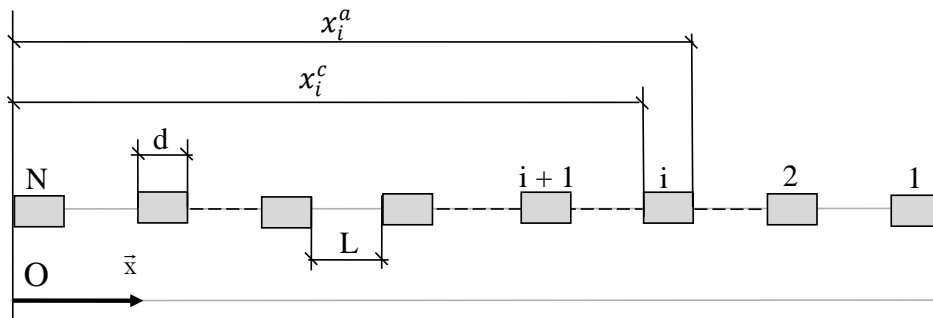


Fig. 1 – Train de 10 véhicules sur une trajectoire rectiligne, L est la distance courante ($L = L_0$ à $t = t_0$).

À l'instant de date $t_0=0$, les positions de chaque véhicule sont repérées par rapport à l'abscisse du culot du dixième et dernier véhicule formant le train, figure 1. Dans ces conditions, les abscisses des avants et des culots de chaque véhicule respectivement notés x_i^a et x_i^c sont données par les relations :

$$x_i^a(t_0) = (N - i) * (L_0 + d) + d$$

$$x_i^c(t_0) = (N - i) * (L_0 + d)$$

3. LES ÉQUATIONS DU MOUVEMENT – Lorsqu'un évènement E survient sur la trajectoire à l'instant de date t , chaque conducteur réagit avec une durée de retard notée δt^r comprise entre 0.4 et 1.2 seconde [1-4, A-C]. Cette durée est communément désignée temps de retard et sa valeur, très souvent proche de 1 seconde [1-3], correspond à la durée nécessaire pour que l'information, visuelle ou sonore, se traduise en action par le cerveau humain. Cette valeur peut augmenter avec les conditions

de circulation (brouillard, pluie, nuit), l'âge et la condition physique du conducteur (fatigue, maladie, prises de médicament(s), alcool, drogue). À cet évènement succède alors une réaction qui se traduit par une action sur le frein à laquelle est associée une décélération γ supposée constante telle que :

$$\gamma = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$$

À cette valeur est associé un freinage qui sera d'autant plus efficace que la valeur absolue de la décélération sera grande.

Pour une origine des temps située au moment où survient l'évènement E, sont alors associées, par intégration, une vitesse et une distance parcourue à l'instant de date t respectivement données par :

$$V(t) = V_0 + \gamma * (t - \delta t^r) \quad (1)$$

$$x(t) = x_0 + V_0 * (t - \delta t^r) + \frac{\gamma}{2} * (t - \delta t^r)^2 \quad (2)$$

avec x_0 et V_0 , l'abscisse et la vitesse du véhicule lorsque commence le processus de décélération. Ce processus étant enclenché, la vitesse du véhicule diminue jusqu'à l'arrêt qui survient à l'instant de date t_a et à la position x_a respectivement fournies par :

$$t_a = \frac{\gamma * \delta t^r - V_0}{\gamma} \quad (3)$$

$$x_a = x_0 + V_0 * (t_a - \delta t^r) + \frac{\gamma}{2} * (t_a - \delta t^r)^2 \quad (4)$$

Le modèle ainsi décrit nécessite de déterminer une valeur pour la décélération γ qui sera considérée constante sur toute la durée du freinage. Cette valeur s'obtient en référence au théorème de l'énergie cinétique pour une distance d'arrêt $\Delta x_{freinage}$ relevée à partir de la vitesse initiale V_0 . Son expression est donnée par :

$$\gamma = \frac{V_0^2}{2 * \Delta x_{freinage}} \quad (5)$$

Si Δx désigne la distance parcourue entre la survenue de l'évènement E et l'arrêt du véhicule, alors :

$$\Delta x = V_0 * \delta t^r + \Delta x_{freinage}$$

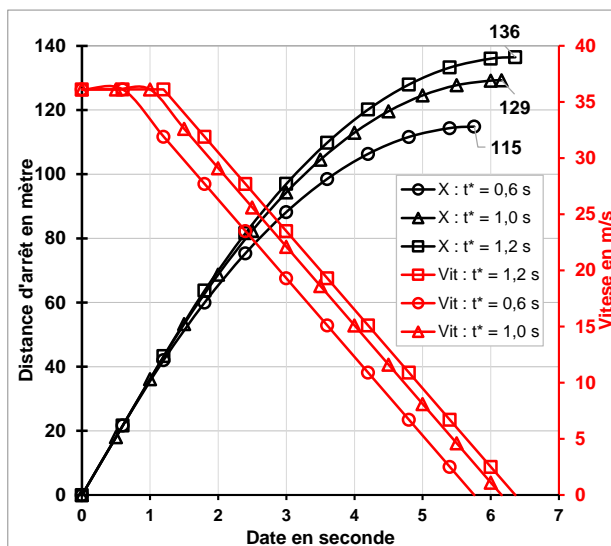


Fig. 2 – Distances d'arrêt et évolutions de la vitesse pour la vitesse $V_0=130$ km/h, une décélération $\gamma = -7$ m/s² et des temps de réaction du conducteur $\delta t^r = 0,6, 1,0$ et $1,2$ seconde.

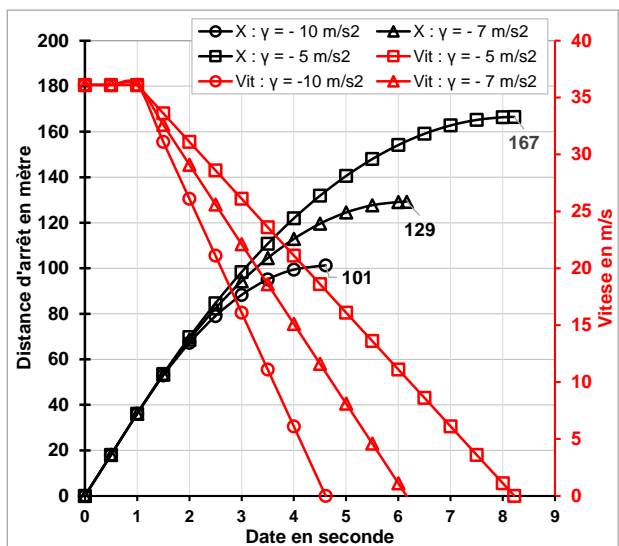


Fig. 3 – Distances d'arrêt et évolutions de la vitesse pour une vitesse $V_0=130$ km/h, une durée de réaction $\delta t^r = 1$ seconde et les décélération constantes $\gamma = -5, -7$ et -10 m/s².

Sur sol sec, sur autoroute et pour une vitesse initiale égale à 130 km/h, la prévention routière indique que 129 mètres sont nécessaires pour atteindre la vitesse nulle [B]. Dans ces conditions et un temps de

réaction $\delta t^r = 1s$, la décélération γ et la durée de freinage t_a , de la vitesse initiale V_0 à la vitesse nulle, déterminées à partir des équations (5) et (3), sont respectivement égales à $-7,01 \text{ m/s}^2$ et $6,16$ secondes. De même, 70 mètres étant la distance nécessaire pour arrêter un véhicule se déplaçant à 90 km/h , la décélération et la durée de freinage t_a valent respectivement -6.94 m/s^2 et $4,57$ secondes.

La décélération est fonction de l'âge et/ou de l'année de mise sur le marché du véhicule, de l'état des pneumatiques, de la répartition des masses (véhicule chargé), du système de freinage, de son niveau d'usure et de divers équipements d'assistance tels que l'antiblocage des roues (ABS¹), l'assistance au freinage d'urgence (BAS²) ou le freinage automatique d'urgence³. Dans les développements qui suivent, l'influence de la décélération est analysée de part et d'autre d'une valeur moyenne égale à -7 m/s^2 .

Les distances d'arrêt et les évolutions de la vitesse en fonction de l'instant de date t pour une vitesse V_0 égale à 130 km/h et différentes valeurs du temps de réaction δt^r et de la décélération γ sont reportées sur les figures 2 et 3.

3.1. INFLUENCE DU TEMPS DE RÉACTION : les résultats reportés figure 2 montrent que la distance d'arrêt augmente de 21 mètres ($21,7\text{m}$ exactement) lorsque le temps de réaction évolue de $0,6^4$ à $1,2$ s, soit l'équivalent d'au moins 4 longueurs de véhicule de 5 m. Cette distance correspond à la distance parcourue par le véhicule durant les $0,6$ seconde d'écart entre les deux valeurs $\delta t^r = 0.6$ s et $\delta t^r = 1.2$ s.

3.2. INFLUENCE DE LA DÉCÉLÉRATION : les résultats reportés figure 3 montrent que la distance d'arrêt augmente rapidement entre un freinage doux et un freinage très appuyé ; respectivement 167 m pour $\gamma = -5 \text{ m/s}^2$ et 101m pour $\gamma = -10 \text{ m/s}^2$.

4. DISTANCE DE SÉCURITÉ – La détermination des distances de sécurité sous-entend la simulation d'un train **de deux véhicules** qui se déplacent sur une trajectoire rectiligne à la même vitesse V_0 . Lorsqu'à l'instant de date $t_0 = 0$ le véhicule de rang i (figure 1) freine suite à un évènement E, le véhicule de rang $i+1$ réagit avec une durée de retard δt^r (temps de réaction).

À chaque instant de date t , l'abscisse associée à la position du culot du véhicule de rang i s'exprime par la relation :

$$x_i^c(t) = x_i^c(t_0) + V_0 * t + \frac{\gamma_i}{2} * t^2 \quad (6)$$

Compte tenu du temps de réaction δt^r , l'abscisse de l'avant du véhicule suiveur notée x_{i+1}^a à l'instant de date $t = t_0 + \delta t^r$ est reliée à l'abscisse du culot du véhicule suivi à l'instant de date t_0 par :

$$x_{i+1}^a(t_0 + \delta t^r) = x_{i+1}^a(t_0) + V_0 * \delta t^r$$

qui avec :

$$x_{i+1}^a(t_0) = x_i^c(t_0) - L_0$$

donne :

$$x_{i+1}^a(t_0 + \delta t^r) = x_i^c(t_0) - L_0 + V_0 * \delta t^r \quad (7)$$

Et à chaque instant de date $t \geq t_0 + \delta t^r$, l'abscisse de l'avant du véhicule suiveur de rang $i+1$ est donnée par la relation :

$$x_{i+1}^a(t) = x_{i+1}^a(t_0 + \delta t^r) + V_0 * (t - \delta t^r) + \frac{\gamma_{i+1}}{2} * (t - \delta t^r)^2 \quad (8)$$

4.1 CONDITION DE NON COLLISION - Pour qu'il n'y ait pas de collision, la distance L entre les deux véhicules doit être telle que l'avant du véhicule de rang $i+1$ en position arrêtée coïncide au plus avec la position arrêtée du culot du véhicule de rang i . En désignant respectivement par t_i^f et t_{i+1}^f , les instants

¹ ABS de l'anglais Anti-lock Braking System et de l'allemand Anti-Blockier System, système d'antiblocage des roues.

² BAS de l'anglais Braking Assistance System, système pour compenser la tendance naturelle à ne pas appuyer suffisamment fort sur la pédale de frein.

³ Système qui ralentit automatiquement le véhicule lorsqu'une collision imminente est détectée.

⁴ Valeur pour une personne en très bonne condition physique (valeur pouvant descendre jusqu'à 0.4 seconde).

associés aux arrêts des véhicules de rang i et $i+1$, la condition de non collision est alors donnée par :

$$x_i^c(t_i^f) \geq x_{i+1}^a(t_{i+1}^f) \quad (9)$$

qui associée aux équations (6), (7) et (8) s'écrit :

$$x_i^c(t_o) + V_o * t_i^f + \frac{\gamma_i}{2} * t_i^{f2} \geq x_{i+1}^c(t_o) - L + V_o * \delta t^r + V_o * (t_{i+1}^f - \delta t^r) + \frac{\gamma_{i+1}}{2} * (t_{i+1}^f - \delta t^r)^2$$

La distance L_o de séparation entre le culot du véhicule de rang i et l'avant du véhicule de rang $i+1$ doit alors satisfaire la condition :

$$L_o \geq V_o * t_{i+1}^f + \frac{\gamma_{i+1}}{2} * (t_{i+1}^f - \delta t^r)^2 - V_o * t_i^f - \frac{\gamma_i}{2} * t_i^{f2} \quad (10)$$

qui en développant avec $t_i^f = -\frac{V_o}{\gamma_i}$ et $t_{i+1}^f = \frac{\gamma_{i+1} * \delta t^r - V_o}{\gamma_{i+1}}$ devient⁵ :

$$L_o \geq V_o * \delta t^r - \frac{V_o^2}{2} * \left(\frac{\gamma_i - \gamma_{i+1}}{\gamma_{i+1} * \gamma_i} \right) \quad (11)$$

Les évolutions des distances de séparation L_o nécessaires pour supprimer les risques de collision entre les véhicules suivi et suiveur (resp. de rangs i et $i+1$) en fonction du temps de réaction, de la vitesse initiale et des décélérations des véhicules suivi et suiveur sont reportées figures 4, 5 et 6.

4.11 INFLUENCE DU TEMPS DE RÉACTION DU CONDUCTEUR DU VÉHICULE DE RANG $i+1$ – Pour une vitesse V_o et des décélérations γ_i et γ_{i+1} données, l'évolution de la distance de sécurité L_o varie linéairement en fonction du temps de réaction δt^r (équation (11) et figure 4).

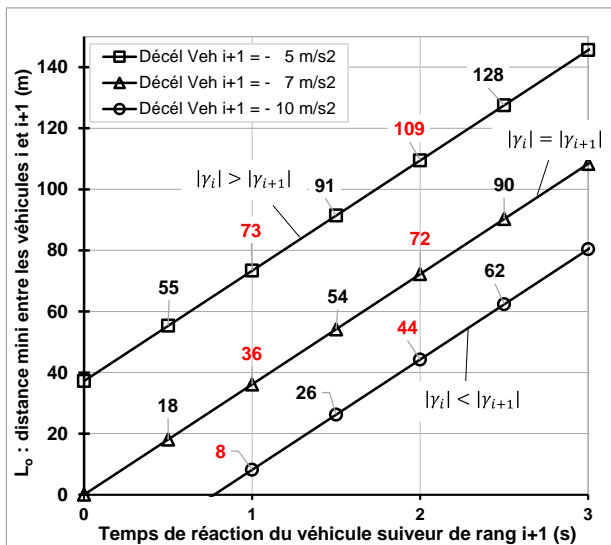


Fig. 4 – Distances minimales entre deux véhicules consécutifs roulant à la vitesse de 130 km/h en fonction du temps de réaction du véhicule suiveur pour une décélération $\gamma_i = -7 \text{ m/s}^2$ du véhicule suivi (rang i) et différentes valeurs de la décélération du véhicule suiveur.

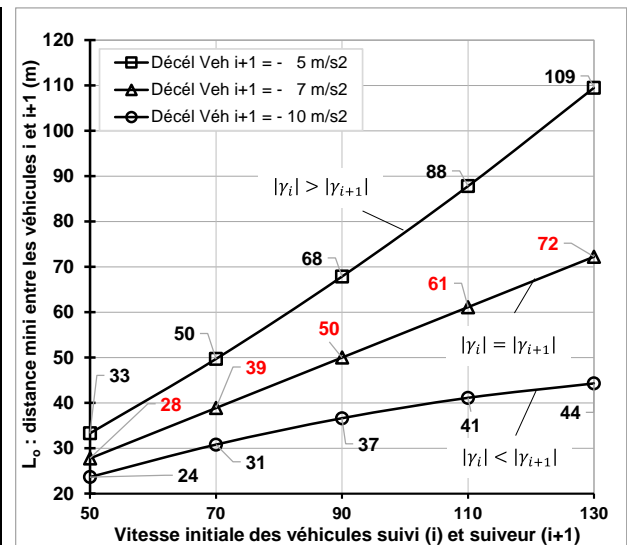


Fig. 5 – Distances minimales entre deux véhicules consécutifs en fonction de la vitesse V_o et différentes valeurs de la décélération du véhicule suiveur (rang $i+1$) pour un temps de réaction $\delta t^r = 2$ secondes et une décélération du véhicule suivi (rang i) $\gamma_i = -7 \text{ m/s}^2$.

Si la valeur absolue de la décélération du véhicule suivi (rang i) est supérieure⁶ à celle du véhicule suiveur (rang $i+1$ tel que $|\gamma_i| > |\gamma_{i+1}|$), la distance L_o est positive à l'origine des temps (fig. 4). La distance de séparation doit être majorée par rapport à la situation où les décélérations des véhicules suivi et suiveur sont identiques : cas où $|\gamma_i| = |\gamma_{i+1}|$.

⁵ Le temps de réaction du véhicule suivi n'est ici pas pris en compte.

⁶ A une plus grande valeur absolue de la décélération correspond une meilleure efficacité de freinage.

Si les décélérations des véhicules suivi et suiveur sont égales ($|\gamma_i| = |\gamma_{i+1}|$), la courbe d'évolution de la distance L_o en fonction du temps de réaction δt^r passe par l'origine des temps (fig. 4).

Si la valeur absolue de la décélération du véhicule suivi est inférieure à celle du véhicule suiveur ($|\gamma_i| < |\gamma_{i+1}|$), la distance⁷ L_o est négative à l'origine des temps (fig. 4) et la distance de séparation peut être minorée par rapport à la situation où les décélérations des véhicules suivi et suiveur sont identiques.

Pour un temps de réaction $\delta t^r = 2s$ pris comme référence par le code de la route [B] et une décélération $\gamma_i = \gamma_{i+1} = -7m/s^2$, la distance L_o à laisser entre les véhicules suivi et suiveur doit au moins être égale à 72 m, figure 4. Cette valeur s'identifie à la préconisation de la prévention routière (tableau 1).

Vitesse km/h	Distances ⁸ L_o [B] Code de la route	Distances L_o (m) calculées ⁹ inég. (11)
50	30 (28)	28
70	42	39
90	54 (50)	50
110	66 (62)	61 (62)
130	78 (73)	72 (73)

Extrait du code de la route : "l'intervalle à ménager entre les véhicules suivi et suiveur est, au moins, la distance que le véhicule suiveur parcourt en 2 secondes..." [B].
Les valeurs préconisées par le code de la route sont des ordres de grandeur déterminés en multipliant par 0.6 les valeurs de la vitesse exprimées en km/h. Ces valeurs sont à considérer sur sol sec (sans pluie, sans neige et sans verglas).

Tableau 1 – Comparaison des valeurs calculées suivant l'équation (11) avec les ordres de grandeur préconisés par le code de la route. Les valeurs calculées sont déterminées pour un temps de réaction $\delta t^r = 2$ secondes et une décélération du véhicule suiveur $\gamma_i = -7 m/s^2$.

4.12 INFLUENCE DE LA VITESSE INITIALE V_o – Les évolutions des distances de séparation L_o nécessaires pour supprimer le risque de collision entre les véhicules suivi (rang i) et suiveur (rang i+1) en fonction de la vitesse initiale sont reportées figure 5. Les simulations sont effectuées pour une décélération γ_i constante du véhicule suivi égale à $-7 m/s^2$ et un temps de réaction δt^r du véhicule suiveur égal à 2 secondes. Lorsque les décélérations des véhicules suiveur et suivi sont identiques ($\gamma_{i+1} = \gamma_i$), la distance de sécurité L_o donnée par l'équation (11) s'écrit :

$$L_o \geq V_o * \delta t^r \quad (12)$$

et l'évolution de la distance de sécurité varie linéairement en fonction de la vitesse initiale V_o .

Lorsque les décélérations des véhicules suivi (rang i) et suiveur (i+1) sont différentes, la distance de sécurité L_o , pilotée par les décélérations γ_i et γ_{i+1} , s'identifie à un polynôme du second degré en V_o (équation (11)). Les dérivées première et seconde permettent alors d'accéder au taux de variation local et à la concavité de la courbe d'évolutions, fonction du temps de réaction du véhicule de rang i+1 et des valeurs des décélérations γ_i et γ_{i+1} . Soient :

$$\frac{dL_o}{dV_o} \geq \delta t^r - V_o * \left(\frac{\gamma_i - \gamma_{i+1}}{\gamma_{i+1} * \gamma_i} \right) \quad \frac{d^2L_o}{dV_o^2} \geq - \left(\frac{\gamma_i - \gamma_{i+1}}{\gamma_{i+1} * \gamma_i} \right)$$

Lorsque la décélération du véhicule suivi γ_i est en valeur absolue inférieure à la décélération γ_{i+1} du véhicule suiveur, la dérivée seconde est négative, la concavité de la courbe est tournée du côté des valeurs décroissantes de L_o et la distance de sécurité diminue. Inversement, lorsque la valeur absolue de la décélération du véhicule suivi γ_i est supérieure à la décélération γ_{i+1} du véhicule suiveur, la dérivée seconde est positive, la concavité de la courbe est tournée du côté des valeurs croissantes de L_o et la distance de sécurité doit augmenter, voir les courbes de la figure 5.

4.13 INFLUENCE DE LA DÉCÉLÉRATION DU VÉHICULE DE RANG I+1 – Les évolutions des

⁷ Mot à considérer ici comme une variable et non au sens mathématique du terme (toujours positive ou nulle).

⁸ Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs arrondies à l'unité par excès.

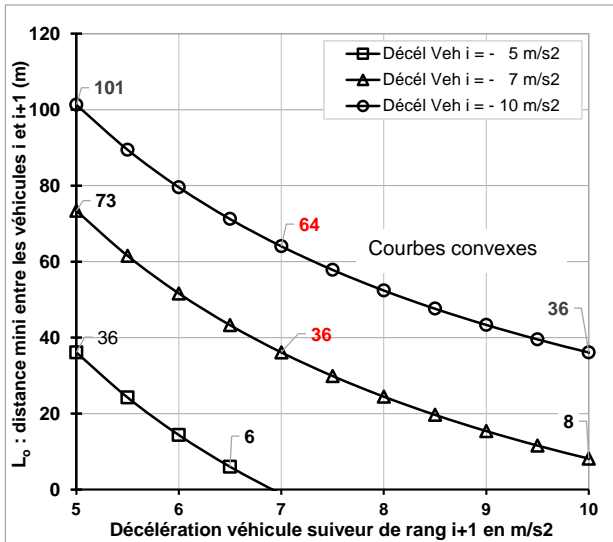
⁹ Les valeurs calculées sont approchées à l'unité près par défaut.

distances de séparation nécessaires pour supprimer les risques de collision entre les véhicules de rangs i et $i+1$ en fonction de la valeur absolue de la décélération du véhicule suiveur (rang $i+1$) pour différentes valeurs absolues de la décélération du véhicule suivi de rang i sont reportées sur la figure 6.

Pour l'inéquation (11), considérée comme une fonction des variables γ_i ou γ_{i+1} , les dérivées premières et secondes sont respectivement données par :

$$\frac{dL_o}{d\gamma_i} = -\frac{V_o^2}{2*\gamma_i^2} \quad \text{et} \quad \frac{dL_o}{d\gamma_{i+1}} = +\frac{V_o^2}{2*\gamma_{i+1}^2}$$

$$\frac{d^2L_o}{d\gamma_i^2} = +\frac{V_o^2}{\gamma_i^3} < 0 \quad \text{et} \quad \frac{d^2L_o}{d\gamma_{i+1}^2} = -\frac{V_o^2}{\gamma_{i+1}^3} > 0$$



et les courbes d'évolution de L_o en fonction de γ_{i+1} à γ_i constant et de γ_i à γ_{i+1} constant sont respectivement **convexe** et concave.

La distance de séparation L_o en fonction de la valeur absolue de la décélération du véhicule suiveur (rang $i+1$) varie comme le carré du temps mis par ce véhicule pour atteindre la vitesse nulle (inéquation (11)) et augmente lorsque la valeur absolue de la décélération diminue, fig. 6.

Pour une même valeur absolue de la décélération du véhicule suiveur (rang $i+1$), la distance L_o doit augmenter lorsque la valeur absolue de la décélération du véhicule suivi (rang i) augmente (freinage plus efficace). De même, la décélération du véhicule suiveur (rang $i+1$) doit augmenter en valeur absolue avec celle du véhicule suivi (rang

$i+1$) pour une même valeur de la distance L_o .

Pour une même valeur des décélération des véhicules suivi et suiveur, respectivement de rang i et $i+1$, égale à -7 m/s^2 et un temps de réaction $\delta t^r = 1 \text{ s}$ (resp. 2 s), la distance minimum de sécurité pour éviter la collision est au moins égale à 36 m (resp. 72 m), figures 4 et 6.

4.2 ÉVOLUTION DE LA DISTANCE ENTRE DEUX VÉHICULES CONSÉCUTIFS – Les équations (6) et (8) permettent d'accéder à l'évolution de la distance $\Delta x_{i+1,a}^{i,c} = L$ qui sépare deux véhicules de rangs consécutifs i et $i+1$ en fonction de l'instant de date t . Par soustraction des équations (6) et (8), il vient l'équation du second degré :

$$\Delta x_{i+1,a}^{i,c} = \frac{(\gamma_i - \gamma_{i+1})}{2} * t^2 + \gamma_{i+1} * \delta t^r * t + L_o - \frac{\gamma_{i+1}}{2} * \delta t^{r2} = L \quad (13)$$

Les dérivées première et seconde de cette équation par rapport à l'instant de date t permettent d'accéder au taux de variation et à la concavité de la courbe d'évolution fonction de la différence $(\gamma_i - \gamma_{i+1})$. Ces dérivées sont respectivement données par :

$$\frac{d\Delta x_{i+1,a}^{i,c}}{dt} = (\gamma_i - \gamma_{i+1}) * t + \gamma_{i+1} * \delta t^r \quad \text{et} \quad \frac{d^2\Delta x_{i+1,a}^{i,c}}{dt^2} = (\gamma_i - \gamma_{i+1})$$

Si la différence $(\gamma_i - \gamma_{i+1})$ est positive, le véhicule suiveur freine plus fort que le véhicule suivi ($|\gamma_{i+1}| > |\gamma_i|$), l'écart entre le culot et l'avant des véhicules suivi et suiveur augmente continuellement en fonction du temps et la concavité de la courbe est tournée vers le haut (vers les écarts $\Delta x_{i+1,a}^{i,c}$ croissants) et inversement lorsque $|\gamma_{i+1}| < |\gamma_i|$, figure 7.

Pour la distance de séparation $L_o = 50 \text{ m}$ inférieure à la distance minimale de sécurité $L_o = 72 \text{ m}$

préconisée pour la vitesse $V_0 = 130 \text{ km/h}$, le véhicule suiveur de rang $i+1$ percute l'arrière du véhicule suivi de rang i à l'instant de date $t=4.21$ secondes pour les décélérations respectives $\gamma_{i+1} = -7 \text{ m/s}^2$ et $\gamma_i = -10 \text{ m/s}^2$. Cet instant correspondant à l'arrêt du véhicule suivi.

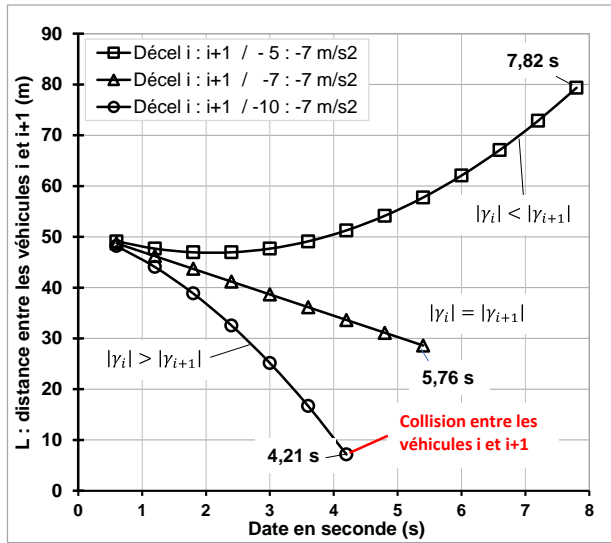


Fig. 7 - Évolution de la distance de séparation $L = \Delta x_{i+1,a}^{i,c}$ en fonction de l'instant de date t pour différentes valeurs de la décélération du véhicule suivi (rang i), une vitesse initiale $V_0 = 130 \text{ km/h}$ ($36,1 \text{ m/s}$), une longueur de séparation initiale $L_0 = 50$ mètres inférieure à la distance de sécurité (72 m), un temps de réaction $\delta t^r = 0.6$ seconde et une décélération $\gamma_{i+1} = -7 \text{ m/s}^2$ du véhicule suiveur. Les courbes d'évolution sont représentées jusqu'à l'instant de date t correspondant à l'arrêt du véhicule suivi, voir la relation (3).

γ_i en m/s^2	Temps jusqu'à l'arrêt en s
-5	7,82
-7	5,76
-10	4,21

5. RALENTISSEMENT – Lorsque le nombre de véhicules au kilomètre augmente, de longs trains de véhicules se déplacent à une même vitesse V_0 . Pour une distance L_0 de séparation et un temps de réaction δt^r identiques pour chaque véhicule, la réaction¹⁰ du véhicule de tête (rang $i = 1$) à la survenue d'un évènement E à l'instant de date $t_0 = 0$ engendre une réaction des conducteurs des véhicules de rang i à l'instant θ^i défini par :

$$\theta^i = t_0 + (i - 1) * \delta t^r \quad \text{avec} \quad i \in [2, N] \quad (14)$$

Ces réactions successives séparées de la même durée δt^r induisent par freinage des réductions des distances de séparation entre véhicules consécutifs qui, d'après l'équation (13), sont à chaque instant données par :

$$\Delta x_{i+1,a}^{i,c} = \frac{(\gamma_i - \gamma_{i+1})}{2} * t^2 + \gamma_{i+1} * \delta t^r * t + L_0 - \frac{\gamma_{i+1}}{2} * \delta t^{r^2} = L \quad (15)$$

Si les décélérations γ_i et γ_{i+1} sont égales et notées γ , alors :

$$L = \gamma * \delta t^r * t + (L_0 - \frac{\gamma}{2} * \delta t^r) \quad \text{et} \quad \frac{dL_i^{i+1}}{dt} = \gamma * \delta t^r$$

S'agissant d'une décélération, la valeur de γ est négative et la distance qui sépare deux véhicules consécutifs décroît linéairement avec l'instant de date t .

Ces réductions successives (équation 14) et continues (équation 15) de la distance de séparation s'effectuent de la tête vers la queue du train de véhicules, diminuent progressivement la distance qui sépare les culots des véhicules de tête et de queue et engendrent ainsi la formation d'une zone de ralentissement¹¹ qui remonte de l'amont vers l'aval du train de véhicules, du rang $i=1$ à 10, voir les courbes d'iso vitesses reportées figures 8 et 9.

Ces courbes d'iso vitesses, associées aux positions successives des avants (courbe noires ou grises) ou des culots (courbe rouge sur la figure 9) de chaque véhicule en fonction du temps pour différentes valeurs de la vitesse relevées durant la phase de décélération supposée constante, s'obtiennent à partir des relations (1) et (2). Si a désigne la fraction de la vitesse initiale avant la survenue de l'évènement E,

¹⁰ Appui sur la pédale de frein et allumage des feux STOP.

¹¹ Les pentes des courbes des abscisses des avants des véhicules sont négatives lorsque le temps augmente.

la date t_{av_o} à laquelle est associée la vitesse $a * V_o$ est donnée par :

$$t_{av_o} = \delta t^r + \frac{V_o}{\gamma} * (a - 1)$$

À cet instant et d'après l'équation (2), est alors associée la position $x(t_{av_o})$:

$$x(t_{av_o}) = x_o + \frac{V_o^2}{\gamma} * (a^2 - 1)$$

Les évolutions des positions $x(t_{av_o})$ pour les valeurs de a égales à 0.0, 0.2, 0.4 et 0.6 sont reportées sur les figures 8 et 9. Ces courbes montrent que les positions de vitesses décroissantes, de la vitesse V_o ($a=1$) à la vitesse nulle ($a=0$) remontent vers l'amont du flot de circulation en fonction du temps¹². Ce phénomène, indépendant du temps de réaction δt^r choisi pour la modélisation, est couramment relevé sur autoroute lorsque la circulation se densifie.

À noter enfin que si la distance initiale L_o de séparation¹³ s'identifie à la longueur parcourue par le véhicule suiveur (rang $i+1$) durant le temps de réaction δt^r (équation (11) pour $\gamma_i = \gamma_{i+1}$), alors l'avant du véhicule suiveur de rang $i+1$ arrive au niveau du culot du véhicule suivi de rang i . Sur la figure 9, la courbe rouge est associée aux positions successives du culot du véhicule de rang $i=1$ et l'avant du véhicule de rang $i=2$ s'arrête au niveau du culot du véhicule de rang $i=1$ ($x=354$ m). À noter que les véhicules qui suivent, du rang 3 à 10, s'arrêtent à des positions qui n'engendrent pas de collision.

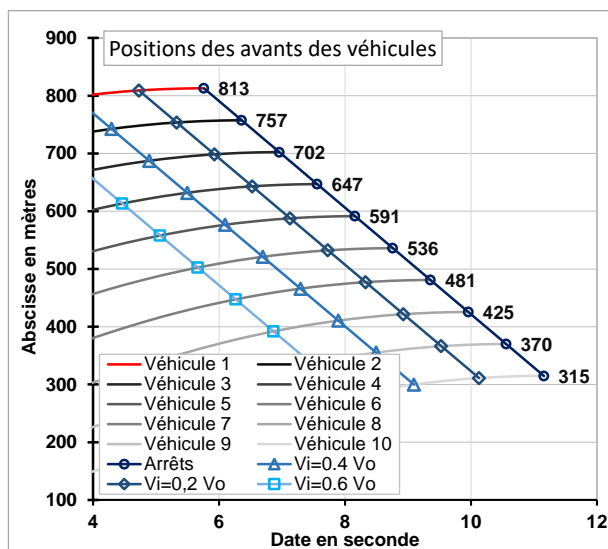


Fig. 8 – Abscisses des avants des véhicules en fonction de l'instant de date t pour une distance de séparation initiale $L_o=72$ mètres (voir le tableau 1). En rouge l'évolution de la position de l'avant du véhicule de tête (rang 1).

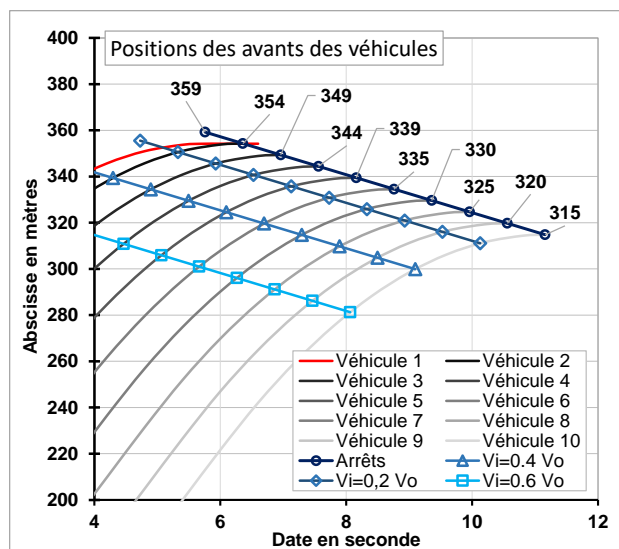


Fig. 9 – Abscisses des avants des véhicules en fonction de l'instant de date t pour une distance de séparation $L_o = V_o * \delta t^r = 21,6$ mètres (équation 12). En rouge, l'évolution de la position du culot du véhicule de tête.

Évolutions des positions des avants des véhicules formant le train de véhicules ; $V_o=130$ km/h, $\gamma_i = -7$ m/s² avec $i \in [1, N]$ et un temps de réaction δt^r commun égal à 0.6 seconde. Les abscisses sont déterminées par rapport au culot du véhicule de queue positionné à l'abscisse $x=0$ à l'instant $t_o = 0$.

6. COLLISION – Soit un train de N véhicules identiques régulièrement espacés d'une distance L_o qui se déplace à la vitesse constante V_o lorsqu'apparaît un évènement E qui soumet le véhicule de tête à

¹² Les pentes des droites d'iso vitesses des figures 7 et 8 sont négatives.

¹³ Distance avant le début du freinage du véhicule de tête de rang i .

une décélération dont l'intensité dépasse les capacités actuelles de freinage¹⁴ sans être significative d'un choc frontal (voir annexe 1) ; soit 15 m/s^2 . Pour cette valeur, une vitesse du train de véhicules égale à 130 km/h , une durée de réaction δt^r égale à $0,6$ seconde et la distance de sécurité $L=72 \text{ m}$ ([B] et tableau 1), l'avant du véhicule suiveur (rang $i+1$ avec $i=2$) ne percute pas le culot du véhicule suivi (rang i avec $i=1$), voir la figure 10 et les abscisses associées aux positions d'arrêt respectivement égales à 757 et 758 mètres.

Pour les mêmes conditions mais une décélération plus importante en valeur absolue égale à 25 m/s^2 , très inférieure en valeur absolue à celle relevée lors d'un choc frontal à 90 km/h (208 m/s^2 , annexe 1), l'avant du véhicule suiveur (rang $i=2$ à N) percute l'arrière du véhicule suivi (rang $i=1$) à la vitesse de 55 km/h (15 m/s), figure 11. Un tel niveau de vitesse n'engendre en général qu'un choc sans dommage corporel grave pour les occupants. Quant aux autres véhicules suiveurs (rang $i=3$ à N), les distances de sécurité leur permettent de s'arrêter à des distances suffisantes des véhicules qui les précèdent. À des valeurs absolues plus importantes de la décélération du véhicule de tête seraient cependant associées des distances d'arrêt plus courtes et par suite de possibles collisions avec les véhicules de rang supérieur à 2 .

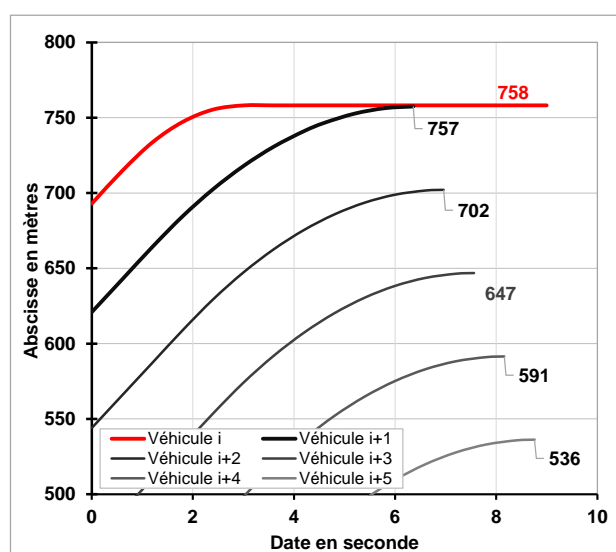


Fig. 10 – Évolution des parcours pour une distance initiale entre véhicules $L_0=72$ mètres et une décélération du véhicule de tête $\gamma_i = -15 \text{ m/s}^2$

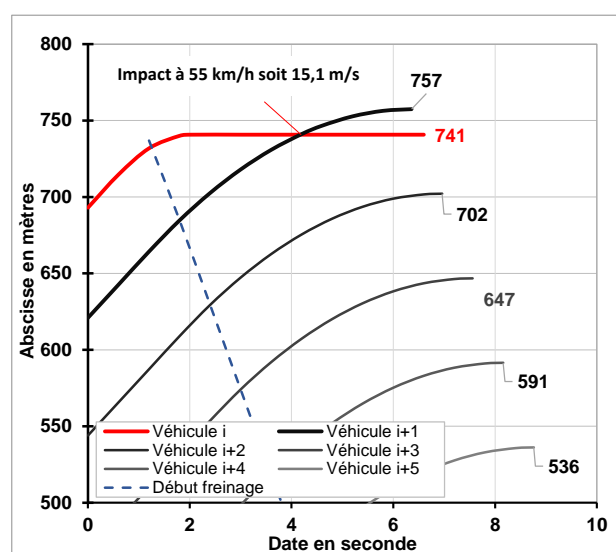


Fig. 11 – Évolution des parcours entre véhicules pour une distance initiale entre véhicules $L_0=72$ mètres et une décélération du véhicule de tête $\gamma_i = -25 \text{ m/s}^2$.

Évolutions des trajectoires du culot du véhicule de tête (rang 1) et des avants des véhicules suiveurs de 2 à N ;
 $V_0=130 \text{ km/h}$, $\gamma_i = -7 \text{ m/s}^2$ avec $i \in [2, N]$ et un temps de réaction δt^r commun égal à 0.6 seconde.

Les valeurs mentionnées au bout de chaque courbe sont associées aux positions d'arrêt et la droite en pointillés de couleur bleue est associée aux instants où débute le processus de freinage à décélérations constantes (fig. 11 et 13).

Ces valeurs doivent cependant être considérées comme des valeurs basses compte tenu du faible temps de réaction $\delta t^r = 0.6$ des véhicules suiveurs (rang $i=2$ à N) et de la décélération $\gamma = -25 \text{ m/s}^2$ du véhicule suivi (rang $i=1$) retenus pour la simulation. Cette dernière valeur pourrait en effet être plus importante en valeur absolue si l'évènement E devait être lié à la collision avec un véhicule ou un objet (remorque ou caravane) se déplaçant transversalement à la chaussée suite à un coup de vent traversier ou une rupture mécanique (caravane ou remorque). S'agissant enfin du non-respect des distances de sécurité en fonction de la vitesse, les courbes reportées figures 12 et 13, pour un train de véhicules espacés de 20 mètres¹⁵ au lieu des 72 mètres préconisés¹⁶ pour 130 km/h (tableau 1, 3ème colonne) lorsque la vitesse du véhicule de tête diminue rapidement suite à un évènement accidentel, montrent

¹⁴ La décélération prise communément comme référence pour le freinage d'urgence est égale à -7 m/s^2 .

¹⁵ 20 mètres, soient l'équivalent de 4 à 5 longueurs de véhicule. Des distances inférieures à cette valeur sont encore trop souvent constatées sur autoroute.

¹⁶ Valeurs vérifiées par le calcul et issues des équations de la mécanique.

clairement qu'aucun véhicule ne peut échapper au carambolage. Cette configuration, caractéristique de comportements irresponsables trop fréquents sur autoroute compte tenu des énergies mises en jeu (annexe 2), s'accompagne le plus souvent de blessures graves et de décès [5]. Tous ces résultats confirment l'importance de respecter au minimum les distances de sécurité préconisées par les différents organismes de sécurité routière et au mieux de conserver une distance qui permette l'arrêt du véhicule soient 70 et 129 m pour les vitesses 90 et 130 km/h ; distances correspondant pour simplifier à 2 espacements¹⁷ et 1 bande blanche latérale droite pour 90 km/h, 3 espacements et 2 bandes blanches latérales droites pour la vitesse 130 km/h.

Ces distances de sécurité sont en pratique difficile à conserver car les espaces offerts sont encore trop souvent comblés par des conducteurs qui oublient les préconisations de rabat¹⁸ ou qui, agressés par un véhicule suiveur trop près ou trop pressé, se rabattent trop rapidement [E].

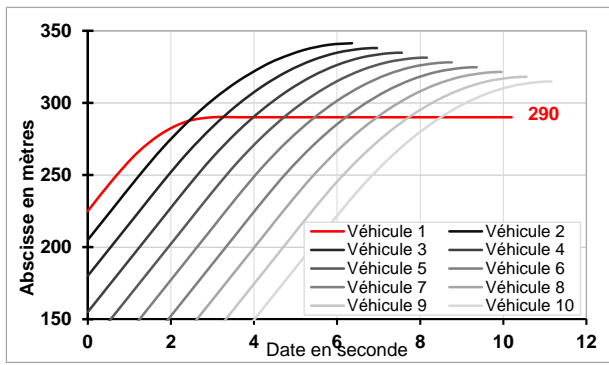


Fig. 12 – Évolutions des parcours entre véhicules pour une distance initiale entre véhicules $L_0=20$ mètres et une décélération du véhicule de tête $\gamma_1 = -15\text{m/s}^2$.

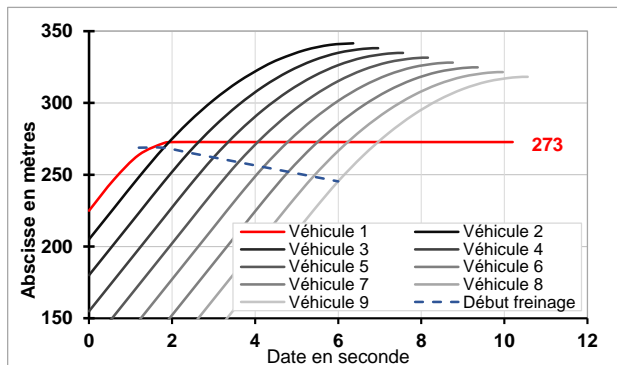


Fig. 13 – Évolutions des parcours entre véhicules pour une distance initiale entre véhicules $L_0=20$ mètres et une décélération du véhicule de tête $\gamma_1 = -25\text{m/s}^2$.

7. CONCLUSION

Les équations de la mécanique sont utilisées pour identifier la valeur de la décélération généralement associée à l'arrêt d'un véhicule se déplaçant en ligne droite à vitesse stabilisée. Cette valeur est retenue pour déterminer l'évolution de la distance de sécurité qui sépare deux véhicules consécutifs engagés dans un processus de freinage, déterminer les distances minimales à respecter pour éviter la collision et analyser les influences de la vitesse initiale, des décélération et du temps de réaction. Les processus de ralentissement ou d'arrêt ainsi que de collision sont modélisés.

Les modélisations s'effectuent pour et autour de la décélération $\gamma = -7\text{m/s}^2$ déterminée à partir des distances d'arrêt fournies par les organismes de prévention routière pour un temps de réaction δt^r égal à 1 seconde soient 129 mètres pour 130 km/h et 70 mètres pour 90 km/h.

Les phénomènes physiques associés aux mouvements relatifs de deux véhicules suivi et suiveur sont reproduits et les valeurs déduites du calcul sont en parfait accord avec les recommandations établies par les organismes de sécurité routière. La distance entre les véhicules suivi et suiveur augmente (resp. diminue) lorsque la décélération du véhicule suiveur est en valeur absolue plus faible (resp. plus forte) que celle du véhicule suivi et les distances de sécurité à maintenir entre deux véhicules disposant d'un freinage de même efficacité sont retrouvées : 72 mètres à 130 km/h et 50 mètres à 90 km/h pour un temps de réaction égal à 2 secondes.

Tous les résultats largement diffusés aujourd'hui dans les médias, tel que l'accroissement des distances

¹⁷ Les bandes blanches latérales font 39 m de longueur et sont espacées de 19 mètres ($2 * 19\text{ m} + 39\text{ m} = 77\text{ m}$ pour 90 km/h ; $3 * 19\text{ m} + 2 * 39\text{ m} = 135\text{ m}$ pour 130 km/h).

¹⁸ Le rabat doit s'effectuer **sans provoquer le ralentissement du véhicule dépassé** (décret n°2003-293 du 31 mars 2003 - art. 2 JORF 1er avril 2003) [E].

de sécurité avec les augmentations de la vitesse initiale et/ou du temps de réaction et la diminution de l'efficacité du freinage des véhicules suiveurs, sont retrouvés et confirmés par la démonstration. Les processus de concentration et d'accident qui peuvent enfin apparaître au sein d'un train de véhicules sont également reproduits. Lors d'un freinage d'un des véhicules, les positions des vitesses décroissantes, voire des vitesses nulles, remontent vers l'amont du flot de véhicules. Lors d'une réduction inhabituelle de la vitesse d'un des véhicules, le risque d'impact apparaît clairement lorsque les distances de sécurité ne sont pas respectées. Ces résultats montrent l'intérêt de conserver dans tous les cas les distances d'arrêt pour prévenir toute situation inhabituelle.

RÉFÉRENCES

- [1] Conseil National de la Sécurité Routière, Hôtel de Beauvau, 27 novembre 2012.
- [2] Van Elslande P., Jaffard M., Fouquet K. et Fournier J-Y ; "De la vigilance à l'attention, Influence de l'état psychophysologique et cognitif du conducteur dans les mécanismes d'accidents", les collections de l'INRETS, rapport n°280.
- [3] Chapon A. Gabaude C. et Fort A. ; "Défauts d'attention et conduite automobile – État de l'art et nouvelles orientations pour la recherche dans les transports", les collections de l'INRETS, synthèse n°52, novembre 2006.
- [4] Gonneville P. et Martin G. ; Savoirs de base en sécurité routière, Vitesse et mortalité, Service d'études techniques des routes et autoroutes (Sétra) ; Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer, mars 2006.
- [5] La sécurité routière en France - Bilan de l'accidentalité de l'année 2019 ; Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), 2019.

SITES WEB

- [A] <https://www.securite-routiere-az.fr/t/temps-de-reaction/>
- [B] <https://www.preventionroutiere.asso.fr/2016/03/30/tenir-ses-distances/>
- [C] <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/neurosciences/outils-numeriques/temps-de-reaction-investigation-variabilite-et-traitements-statistiques-des-donnees/comprendre-1/le-temps-de-reaction-quest-ce-que-cest>
- [D] <https://www.securite-routiere-plus.com/pages/les-collisions-frontales-1.html>
- [E] <http://www.securite-routiere-plus.com/medias/files/depassement.sur.autoroute.pdf>

NOMENCLATURE

N	Nombre de véhicules du train de véhicules, sans dimension.
d	Longueur de chaque véhicule considéré égale quel que soit le véhicule, en m.
L_o	Distance entre chaque véhicule à l'instant de date initiale t_o , en m.
L	Distance entre l'avant du véhicule de rang $i+1$ et l'arrière du véhicule de rang i à l'instant de date t , en m, notée également $\Delta x_{i+1,a}^{i,c}$.
V_o	Vitesse à l'instant de date initiale t_o , en m/s.
V	Vitesse à l'instant de date t en m/s.
a	Paramètre compris entre 0 et 1, sans dimension.
x_o	Abscisse à l'instant de date initiale t_o , en m/s.
$x_i^a(t_o)$	Abscisse de l'avant du véhicule de rang i à l'instant de date initiale t_o , en m.
$x_i^c(t_o)$	Abscisse du culot du véhicule de rang i à l'instant de date initiale t_o , en m.
Δx	Distance parcourue entre l'évènement E et l'arrêt du véhicule, en m.
$\Delta x_{freinage}$	Distance parcourue entre le début du freinage et l'arrêt du véhicule, en m.
γ	Décélération du véhicule, en m/s^2 .

γ_i, γ_{i+1}	Décélération du véhicule de rang i , de rang $i+1$, en m/s^2 .
t	Instant de date t , en s.
t_a	Date associée à l'arrêt du véhicule, en s.
t_{av_0}	Date à laquelle est associée la vitesse V_0 lors du processus de décélération, en s.
t_i^f, t_{i+1}^f	Temps ou durée nécessaire à l'arrêt du véhicule de rang i , de rang $i+1$, en s.
δt^r	Temps ou durée de réaction du conducteur, en s.
M	Masse du véhicule, en kg.
\vec{F}_{ext}	Somme des forces extérieures qui s'appliquent sur le véhicule, vecteur.
V_1, V_2	Vitesse du véhicule entre les instants de dates t_1 et t_2 , en m/s .
$\vec{\Delta l}$	Déplacement ou parcours du véhicule entre les instants de dates t_1 et t_2 , vecteur.
g	Norme de l'accélération de la pesanteur, en m/s^2 .

ANNEXE 1

Décélération liée à un essai de choc – Les essais de chocs effectués par les constructeurs automobiles consistent à projeter un véhicule donné sur un obstacle massif immobile et indéformable. L'objectif consiste à déterminer les déformations de structure et estimer les dommages que pourraient subir les passagers remplacés par des mannequins équipés de capteurs d'efforts et de déformation. Les essais sont évidemment destructeurs et satisfont à des protocoles standardisés rigoureux destinés à permettre des comparaisons de résultats.

Des ordres de grandeur pour les valeurs des décélération s'obtiennent en appliquant le théorème de l'énergie cinétique "Entre deux instant t_1 et t_2 , la variation d'énergie cinétique est égale au travail des forces extérieures appliquées sur le trajet réellement parcouru entre ces deux instants".

En considérant une trajectoire horizontale, en désignant par M la masse du véhicule, par V_1 et V_2 les vitesses avant et après le choc et par Δl la distance parcourue par le véhicule dans la direction de l'effort de résistance supposé dirigé suivant la trajectoire du véhicule, le théorème de l'énergie cinétique s'écrit :

$$\frac{1}{2}MV_2^2 - \frac{1}{2}MV_1^2 = \sum \vec{F}_{ext} \circ \vec{\Delta l} \quad \text{avec} \quad \sum \vec{F}_{ext} = M\vec{\gamma}$$

et l'accélération γ est alors donnée par :

$$\gamma = \frac{V_1^2}{2 \Delta L}$$

Vitesse en km/h	Vitesse en m/s	Décélération en m/s ²	Équivalence en nb de g
50	13,9	- 64	- 7
70	19,4	- 126	- 13
90	25,0	- 208	- 21
110	30,6	- 311	- 32
130	36,1	- 435	- 44

Tableau 2 – Décélération et équivalences en nombres de fois l'accélération de la pesanteur $g=9,81 \text{ m/s}^2$ pour une énergie dissipée sur une distance de 1,5 m (longueur d'enfoncement du véhicule) lors d'un choc frontal pour différentes vitesses en m/s .

Les valeurs des décélération pour les vitesses 50, 70, 90, 110 et 130 km/h exprimées en m/s^2 et en nombre de fois l'accélération de la pesanteur ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) sont reportées dans le tableau 2.

Concernant les valeurs des décélération, il est couramment admis qu'au-delà d'une décélération supérieure à 20g, le cœur, les poumons, l'ensemble des viscères et le cerveau subissent des dégâts structurels avec des hémorragies qui entraînent le plus souvent la mort. En dessous de 15g, les blessures sont importantes mais peuvent ne pas entraîner la mort [4, D].

ANNEXE 2

Énergie de vitesse – Sont reportées dans le tableau 3, les énergies cinétiques de deux véhicules caractéristiques des segments B (polyvalent type Clio) et C ou MA (type Kadjar ou 5008) pour les différentes valeurs réglementées de la vitesse. Ces énergies (en Joule) sont transformées en gain équivalent de hauteur (énergie potentielle) en supposant que la transformation s'effectue sans frottement ni déformation (conservation de l'énergie totale).

En désignant respectivement par V_1 et V_2 puis par h_1 et h_2 les vitesses et les altitudes avant et après la transformation considérée comme parfaitement élastique, alors :

$$\frac{1}{2}MV_1^2 + Mgh_1 = \frac{1}{2}MV_2^2 + Mgh_2 \quad \text{avec } V_2 = 0 \quad \text{d'où } h_2 - h_1 = \frac{V_1^2}{2 \cdot g}$$

À 130 km/h et quelle que soit la masse, un véhicule pourrait ainsi être propulsé à 66 mètres au-dessus du sol, soit 9 mètres au-dessus du premier étage de la tour Eiffel (57 mètres) ; l'équivalent du 22ème étage d'un immeuble (sur la base de 3 mètres / étage).

Ces résultats expliquent à eux seuls l'extrême facilité avec laquelle des véhicules peuvent se retourner, effectuer plusieurs tonneaux et parfois se retrouver à cheval sur un mur de séparation de voies rapides ou d'autoroute.

Vitesse en km/h	Vitesse en m/s	Véhicule Masse 1350 kg	Véhicule Masse 1650 kg	Hauteur en m	Nb étages (3 m/étage)
		Energie en Joule	Energie en Joule		
50	13,9	130208	159144	9,8	3,3
70	19,4	255208	311921	19,3	6,4
90	25,0	421875	515625	31,9	10,6
110	30,6	630208	770255	47,6	15,9
130	36,1	880208	1075810	66,5	22,2

Tableau 3 – Énergies de vitesse (cinétiques) et équivalents en hauteur et nombre d'étages si l'énergie de vitesse est intégralement transformée en énergie potentielle. Les calculs sont effectués avec 2 passagers (75 kg/passager).