

# Simulation numérique d'un accident de tramway avec déraillement après percussioin d'une voiture particulière dans l'agglomération de Valenciennes

Référence : RBEA20101105-A  
Rapport d'étude final

BEA-TT  
Novembre 2010



Laboratoire d'essais Inrets Equipements de la Route

## Auteur

Personne	Fonction	Organisme	Visa	Date du visa
Martin BOURBON	Ingénieur Etudes et Développements	LIER		

## Approbation

Personne	Fonction	Organisme	Visa	Date du visa
Clément GOUBEL	Ingénieur Etudes et Développements	LIER		

## Diffusion

Personne	Organisme
Jean-Pascal LESOT	BEA-TT

## Liste des versions et révisions

Version	Date	Objet
RBEA20101105-A	05/11/2010	Version de travail
RBEA20101105-B	18/11/2010	Corrections d'après remarques BEA-TT et STRMTG

# Sommaire

<u>1. Objectif et méthodes.....</u>	<u>4</u>
<u>2. Modèle numérique du Tramway.....</u>	<u>5</u>
<u>2.1. Hypothèses de modélisation.....</u>	<u>5</u>
<u>2.2. Diagramme.....</u>	<u>6</u>
<u>2.3. Bogies.....</u>	<u>7</u>
<u>2.4. Liaisons inter-caisse.....</u>	<u>8</u>
<u>2.5. Interface roue-rail.....</u>	<u>9</u>
<u>2.6. Evaluation du modèle.....</u>	<u>9</u>
<u>2.7. Evaluation du modèle en ligne droite.....</u>	<u>10</u>
<u>2.8. Evaluation en courbe.....</u>	<u>10</u>
<u>3. Reconstitution du déraillement.....</u>	<u>11</u>
<u>3.1. Condition d'accident et plan d'expérience.....</u>	<u>11</u>
<u>3.2. Etude de corrélation.....</u>	<u>15</u>
<u>3.3. Synthèse 1ère phase .....</u>	<u>18</u>
<u>4. Exploration de l'effet des paramètres physiques susceptibles de contribuer à la prévention du déraillement ou à la limitation de son amplitude.....</u>	<u>19</u>
<u>4.1. Essai de référence et modifications étudiés.....</u>	<u>19</u>
<u>4.2. Synthèse :.....</u>	<u>31</u>
<u>4.3. Impact sur le flanc du Tramway .....</u>	<u>32</u>
<u>4.4. Etude sur le fusilage du support R24 .....</u>	<u>33</u>
<u>5. Discussion et conclusions.....</u>	<u>38</u>
<u>5.1. Reconstitution de l'accident.....</u>	<u>38</u>
<u>5.2. Variation paramétrique.....</u>	<u>38</u>
<u>5.3. Obstacle fixe.....</u>	<u>38</u>

## 1. Objectif et méthodes

Cette étude vise, dans un premier temps, à reproduire par le calcul le déraillement du tramway de Valenciennes ayant eu lieu en octobre 2009.

Dans ce but, une modélisation éléments finis d'une rame de tramway de type CITADIS a été réalisée à partir de données fournies par la société ALSTOM.

Ce modèle a fait l'objet de simulations d'évaluation afin de valider son comportement dynamique.

Dans un deuxième temps, un plan d'expérience prenant en compte les incertitudes des conditions d'impact a été réalisé afin de reproduire l'accident de manière satisfaisante.

Enfin, une étude sur les paramètres physiques susceptibles de contribuer à la limitation de l'amplitude du déraillement a été effectuée.

Les modélisations ont été effectuées avec le logiciel HYPERMESH de la suite HYPERWORKS de la société ALTAIR.

Les différents calculs ont été effectués à l'aide du solveur explicite LS-DYNA de la société LSTC.

Les plans d'expérience ont été réalisés avec le logiciel BARRLIER développé pour le LIER par la société SIMTECH.

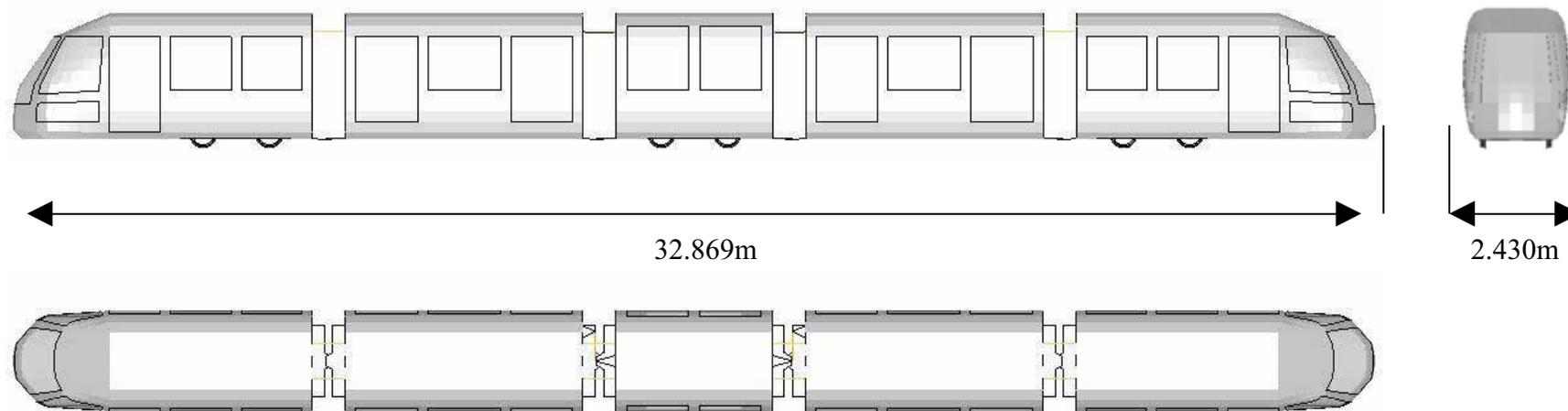
## **2. Modèle numérique du Tramway**

Cette partie présente de manière succincte les différents éléments composant le modèle numérique du tramway.

### **2.1. *Hypothèses de modélisation***

Compte tenu des informations disponibles, une modélisation rigide, articulée et suspendue a été réalisée en respectant les dimensions générales extérieures ainsi que de la répartition des masses.

## 2.2. Diagramme



Longueur totale : 32.869m

Largeur totale : 2.430m

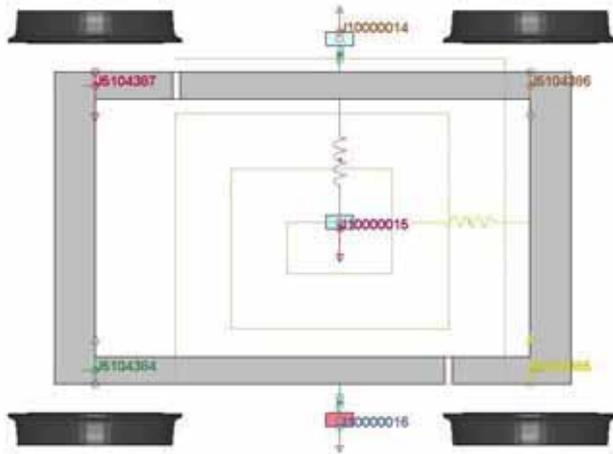
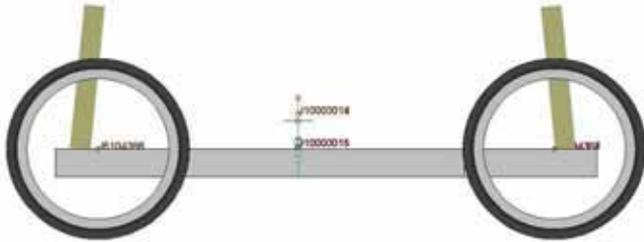
Hauteur totale : 3.270m

Masse totale : 39.690t

Nombre d'éléments de type coque : 23 934

Nombre d'éléments de type brique : 95 104

### 2.3. Bogies

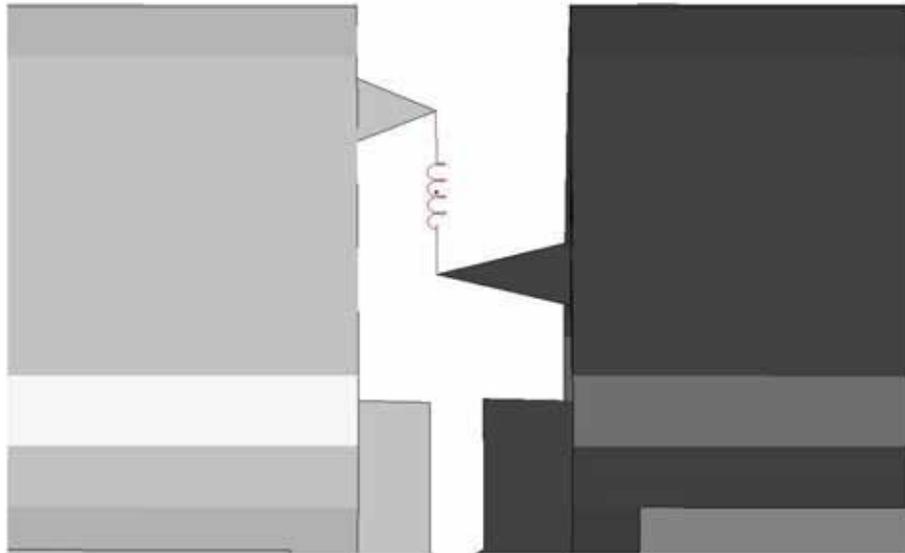


#### Composition :

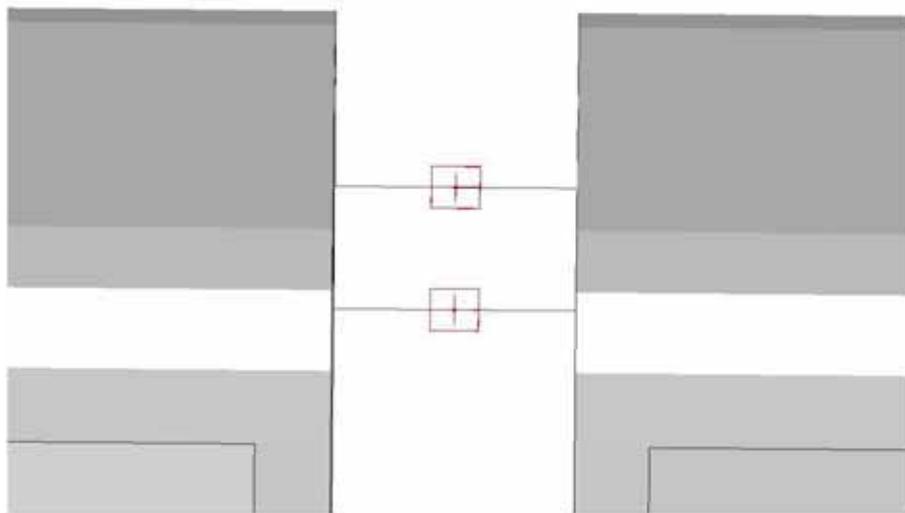
- Une liaison pivot par roue
- Un amortisseur transversal secondaire
- Deux amortisseurs verticaux
- Une barre de traction
- Qatres suspensions secondaire

## 2.4. Liaisons inter-caisse

### Articulation C : Bielle creux-bosses



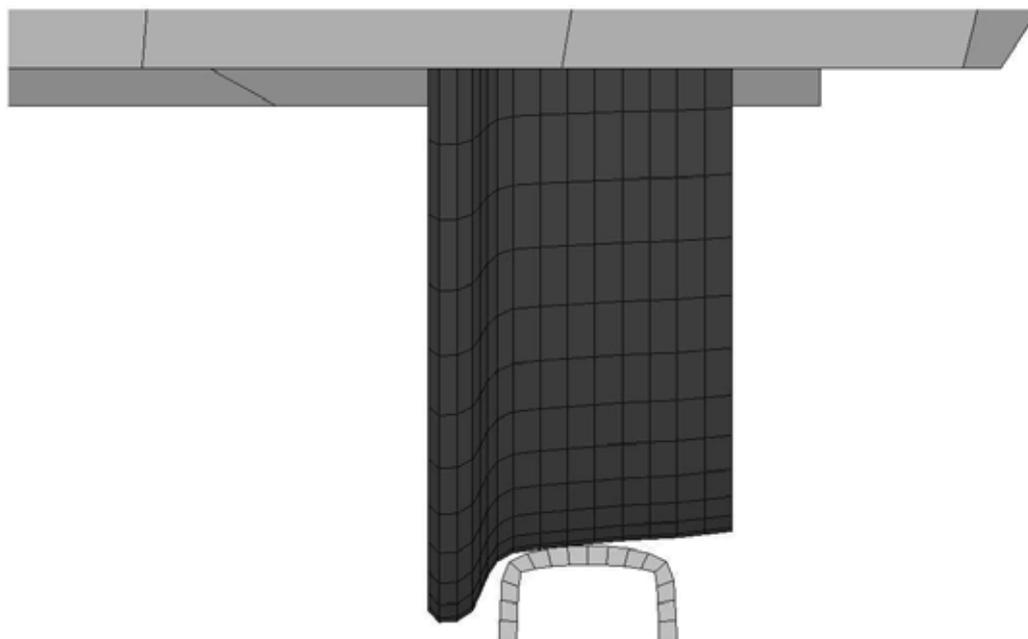
### Articulation D : Amortisseur longitudinal



Articulation rotule basse, entre chaque rame, infiniment rigide.

Articulation rotule haute, entre les caisses motrices et les caisses suspendues, infiniment rigide.

## 2.5. *Interface roue-rail*



Détail du maillage au niveau du contact roue/rail

Les roues ainsi que le profil de rail ont été modélisés en éléments briques infiniment rigides et une interface de contact de type SURFACE\_TO\_SURFACE a été définie.

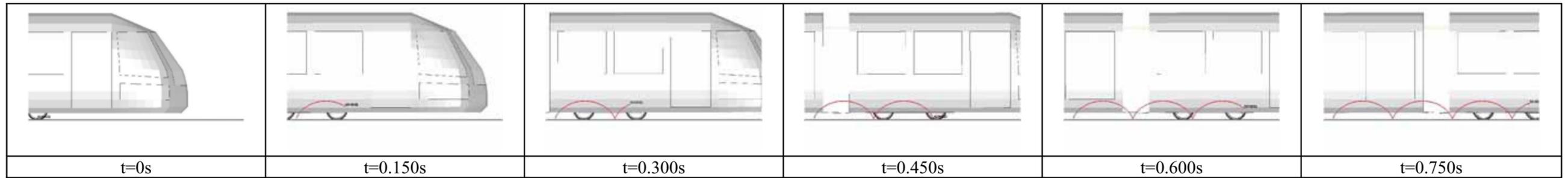
## 2.6. *Evaluation du modèle*

Dans cette partie, deux tests sont présentés afin de démontrer les capacités du modèle.

Le premier essai consiste en une translation simple du tramway sur une portion droite de rail de type U50 à 30km/h.

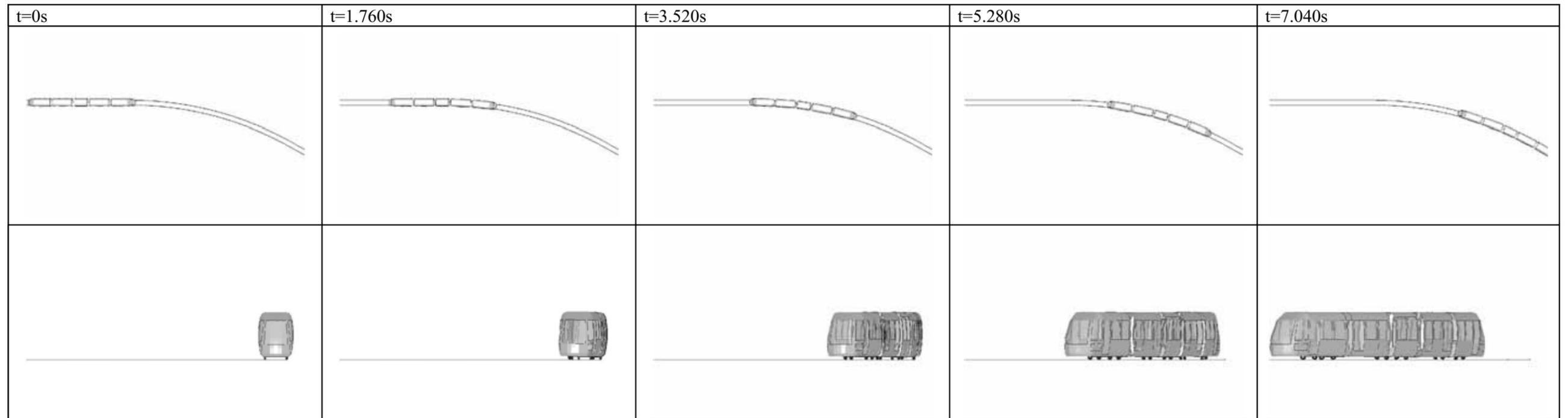
Le second, réalisé avec une portion de courbe de diamètre intérieur égal à 100 mètres permet d'illustrer la capacité d'articulation du modèle. Réalisé à la même vitesse que le modèle précédent et donc, sur un temps très long (environ sept secondes), ce modèle permet également d'illustrer la grande stabilité du modèle.

**2.7. Evaluation du modèle en ligne droite**



Cycloïde obtenue lors d'une translation du tramway effectuée à 30km/h

**2.8. Evaluation en courbe**



Prise d'une courbe de rayon intérieur R=100m à 30 km/h

Toutes les données de vitesse, masses et raideurs ont été fournies et vérifiées par la société ALSTOM.

### 3. Reconstitution du déraillement

#### 3.1. Condition d'accident et plan d'expérience

L'accident à reproduire concerne l'impact d'un véhicule de type Peugeot 308 s'étant engagé sur les voies du tramway, malgré le clignotement du feu R24, en amont de la station Jean Jaurés.

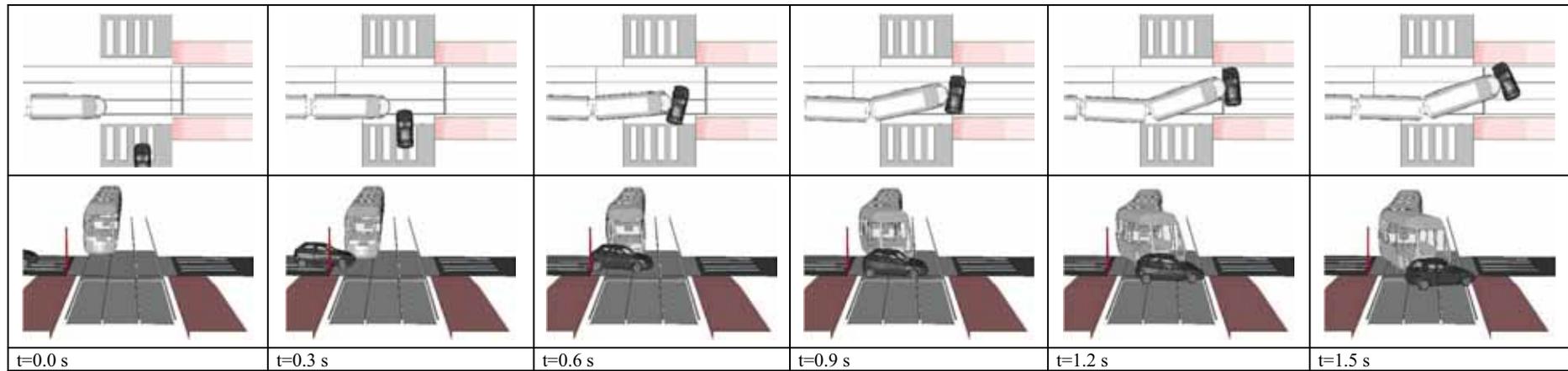
L'impact ayant eu lieu au niveau de la station, une vidéo provenant d'une caméra de surveillance a permis de déterminer la position du point d'impact (roues avant du véhicule centrées entre les rails de la voie, véhicule à 75 cm du R24) ainsi qu'une évaluation de la vitesse du véhicule (entre 29 et 41 km/h). La vitesse du tramway, a pu être déterminée à partir des relevés tachymétriques (entre 20 et 25 km/h)

Afin d'obtenir une bonne corrélation entre les résultats du modèle numérique et l'accident réel et compte tenu des incertitudes sur les paramètres de vitesse des deux véhicules impliqués, le plan d'expérience suivant a été réalisé en conservant le même point d'impact pour toutes les configurations :

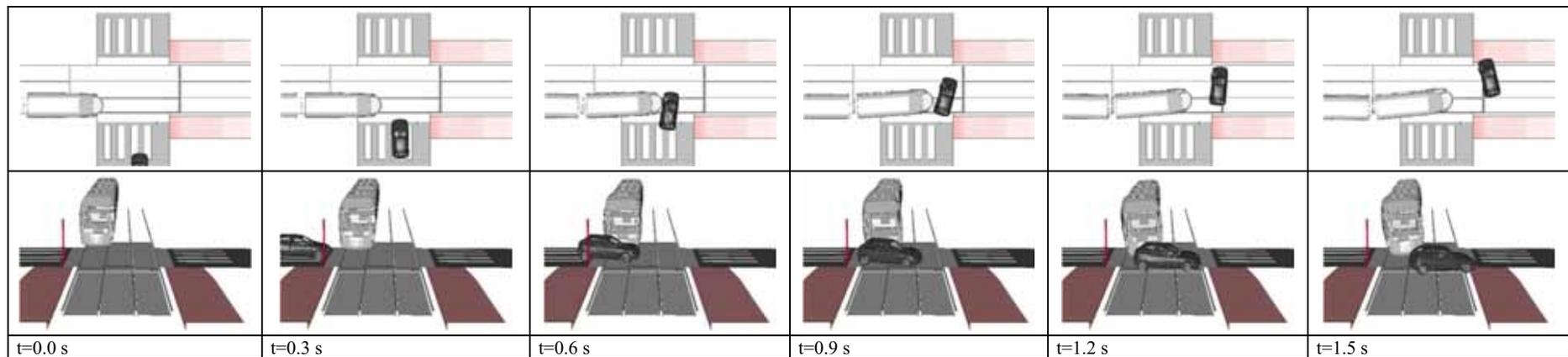
N° essai	1	2	3	4	5	6
Vitesse tramway	25 km/h	20 km/h	25 km/h	20 km/h	25 km/h	20 km/h
Vitesse véhicule léger	41 km/h	41 km/h	35 km/h	35 km/h	29 km/h	29 km/h

Les résultats sont présentés dans les pages suivantes.

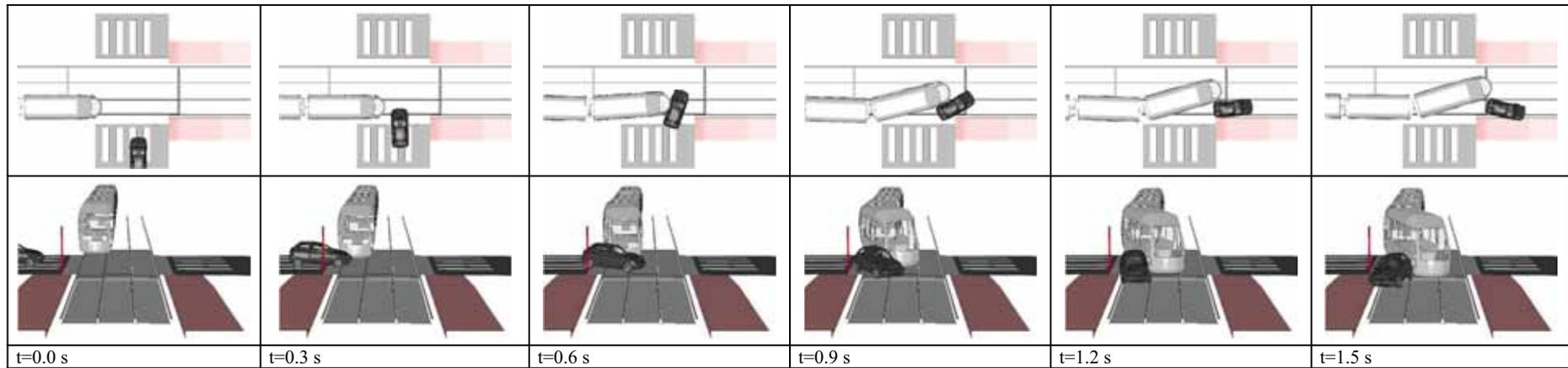
Configuration n°1 (Vtram : 25 km/h – Vvl : 41 km/h)



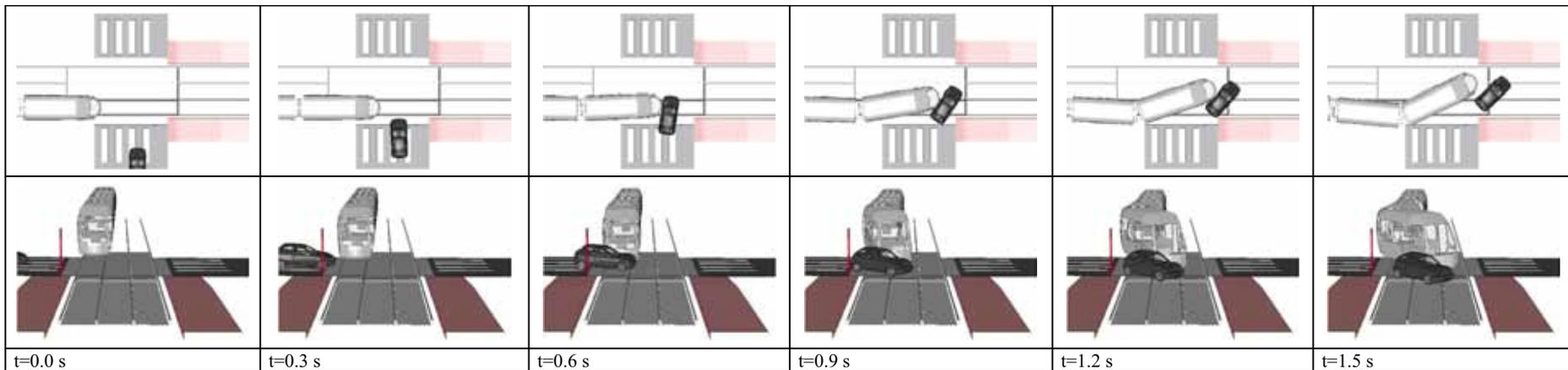
Configuration n°2 (Vtram : 20 km/h – Vvl : 41 km/h)



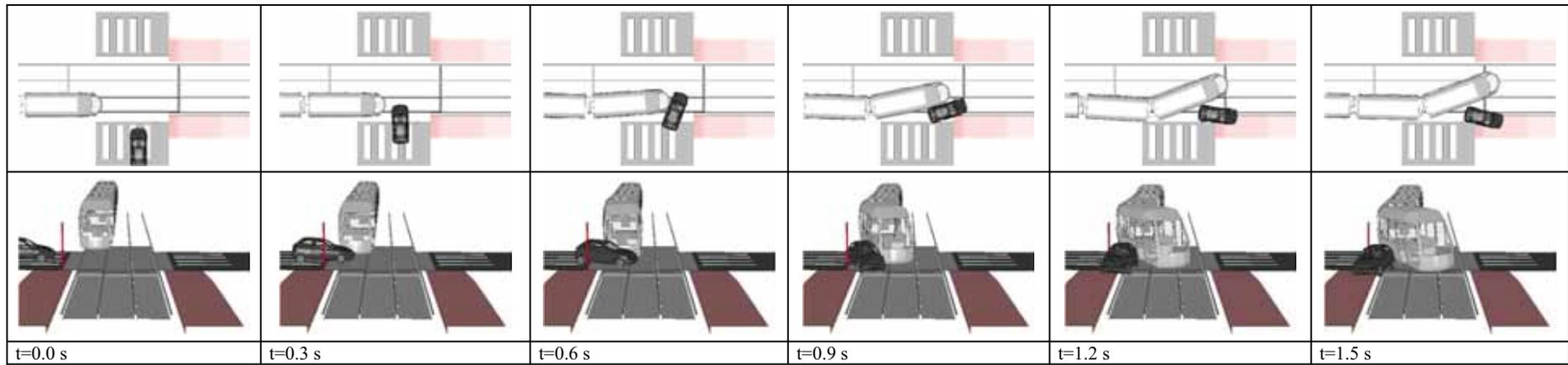
Configuration n°3 (Vtram : 25 km/h – Vvl : 35 km/h)



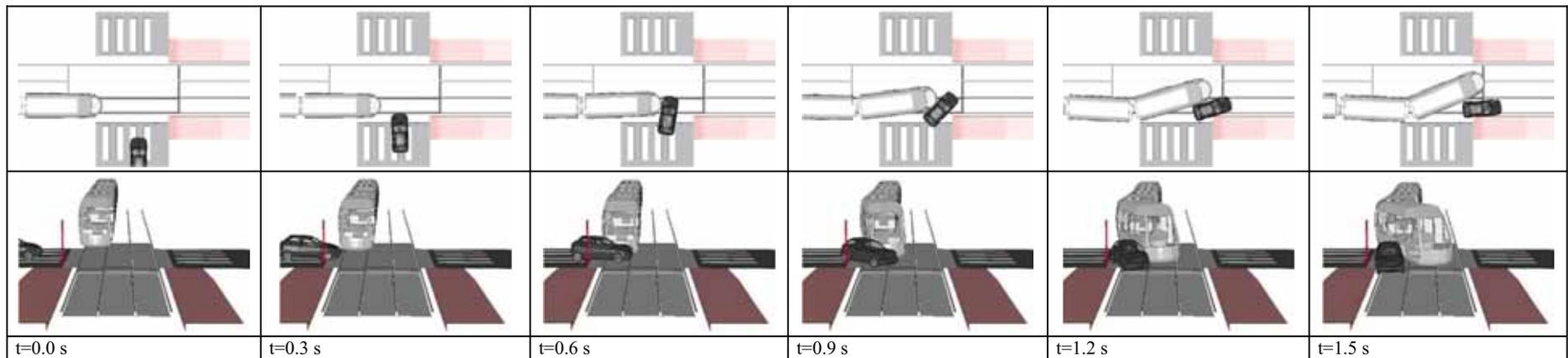
Configuration n°4 (Vtram : 20 km/h – Vvl : 35 km/h)



Configuration n°5 (Vtram : 25 km/h – Vvl : 29 km/h)



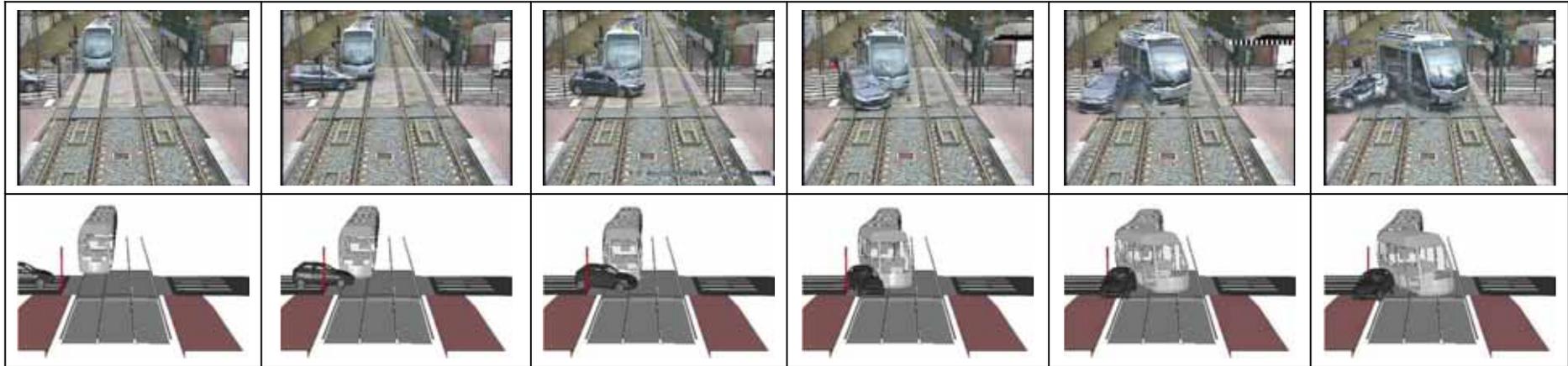
Configuration n°6 (Vtram : 20 km/h – Vvl : 29 km/h)



### 3.2. Etude de corrélation

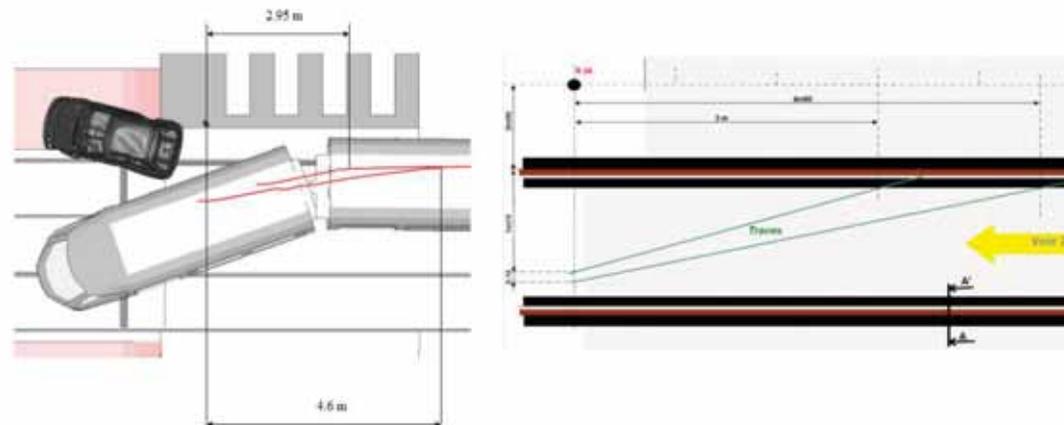
#### Comparaison cinématique :

La meilleure corrélation est obtenue pour la configuration n°5 comme l'attestent les comparaisons ci-dessous :



#### Comparaison des dégâts observés sur site

La comparaison des traces relevées sur le site de l'accident confirme également la bonne corrélation du modèle :



## Comparaison des dégâts véhicule léger

Face avant



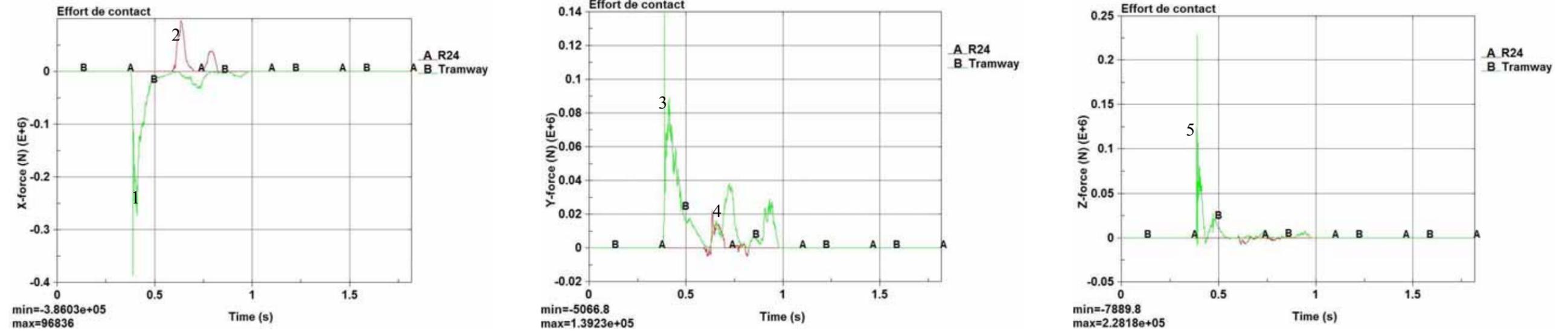
côté impacté par le tramway



côté impacté par le R24



## Interprétation des phénomènes observés



Efforts d'interfaces de contact **tramway/véhicule** et **véhicule/support R24** dans les directions *x*, *y* et *z*

La direction *x*, *y* et *z* correspondent respectivement à l'axe des rails, l'axe perpendiculaire aux rails et à l'axe et à l'axe vertical.

L'impact se décompose en deux phases principales :

- L'impact entre le tramway et le véhicule** caractérisé par des pics d'efforts dans les trois directions (point 1, 3 et 5 des graphiques ci-dessus)
 

La déformation subie par le véhicule léger et l'intrusion du tramway dans celui-ci sont la cause de ces trois composantes d'effort d'amplitudes importantes et comparables. En effet, si la simulation avait été effectuée avec un véhicule infiniment rigide, aucune déformation de l'interface de contact n'aurait pu être observée, et la composante majoritaire aurait alors été en *x*, et la composante *y* aurait été réduite à la seule composante de frottement entre les deux véhicules.

Ces efforts provoquent le déraillement du premier essieu du bogie avant.
- L'impact véhicule/support R24** qui se caractérise uniquement par des efforts dans le plan *xy*. (points 2 et 4)
 

L'impact du véhicule sur le support R24 est transmis au tramway comme l'atteste la correspondance temporelle des pics d'efforts dans les deux interfaces aux point 2 et 4 des graphiques ci-dessus. Ces efforts d'amplitude plus faible que ceux observés lors du premier impact, accélèrent la rotation du véhicule. Cette rotation engendre un transfert de la composante *x* relevée dans l'interface véhicule/support R24 (point 2) en une composante *y* pour l'interface tramway/véhicule (point 4) qui doit provoquer le déraillement du deuxième essieu et accentuer la pénétration du gabarit opposé. On peut noter que l'effort maximal enregistré dans l'interface véhicule/support R24 multiplié par un bras de levier correspondant à une altimétrie moyenne d'application de cet effort sur le support R24 (entre 0.5 et 1mètre) génère un couple bien supérieur au couple de fusilage préconisé par le STRMTG.

### **3.3. Synthèse 1<sup>ère</sup> phase**

Un modèle éléments finis rigide, articulé et suspendu d'une rame de tramway de type CITADIS a été réalisé en intégrant la majorité des informations fournies par la société ALSTOM.

Cette hypothèse forte a été motivée par les faibles déformations observées sur le tramway lors de l'accident.

Deux types de simulations ont été réalisés afin de démontrer le bon fonctionnement du modèle et en particulier ses capacités d'articulations.

Cette modélisation a néanmoins permis de représenter avec une bonne corrélation la dynamique observée sur l'enregistrement de la caméra de surveillance.

La modélisation rigide des différents composants du tramway est sans doute une limitation importante de la modélisation. En effet, tant au niveau du contact roue/rail que de l'interface avec le véhicule, l'infinie rigidité du modèle doit amener à considérer les résultats de l'étude comme une version pessimiste vis-à-vis de l'apparition du déraillement.

En effet, dans le cas de l'interface roue/rail, l'infinie rigidité s'illustre par des rebonds des roues sur les rails lors de la perte de contact pouvant dans certains cas faciliter le déraillement.

Dans le cas de l'interface tramway/véhicule la déformation est concentrée sur le véhicule, impliquant une intrusion importante et un couplage entre le tramway et le véhicule s'accompagnant d'efforts transversaux potentiellement augmentés.

Une étude paramétrique sur les conditions d'impact a été réalisée et a permis de déterminer avec précision les conditions du déraillement observé lors de l'accident survenu le 8/10/2009 à Valenciennes.

En particulier, la configuration n°5 (Vtram 25 km/h et Vvl 29 km/h) est celle qui présente la meilleure corrélation notamment en ce qui concerne la comparaison de la cinématique des deux véhicules, les traces de roue ainsi que des dégâts du véhicule léger.

Dans ce scénario, une étude détaillée des différents efforts de contact a permis de déterminer que le premier essieu a déraillé au moment du choc entre le véhicule et la rame et que, dans un deuxième temps, la rotation du véhicule autour du support R24 a accéléré la rotation de la rame et le déraillement du deuxième essieu.

## 4. Exploration de l'effet des paramètres physiques susceptibles de contribuer à la prévention du déraillement ou à la limitation de son amplitude

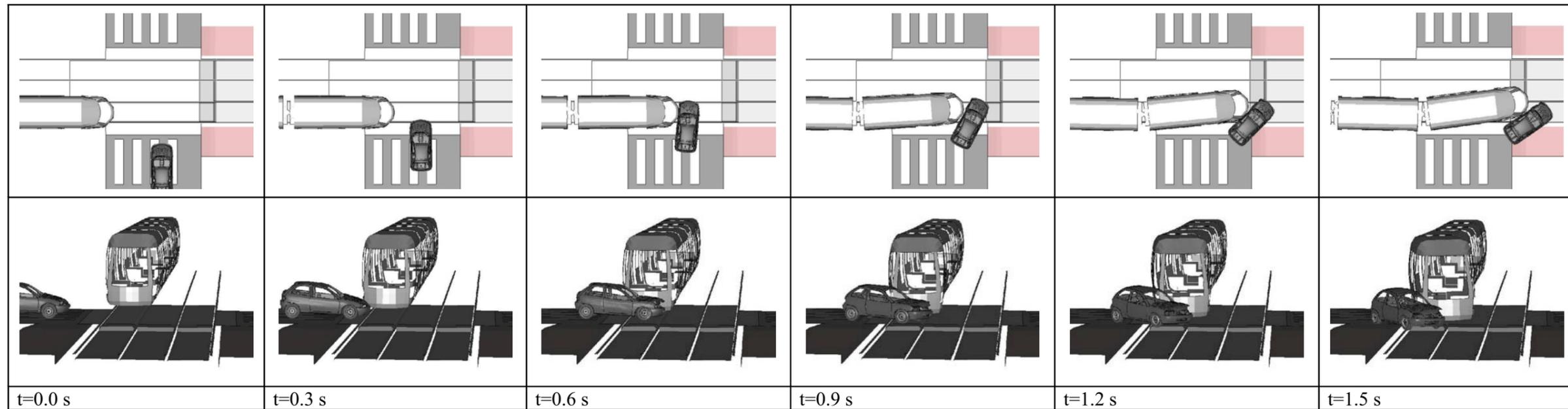
### 4.1. Essai de référence et modifications étudiés

Dans cette phase nous allons étudier la contribution des paramètres présentés dans le tableau ci-dessous à la prévention du déraillement ou à la limitation de son amplitude.

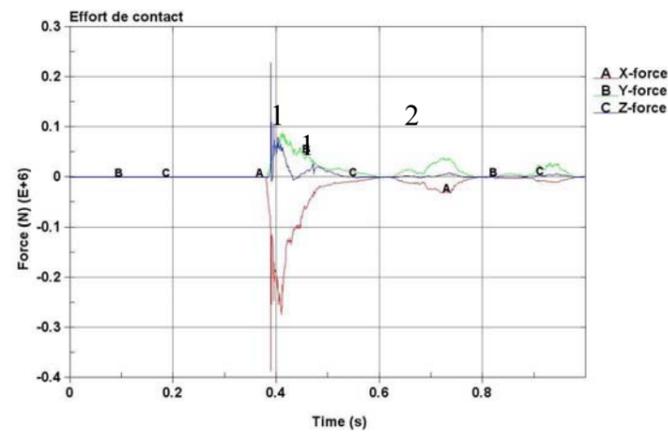
Configuration	Modification apportée	Illustration
1	Essai de référence sans support R24	
2	Rail type 35GPU	
3	Rail type 41GPU	
4	Porte à faux bogie deux mètres	
5	Contre rail	
6	Degré de liberté en plus entre la rame et le bogie	
7	Mentonnet augmenté	
8	Usure roue tramway	
9	Face avant 1	
10	Face avant 2	

Les différents paramètres, présentés dans le tableau ci-dessus, ont varié indépendamment mais toujours sur la base de l'essai de référence. La configuration de référence est celle de la première phase présentant la meilleure corrélation avec l'accident en supprimant le contact entre le véhicule léger et le support R24 afin de mieux apprécier l'effet des paramètres testés.

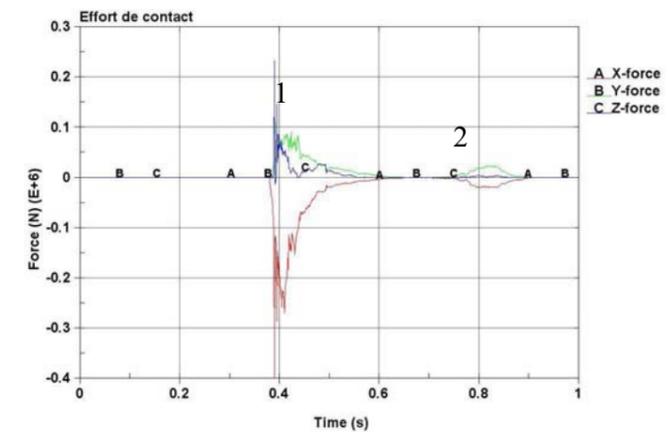
### Configuration n°1 : Essai de référence sans support R24



Nous pouvons observer le déraillement du tramway à  $t=0.5s$  malgré l'absence de support R24.



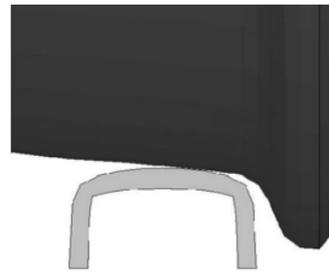
*Avec support R24*



*Sans support R24*

L'analyse des efforts d'interface tramway/véhicule nous montre que les premiers pics, correspondant à l'impact tramway/véhicule sont logiquement inchangés. Cependant, une différence est à noter quant à l'apparition du second pic d'effort, correspondant à un impact secondaire entre le véhicule et le tramway lors de la rotation du véhicule. En effet, la présence du support R24, accélère cette rotation et le second pic apparaît alors plus tôt. En l'absence de support R24, la rotation s'effectue plus lentement sans pour autant supprimer l'impact secondaire.

## Configuration n°2 : rail type 35 GPU

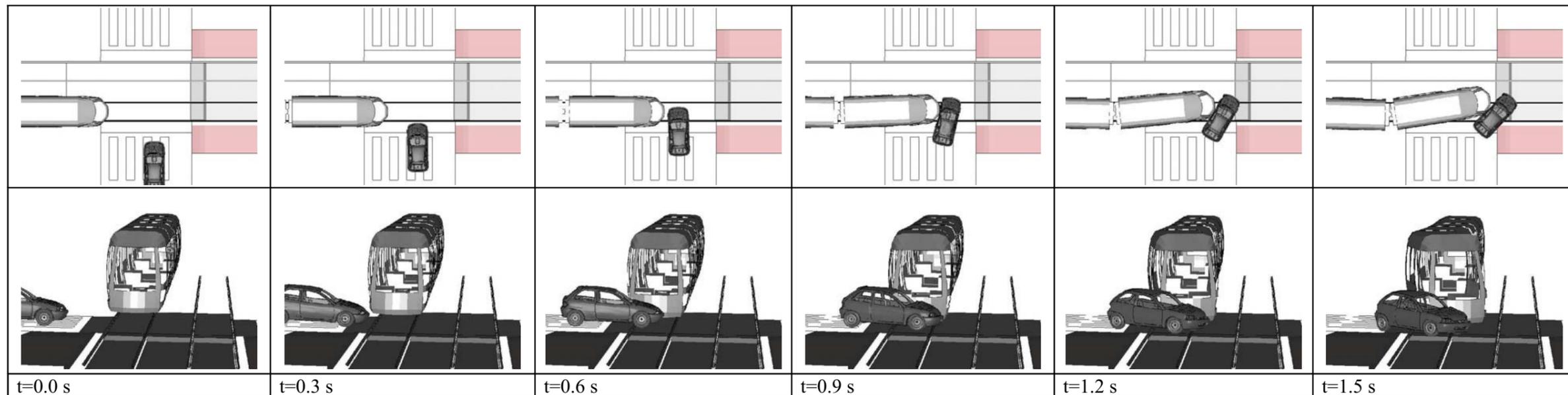


Configuration de référence (rail U50)

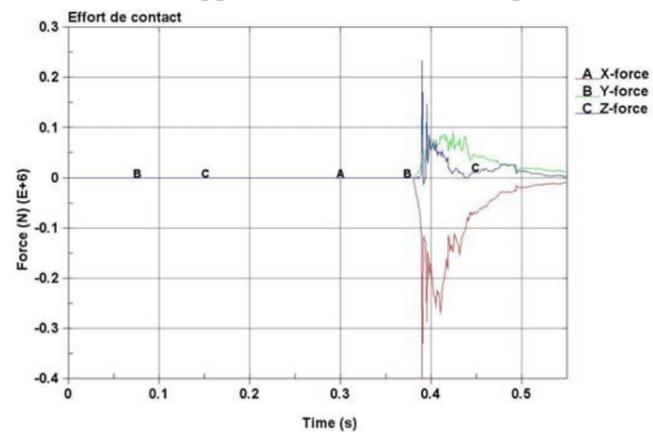


Rail type 35 GPU

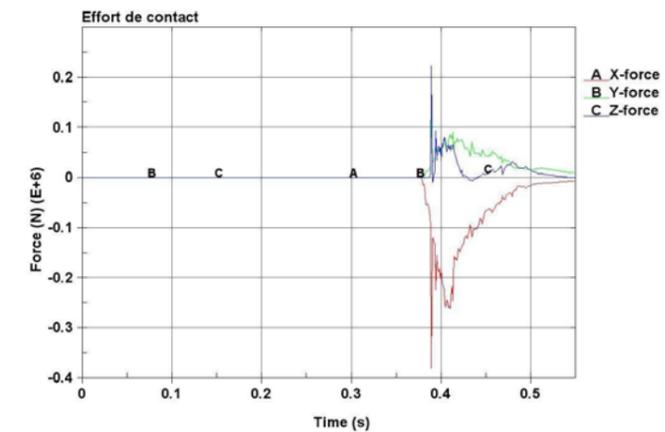
Le rail de type 35 GPU possède une gorge de 45.9 mm de profondeur pour accueillir le mentonnet, ce qui a pour avantage dans notre cas d'avoir un guide des chaque coté de celui-ci espacé de 35.94 mm.



Le changement de type de rail ne suffit pas à supprimer le phénomène de déraillement qui intervient à  $t=0.5$  s. L'analyse des efforts de contact tramway/véhicule nous montre que les efforts appliqués au tramway sont quasiment inchangés et que la modification apportée n'a aucune conséquence sur les phénomènes observés.

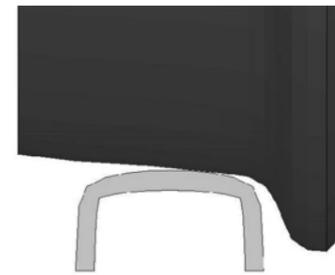


Configuration de référence (rail U50)



Rail 35 GPU

### Configuration n°3 : rail type 41 GPU

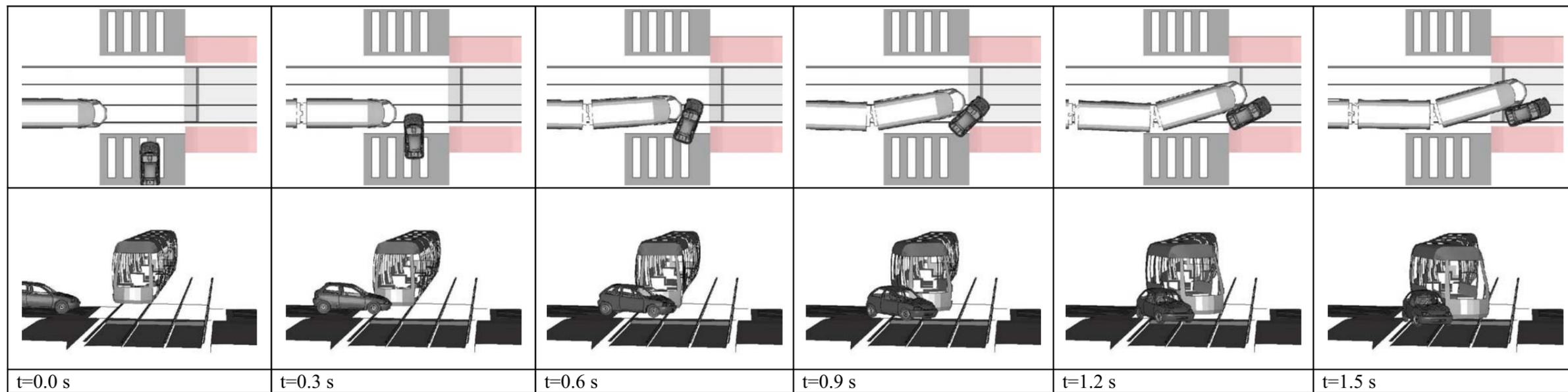


Configuration de référence (rail U50)

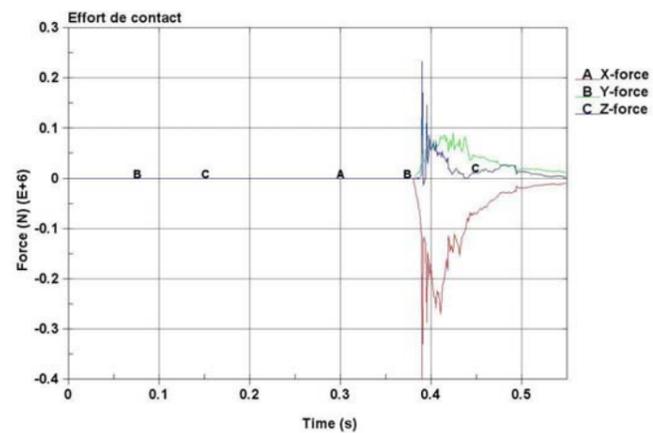


Rail type 41 GPU

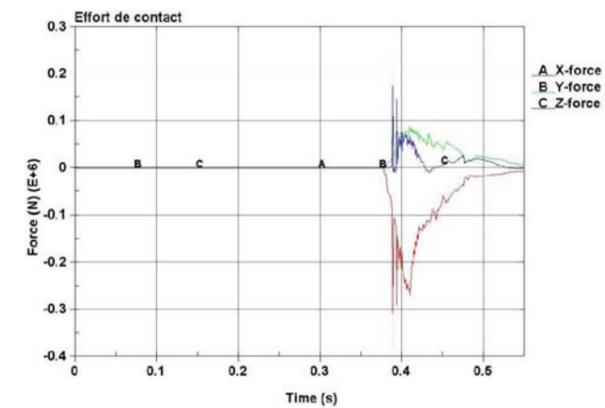
Le rail de type 41 GPU possède une gorge de 45.9 mm de profondeur pour accueillir le mentonnet tout comme le rail de type 35 GPU mais avec une gorge plus large, 40.94 mm.



Le rail de type 41 GPU, à l'instar du rail de type 35 GPU, ne suffit pas à supprimer le phénomène de déraillement qui intervient approximativement à  $t=0.5$  s. L'analyse des efforts de contact tramway/véhicule nous montre que les efforts appliqués au tramway sont quasiment inchangés et que la modification apportée n'a aucune conséquence sur les phénomènes observés.

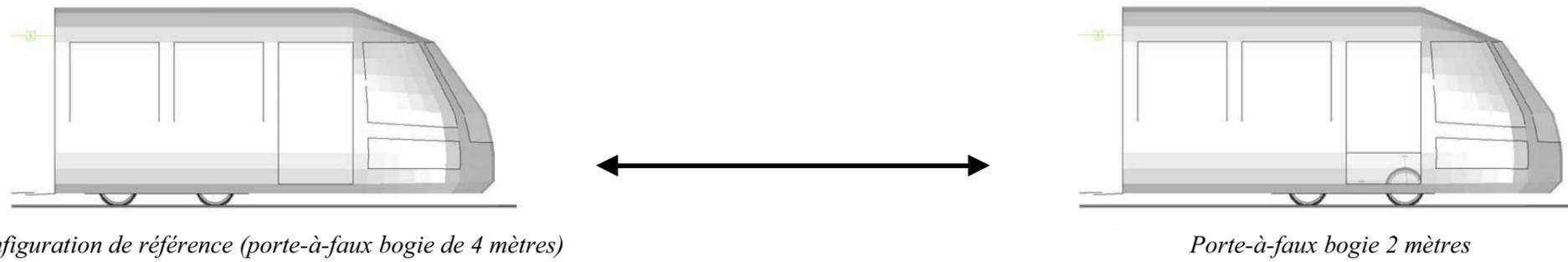


Configuration de référence (rail U50)

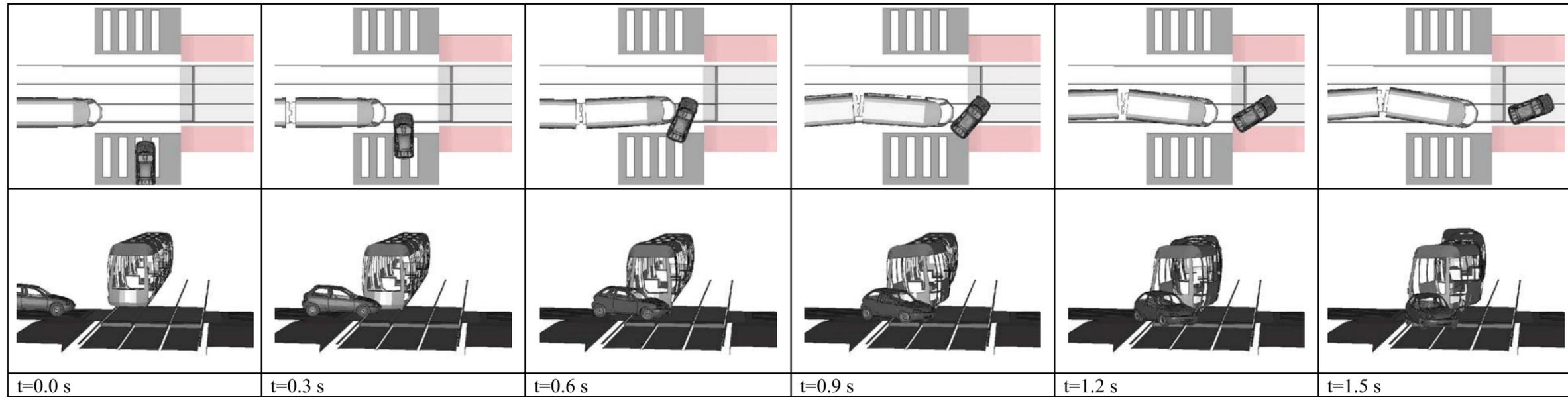


Rail 41 GPU

**Configuration n°4 : porte a faux bogie 2 mètres**

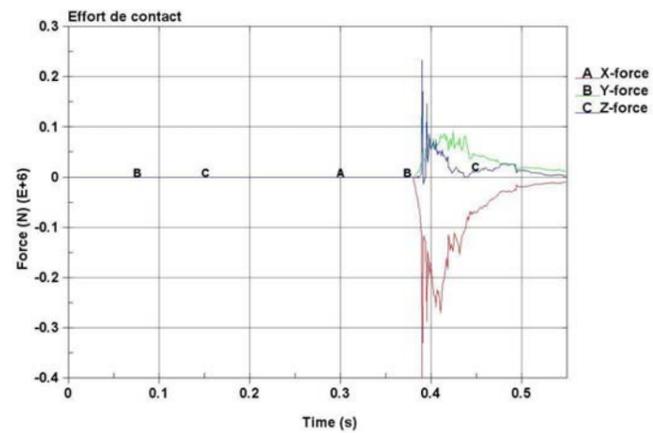


La translation de 2 mètres du bogie vers l'avant de la rame a pour avantage de réduire le porte-à-faux et donc de diminuer la transmission des efforts au bogie.

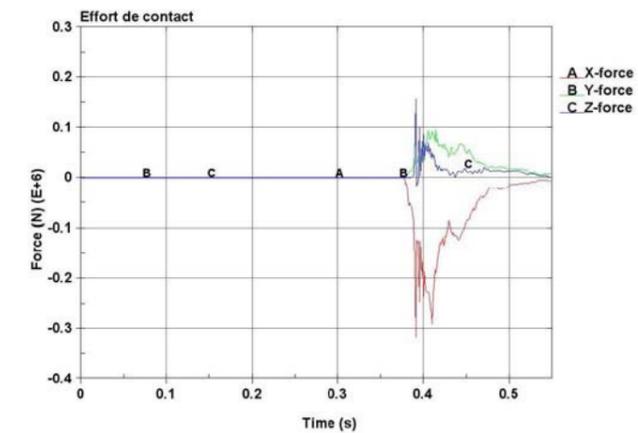


La réduction du porte à faux ne suffit pas à contrer le déraillement du à l'impact qui intervient toujours vers 0.5s.

La réduction du porte-à-faux modifie les efforts enregistrés dans l'interface tramway/véhicule. Cette modification affecte essentiellement la composante verticale de l'effort (valeur du pic) et est sans conséquence sur les phénomènes observés.

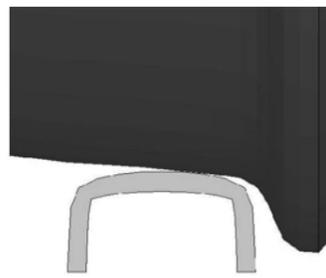


*Configuration de référence (porte à faux bogie de 4 mètres)*



*Porte à faux bogie 2 mètres*

**Configuration n°5 : contre rail**

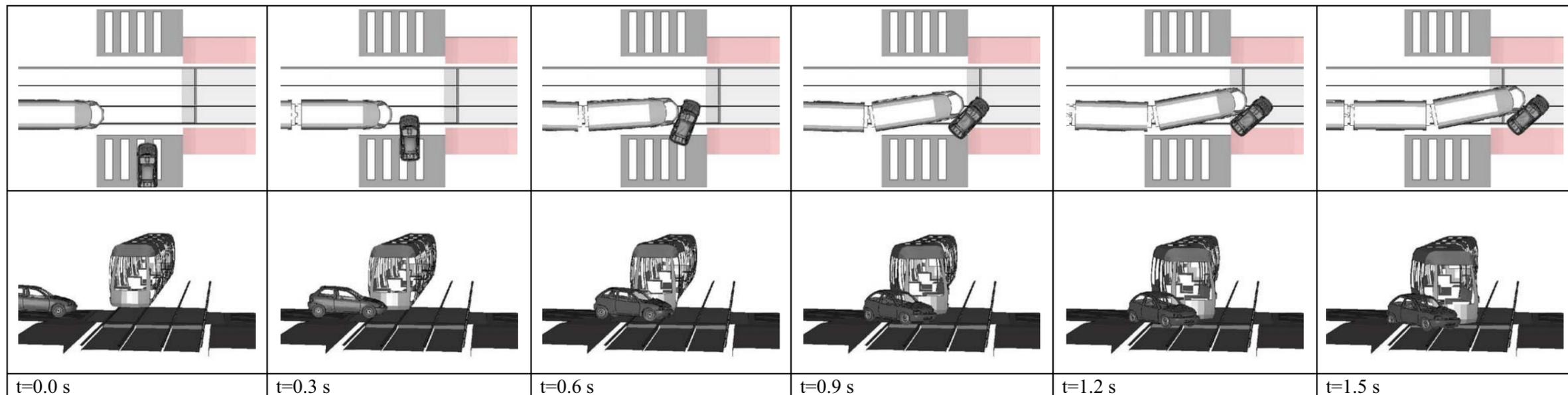


*Configuration de référence (rail U50)*

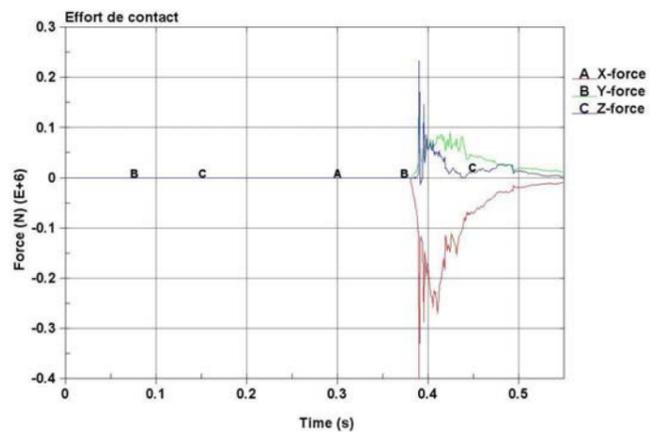


*Rail type 35 GPU avec contre rail*

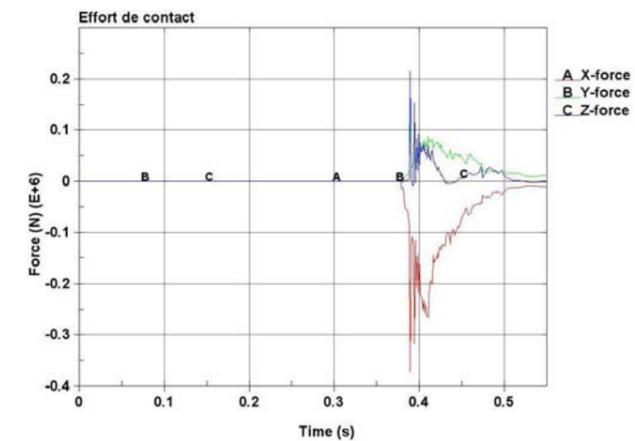
Le contre rail a pour intérêt de guider la face intérieure de la roue sur une hauteur plus importante.



La modification apportée est sans conséquence sur les efforts appliqués au tramway et ne permet pas d'éviter le déraillement qui intervient vers 0.5s.

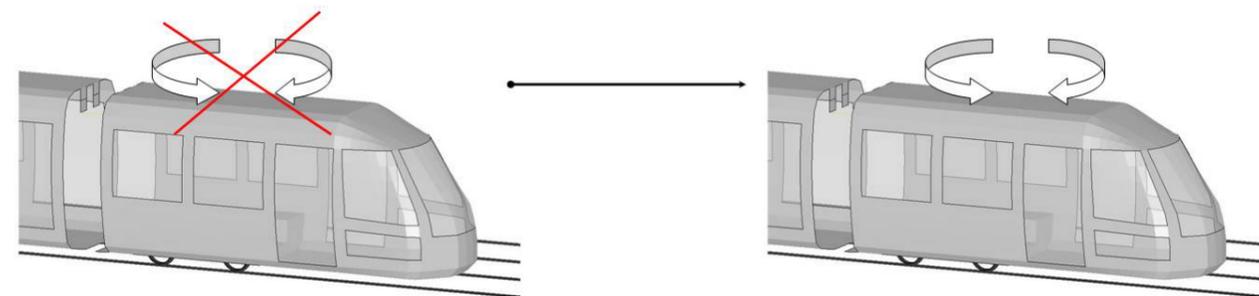


*Configuration de référence (rail U50)*



*Rail type 35 GPU avec contre rail*

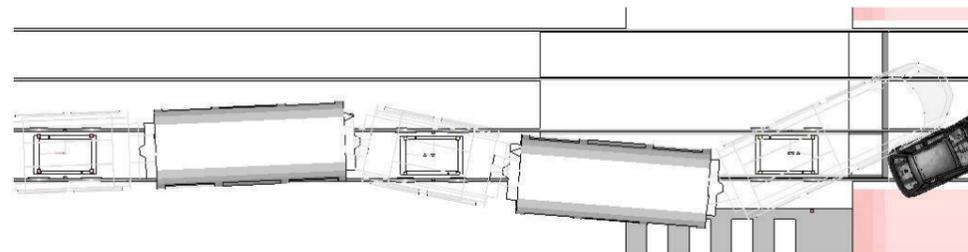
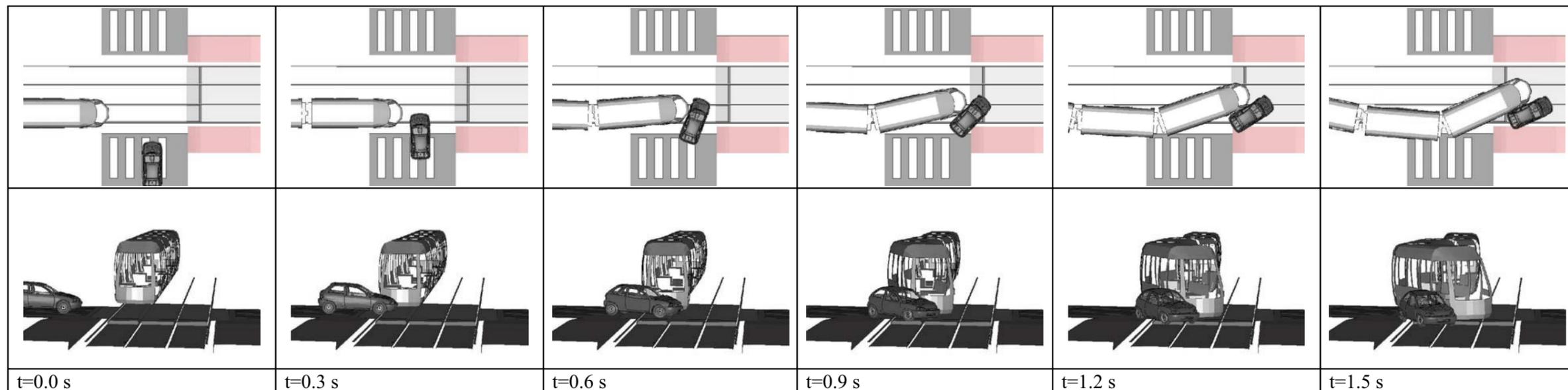
## Configuration n°6 : Degré de liberté en rotation supplémentaire entre la rame et le bogie



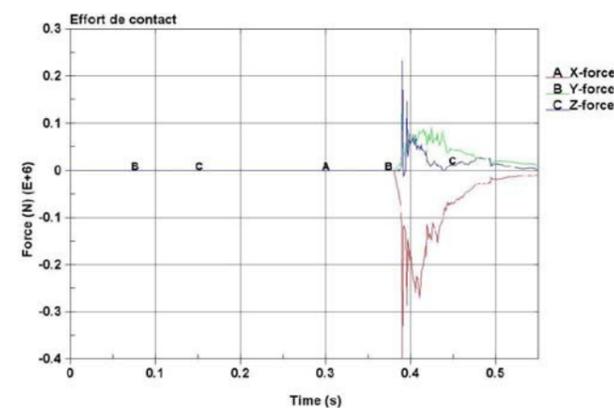
Configuration de référence (pas de rotation)

Articulation supplémentaire en rotation entre la rame et le bogie

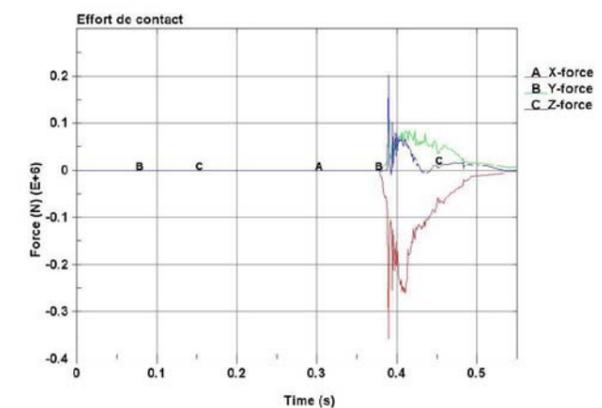
Le principe de rajouter un degré de liberté entre la rame et le bogie autour l'axe Z (axe perpendiculaire au sol) est de ne plus avoir d'efforts en rotation qui puissent transiter par l'intermédiaire du porte-à-faux de la rame.



Détail de la position des bogies à l'instant final



Configuration de référence (pas de rotation)



Articulation supplémentaire en rotation entre la rame et le bogie

Les efforts appliqués au tramway sont inchangés mais leur non-transmission au bogie évite le déraillement. Cependant, la pénétration du gabarit opposé n'est pas résolue et les articulations des rames ne sont pas exploitables en raison de l'absence dans le modèle d'arrêt en rotation. Cependant une piste intéressante pourrait être une étude détaillée de l'articulation entre la rame et le bogie permettant d'atténuer la transmission de ces efforts afin de diminuer la sensibilité au déraillement tout en garantissant une articulation correcte des rames entre elles.

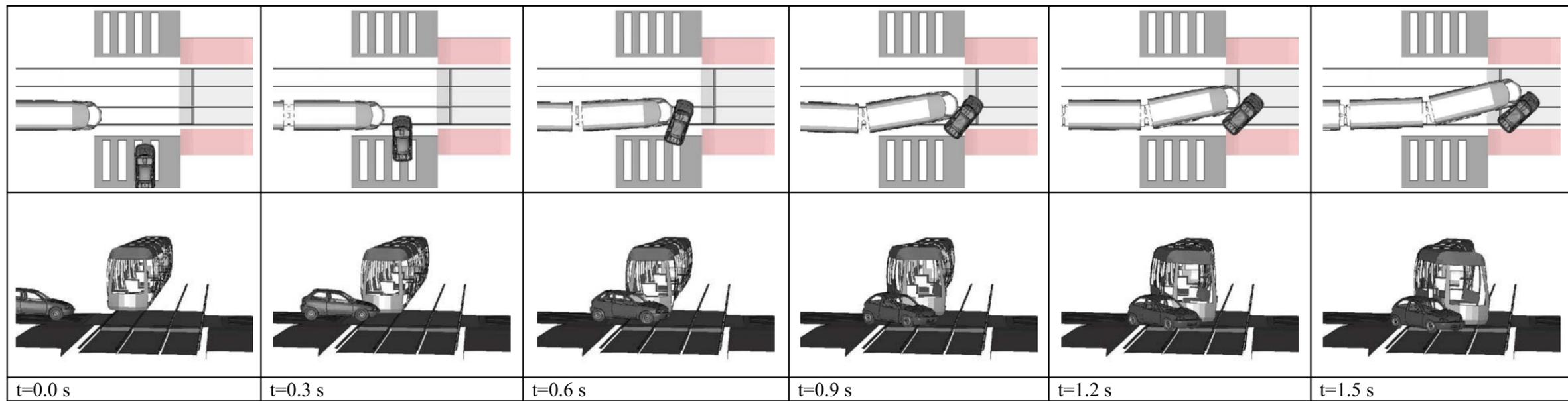
## Configuration n°7 : mentonnet augmenté



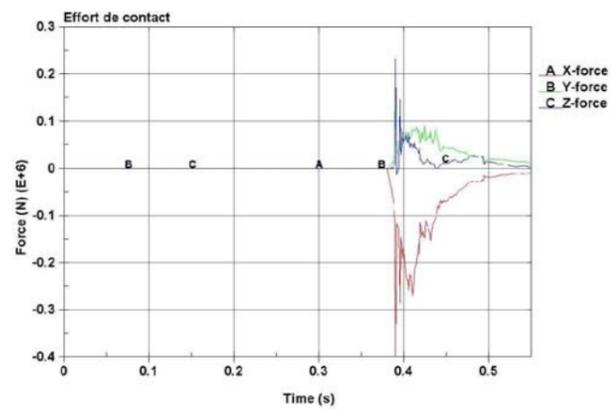
Configuration de référence (roue standard)

Roue « mentonnet augmenté »

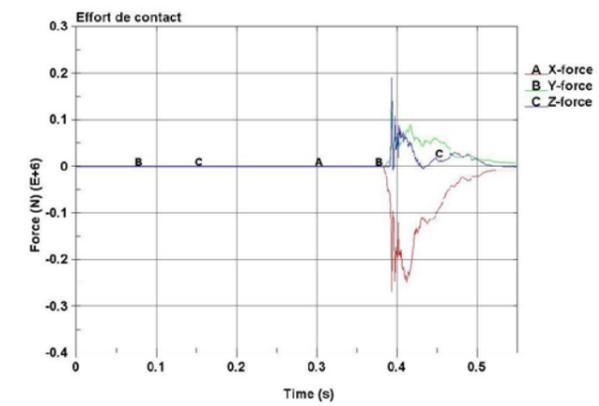
Le mentonnet haut (augmentation de 12.8 mm) a pour avantage d'améliorer le guidage sur le rail.



Pour la même raison que le rail de type 35 GPU ou 41 GPU (avec ou sans contre rail), l'augmentation du mentonnet ne suffit pas à contrer le phénomène de déraillement qui intervient à  $t=0.5s$ .



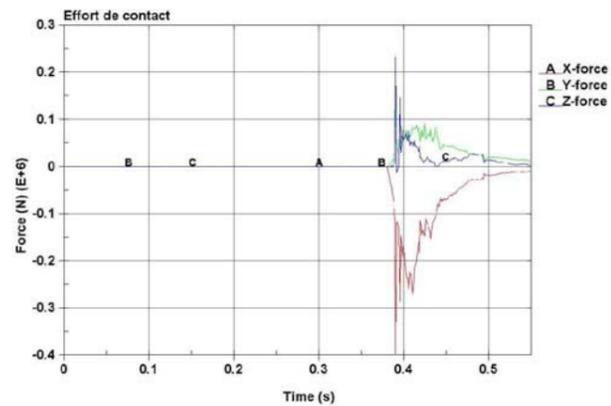
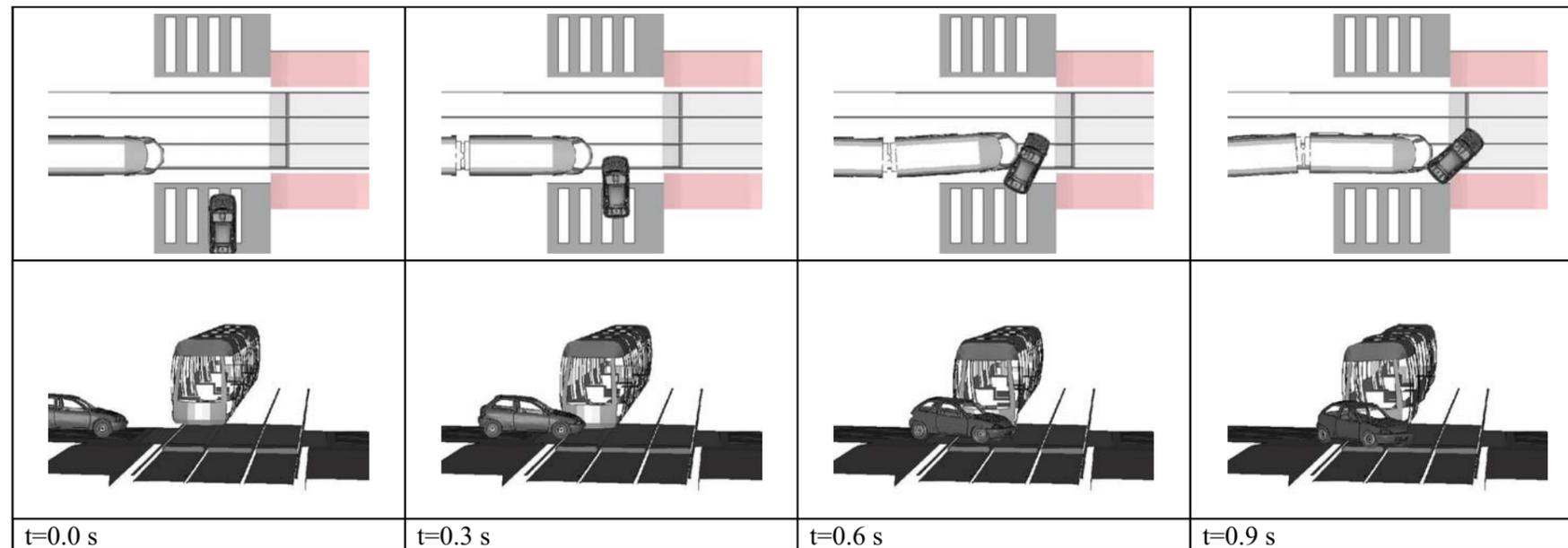
Configuration de référence (roue standard)



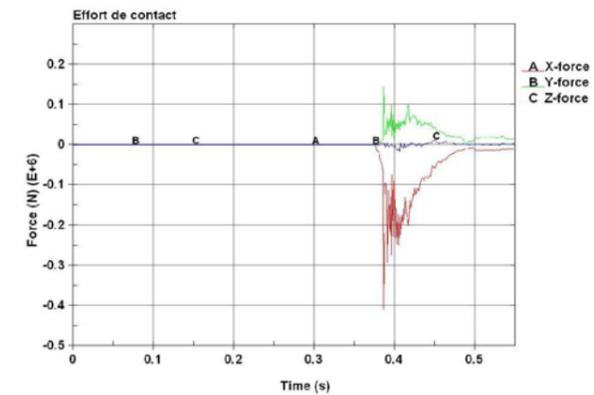
Roue « mentonnet augmenté »

## Configuration n°8 : usure roues

L'usure des roues a pour seule conséquence l'abaissement du centre de gravité du tramway car celle-ci ne change pas le profil des roues, seulement le diamètre de celle-ci est modifié de 590mm à 530 mm.



Configuration de référence (roue standard)



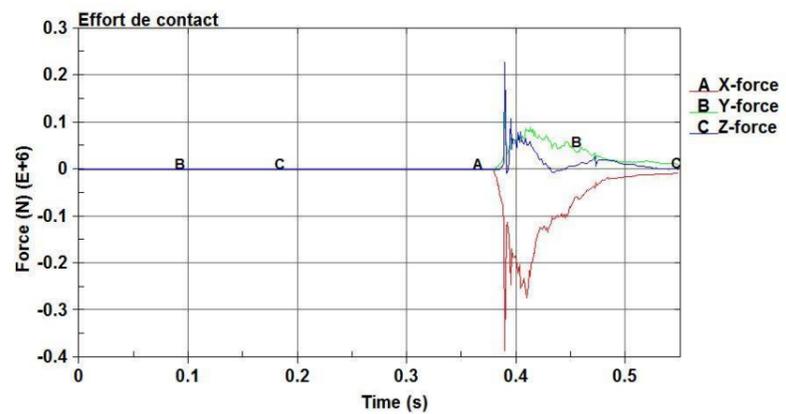
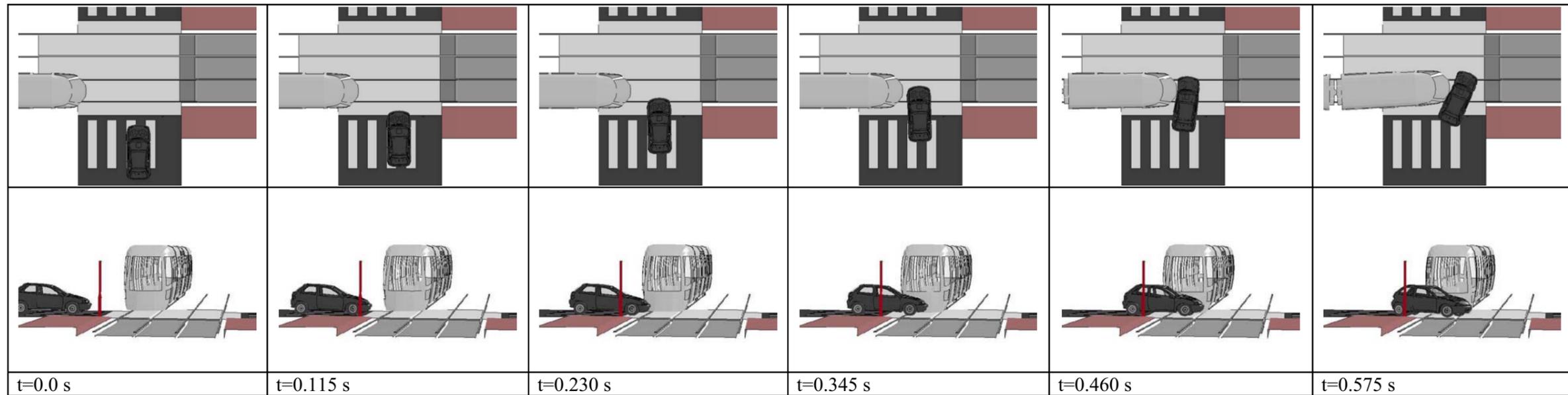
Roues usées

L'abaissement de l'altimétrie du tramway dû à l'usure des roues, bien que faible, suffit à modifier l'interface de contact et donc, les efforts transmis au tramway. En effet, le tramway impacte le véhicule à une hauteur moindre et la déformation engendrée ne permet pas la transmission de la composante verticale de l'effort. Les autres composantes ne sont que faiblement modifiées et suffisent à provoquer le déraillement du tramway

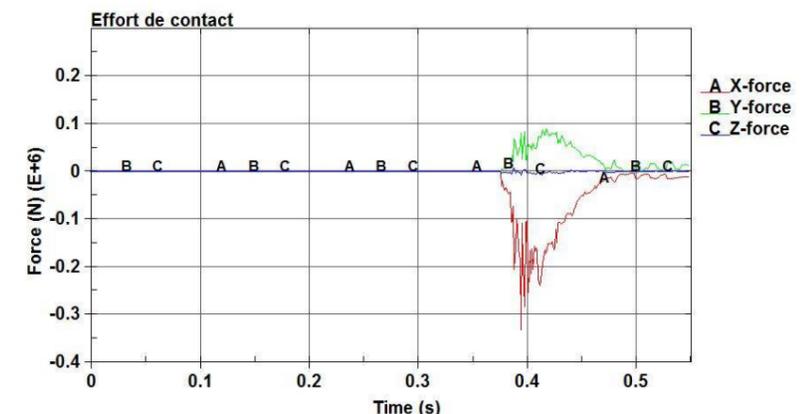
### Configuration n°9 : Face avant 1



La modification concerne le profil de la face avant avec une prolongation de la partie verticale afin d'éviter une transmission d'une composante verticale de l'effort appliqué au tramway.



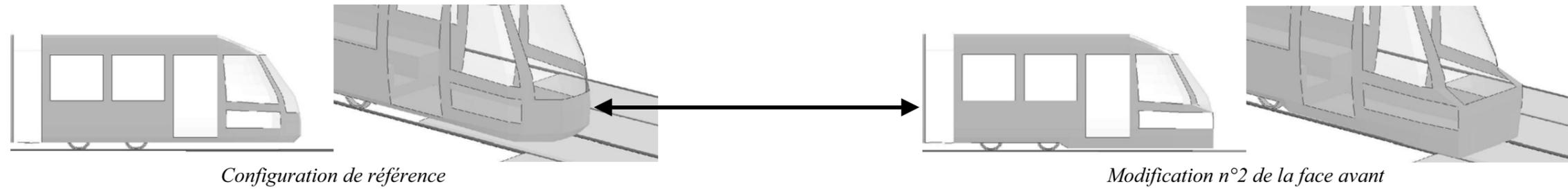
Configuration de référence



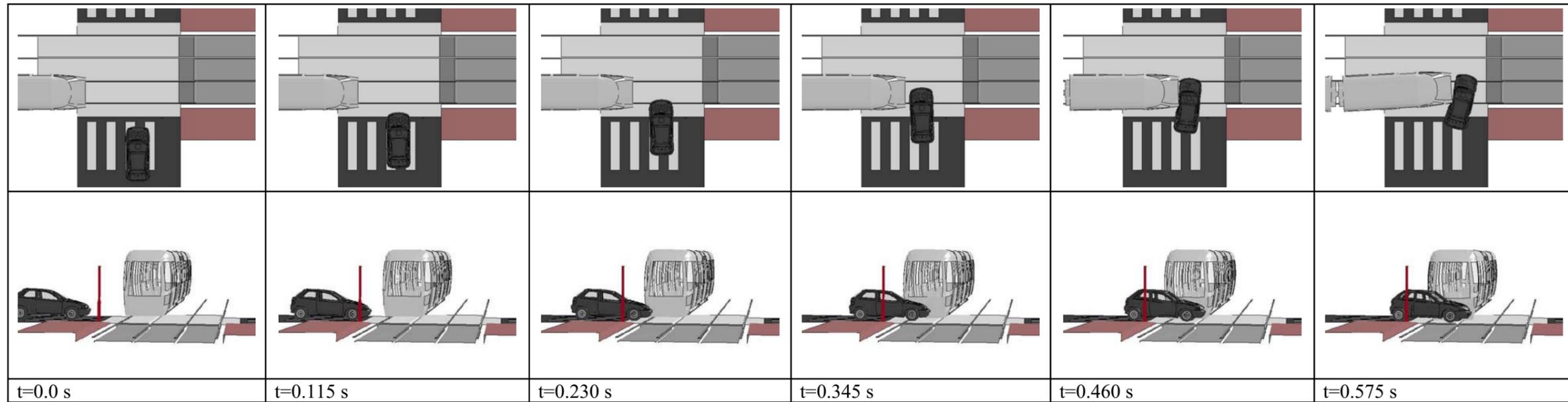
Modification n°1 de la face avant

La modification apportée a l'effet escompté. La composante verticale de l'effort appliqué est annulée. En particulier, une face avant plus basse permet d'impacter le véhicule à une hauteur inférieure à celle du bas de caisse et permet d'éviter une déformation de l'interface de contact qui génère, dans la configuration de référence, une composante verticale de l'effort. Cependant les deux autres composantes de l'effort ne sont pas modifiées et suffisent à provoquer le déraillement.

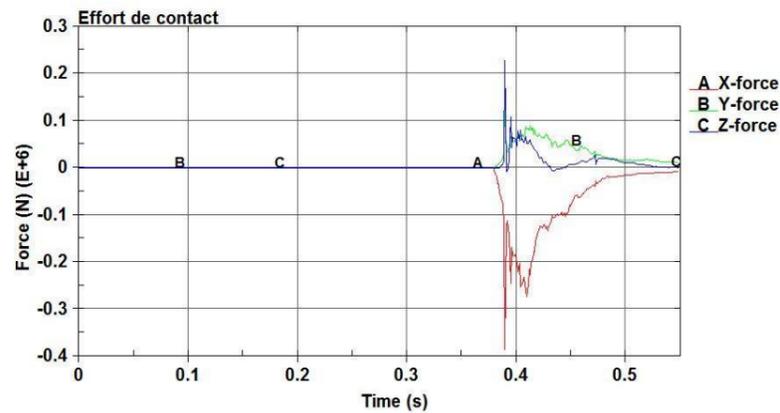
## Configuration n°10: Face avant 2



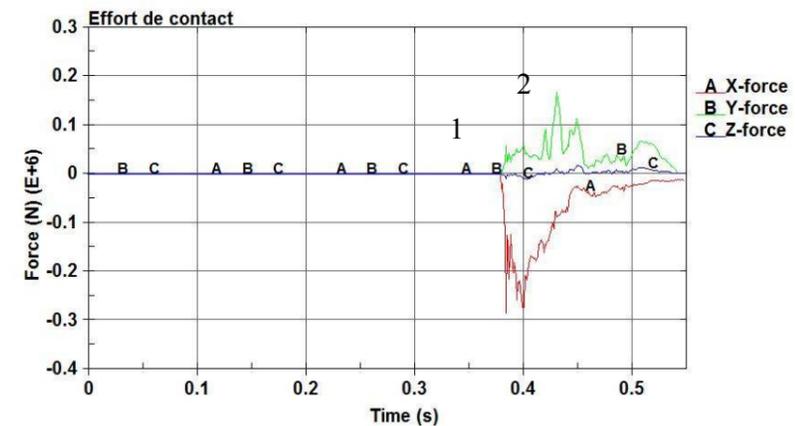
La modification concerne le profil de la face avant avec une prolongation de la partie verticale afin d'éviter une transmission d'une composante verticale de l'effort appliqué au tramway (conformément à la modification n°1 de la face avant) ainsi qu'à une réduction de la partie arrondie jusqu'à l'obtention d'une face avant plane et orthogonale à l'axe des rails. L'objectif attendu était la suppression du couplage entre le tramway et le véhicule et la suppression de la composante y (perpendiculaire au rail) de l'effort.



La modification apportée n'a pas l'effet escompté. A l'instar de la première modification la composante verticale de l'effort appliqué est bien annulée. La composante y de l'effort est bien diminuée dans les premiers instants de l'impact (1) mais la déformation du véhicule est modifiée et plus sévère (bien que plus tardive) et génère une composante encore plus importante de l'effort (2) qui, logiquement, mène au déraillement de la rame.



Configuration de référence



Modification n°2 de la face avant

## 4.2. Synthèse :

Essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Modification par rapport à l'essai de référence</b>	Sans support R24	Rail type 35 GPU	Rail type 41 GPU	Porte à faux bogie 2 mètres	Contre rail	Degré de liberté supplémentaire	Mentonnet haut	Usure roues	Face avant 1	Face avant 2	
<b>Déraillement</b>	oui	oui	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	
<b>Temps de déraillement (en s)</b>	0.5	0.5	0.5	0.5	0.56		0.5	0.5	0.5	0.5	
<b>Efforts de contact tramway/véhicule</b>	<b>Effort Xmax (N)</b>	386 030	380 060	379 940	316 800	371 390	356 870	267 800	410 040	331 510	284 620
	<b>Effort Ymax (N)</b>	139 230	133 520	133 820	102 390	130 170	124 510	117 130	144 950	89 762	167 740
	<b>Effort Zmax (N)</b>	228 180	223 340	228 630	156 870	216 460	203 420	191 090	16 194	8 779	18 250

La configuration de référence, qui correspond à la configuration de corrélation de la première phase sans support R24. Cette configuration a mis en évidence que le R24 a contribué, dans le cas de l'accident qui nous intéresse, à accélérer la rotation du véhicule léger et donc, à anticiper l'apparition du choc secondaire entre le véhicule et le tramway qui fait dérailler le deuxième essieu.

Seule une des modifications étudiées ne se conclue pas par le déraillement du tramway. Il s'agit de la configuration n°6 dans laquelle un degrés de liberté en rotation a été ajouté entre le bogie et la caisse. Cependant, cette configuration est purement théorique. Notamment, aucune raideur ni butée de rotation n'a été prise en compte et les rotations de caisses obtenues ne sont pas exploitables. Cependant, une étude approfondie de cette liaison pourrait être une piste intéressante pour limiter la transmission des efforts entre la caisse et le bogie.

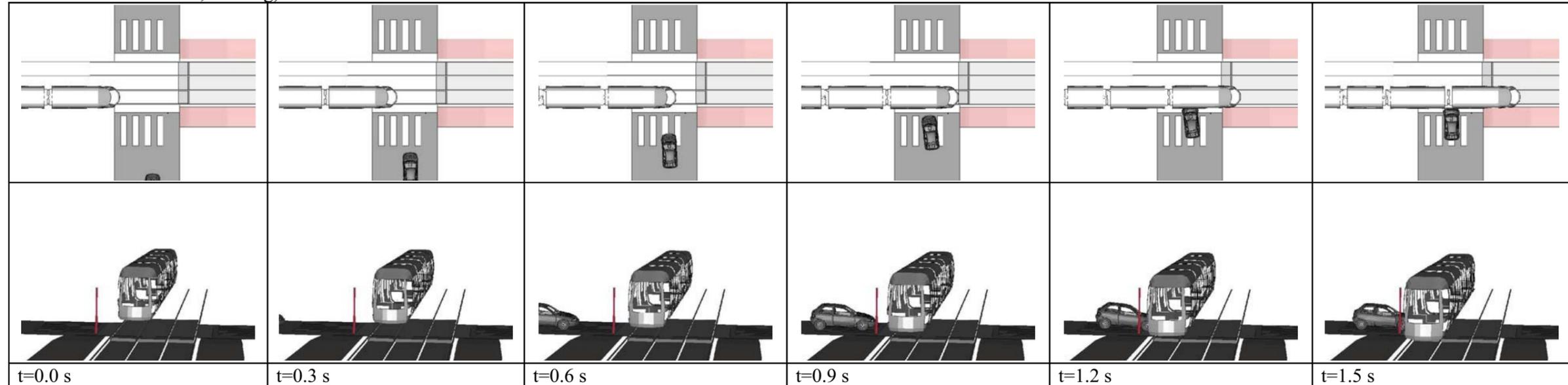
Toutes les autres configurations évaluées mènent au déraillement. Les composantes dans le plan XY de l'effort de contact entre le tramway et le véhicule sont sensiblement équivalentes ce qui traduit le fait que le choc principal est toujours équivalent et responsable du déraillement. Dans les trois dernières configurations évaluées, la composante verticale de l'effort est fortement diminuée ce qui ne suffit pas à éviter le déraillement.

C'est donc la déformabilité du véhicule et le couplage avec le tramway qui en résulte qui génère une composante Y (perpendiculaire à l'axe des rails) importante qui suffit à faire dérailler le tramway.

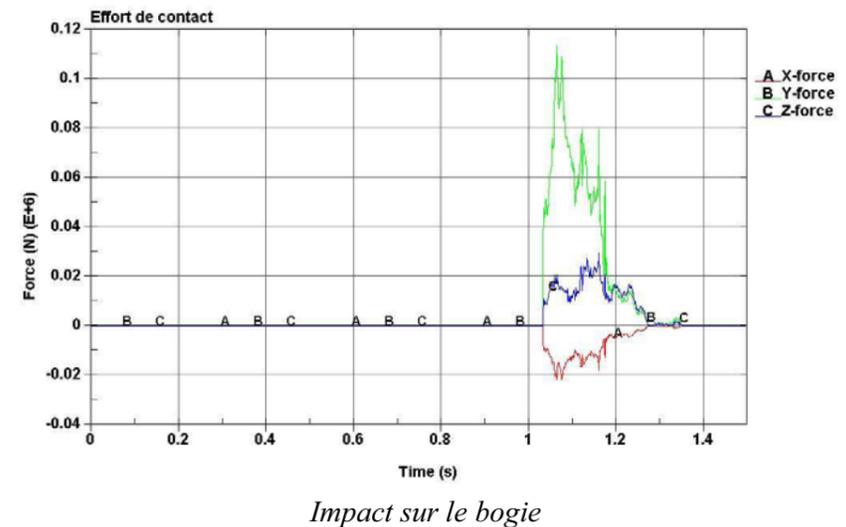
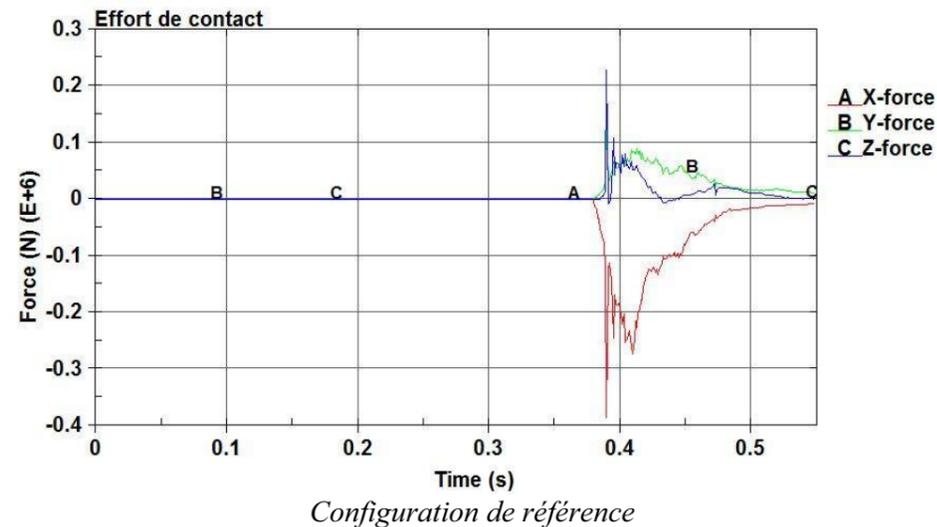
### 4.3. Impact sur le flanc du Tramway

Une configuration d'impact sur le flanc du tramway (point d'impact situé au niveau du bogie) a été effectuée afin d'évaluer l'importance du point d'impact (les autres paramètres sont inchangés).

(Vtram : 25 km/h – Vvl : 29 km/h, 1500 kg)



Nous pouvons remarquer que pour un impact sur le flanc au niveau du bogie avant, le tramway ne déraile pas. Nous pouvons également remarquer la modification importante des efforts d'interface de contact entre le tramway et le véhicule :



On aurait pu s'attendre à une composante Y (perpendiculaire aux rails) bien supérieure à celle obtenue dans la configuration de l'accident. On remarque que la composante y est du même ordre de grandeur mais sur une durée plus importante. La composante verticale est beaucoup plus faible. Ces efforts ne sont pas suffisants pour faire dérailler le tramway. Ces modifications apportées aux efforts d'interfaces s'expliquent par le caractère frontal du choc pour le véhicule. En effet, les véhicules sont conçus pour absorber une énergie importante en cas de choc frontal, ce qui permet de limiter l'effort appliqué. De plus l'impact étant situé directement sur le bogie, aucun porte-à-faux ne vient augmenter l'influence de cet effort.

#### **4.4. Etude sur le fusilage du support R24**

La reconstitution de l'accident de Valenciennes dans la première phase de cette étude a mis en évidence que le déraillement du premier essieu avait eu lieu lors de l'impact entre le tramway et le véhicule léger. Il a également été démontré que l'impact du véhicule avec le support R24 accélérât la rotation du véhicule et provoquait une apparition plus rapide du choc secondaire entre le véhicule et le flanc du tramway.

L'objet de la présente partie de l'étude est :

1. d'examiner si, dans certaines configurations, l'obstacle fixe que constitue le support R24 non fusible peut aggraver les conséquences d'une collision entre le tramway et un véhicule en étant le facteur de déraillement de la rame,
2. De déterminer la valeur de « fusilage » de cet obstacle permettant d'éviter le déraillement.

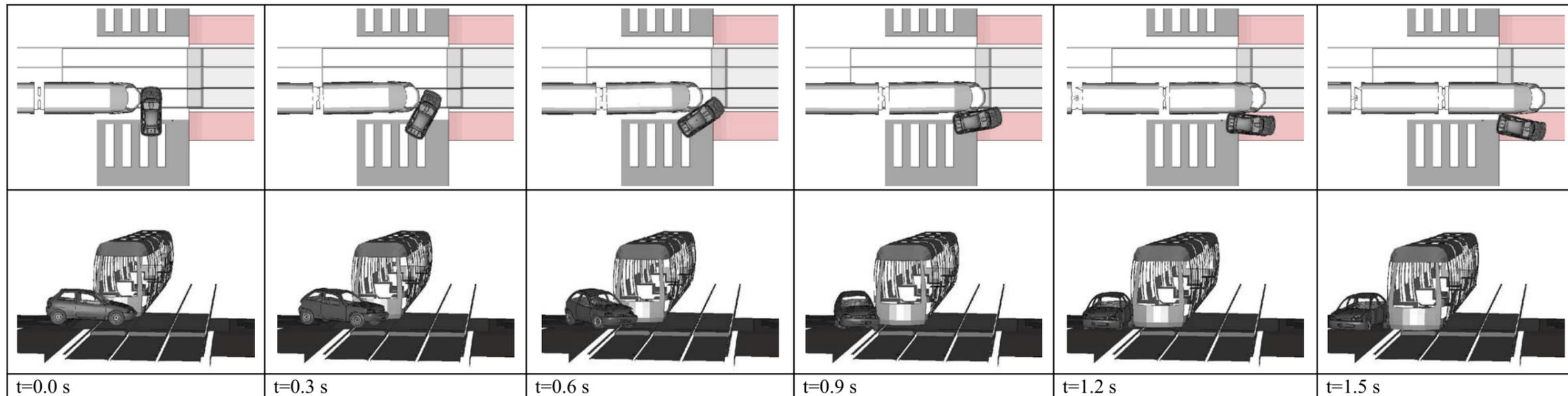
Les conditions initiales de l'accident de Valenciennes ( $V_{tram}=25\text{km/h}$ ,  $V_{vl}=29\text{ km/h}$ ,  $P_{vl}=1500\text{ kg}$ ) ne permettent pas d'atteindre cet objectif dans la mesure où le premier essieu avait déjà déraillé avant l'impact du véhicule sur le support R24.

Nous cherchons donc 3 configurations de simulation suivantes :

- sans support R24 : pas de déraillement
- avec un support R24 non fusible : la rame déraile
- avec un support R24 fusible dont la valeur de « fusilage » est déterminée de sorte à éviter le déraillement

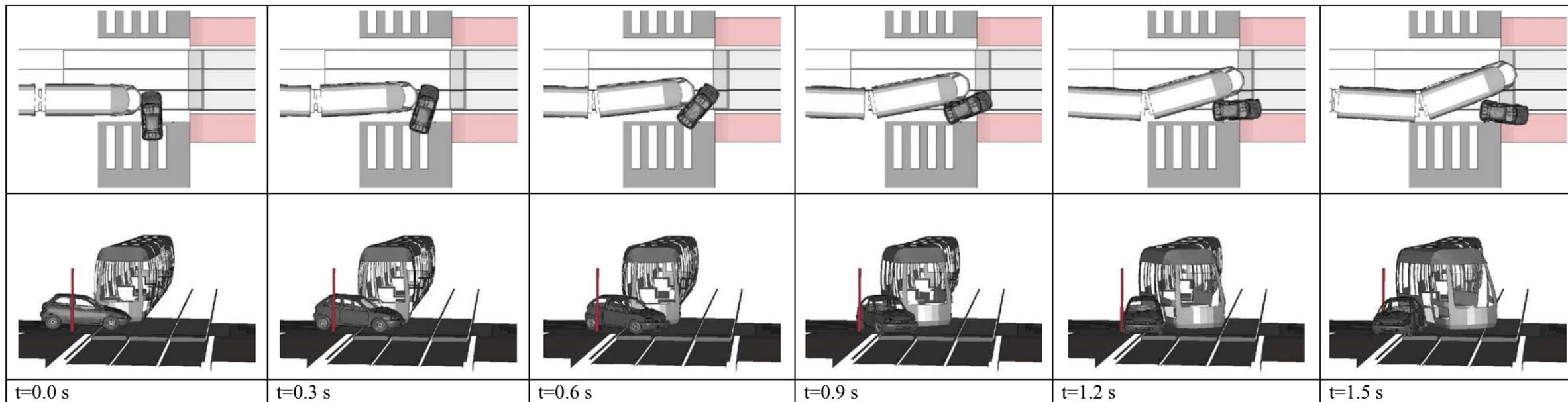
Dans une phase préliminaire à cette partie de l'étude les conditions suivantes ont été déterminées :  $V_{tram}=25\text{km/h}$ ,  $V_{vl}=0$  (i.e. VL à l'arrêt sur la voie),  $P_{vl}=900\text{kg}$ .

**Configuration n°1 : vitesse tramway : 25 km/h, véhicule léger de 900 kg à l'arrêt sur les rails sans support R24**



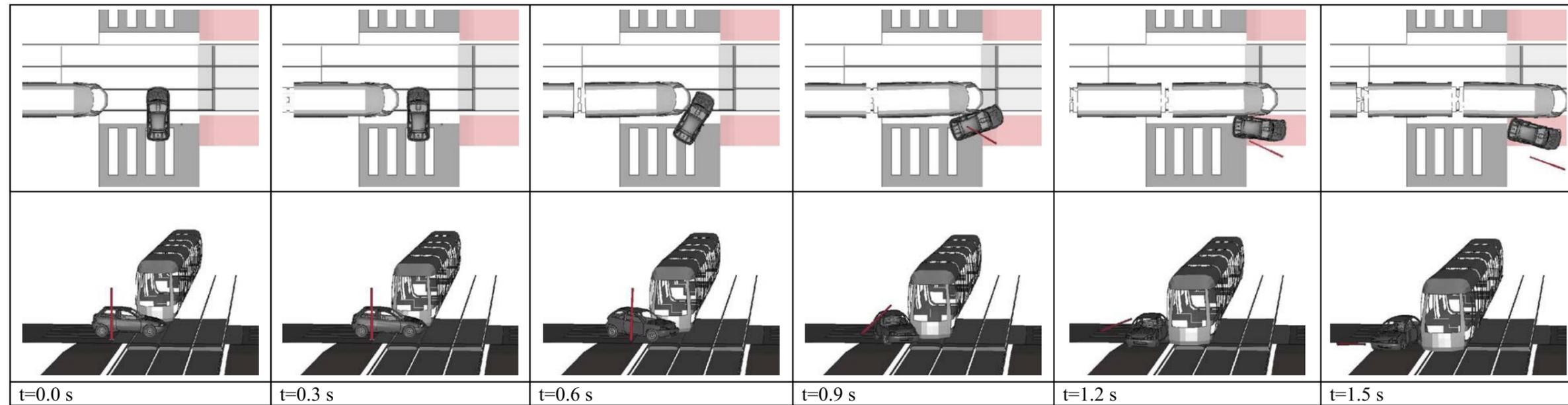
Nous observons le non déraillement du tramway.

**Configuration n°2 : vitesse tramway : 25 km/h, véhicule léger de 900 kg à l'arrêt sur les rails avec support R24 non fusible**



Nous pouvons observer le déraillement du tramway lorsque le véhicule léger vient impacter le support R24.

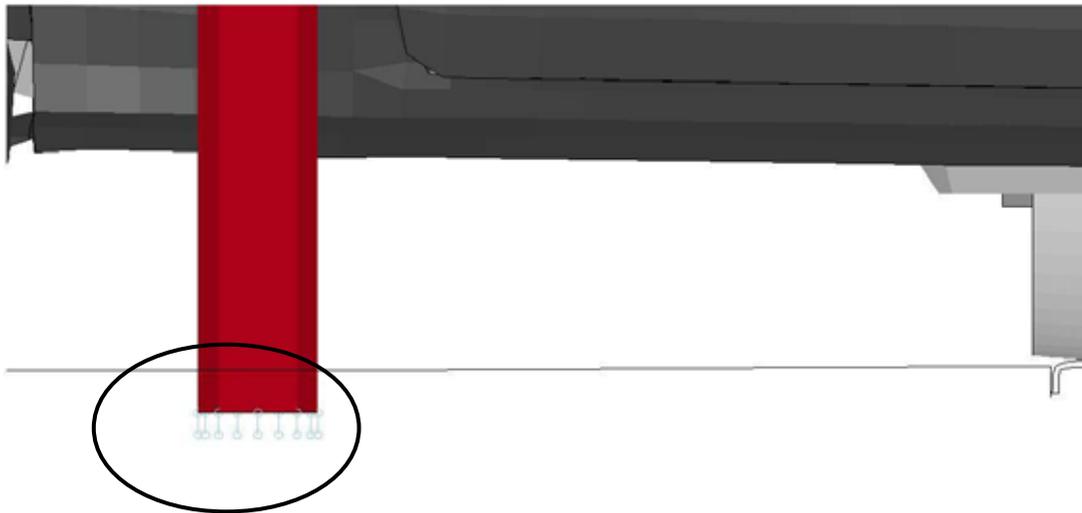
**Configuration n°3 : vitesse tramway : 25 km/h, véhicule léger de 900 kg à l'arrêt sur les rails avec support R24 fusible**



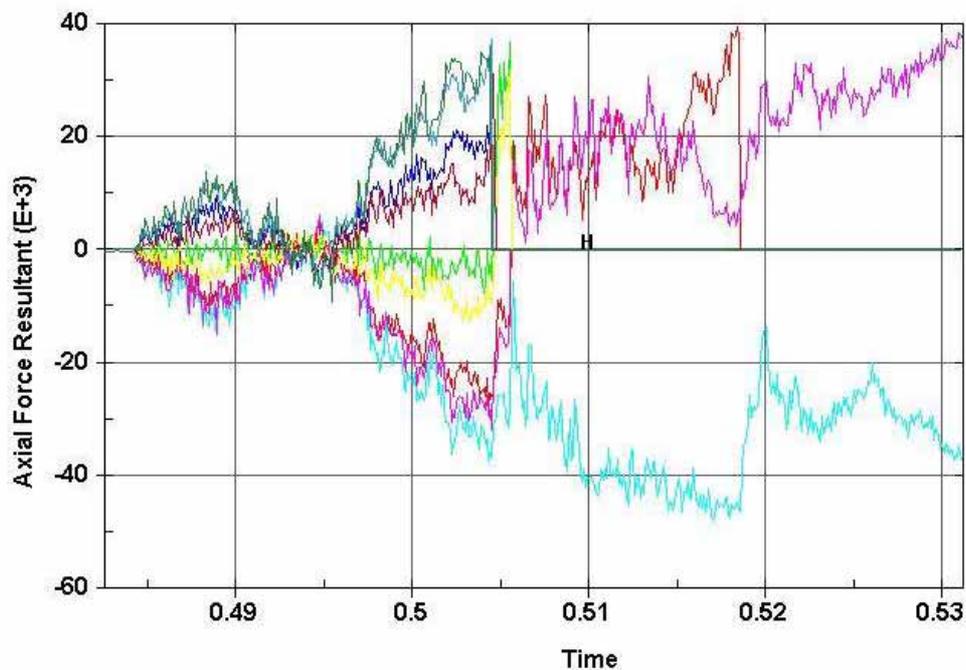
Nous pouvons observer qu'avec un support R24 qui fusible le tram éjecte le véhicule léger sur le bas coté et ne déraille pas, nous retrouvons les mêmes conditions que la configuration n°1. Pour que ceci se déroule ainsi nous avons défini un seuil de fusilage pour le support R24.

## Modélisation du « fusilage »

La liaison du Support R24 au sol est réalisée à l'aide d'éléments de type « poutre ». Cette modélisation simple nous permet notamment de pouvoir donner des caractéristiques mécaniques aux éléments mais également d'enregistrer les efforts transmis en base de support au cours de la simulation d'impact.



Dans la configuration n°2 (avec support R24 non fusible) les efforts de traction suivant ont été obtenus :



Efforts de traction (en N) enregistrés dans les éléments de type « poutre »

Dans la troisième configuration, afin d'obtenir un « fusilage » du support R24 dès le premier contact avec le véhicule (seule possibilité d'éviter le déraillement) le seuil de rupture des éléments a été fixé, après analyse des courbes précédentes, à 15 000N ce qui correspond à un couple résistant estimé à 672 daN.m.

Il est intéressant de noter que cette valeur est de 178% supérieure à la valeur du couple de 570 daN.m figurant dans le guide du STRMTG relatif aux obstacles fixes (permettant de se prémunir d'un écrasement excessif de la voiture engageant l'espace de survie des occupants).

## **Conclusion**

Dans cette partie, nous avons démontré que l'obstacle fixe que représente à support R24 non fusible peut aggraver les conséquences d'une collision entre un tramway et un véhicule léger en participant au déraillement de la rame.

Un « fusilage » calibré de ce type d'obstacle permet d'éviter cette aggravation mais également les phénomènes, mis en évidence dans plusieurs accidents, de déformation excessive de l'espace de survie des occupants de véhicule routier. Un guide du STRMTG définit des exigences techniques pour tout obstacle de plus de 20cm de hauteur. Nous avons vérifié la pertinence de notre « fusilage » par rapport à ces recommandations.

## **5. Discussion et conclusions**

### **5.1. Reconstitution de l'accident**

Une modélisation rigide, articulée et suspendue d'une rame de tramway de type CITADIS a été effectuée, évaluée et validée. Les différentes hypothèses de modélisation ont été discutées dans le paragraphe 3.3.

Une approche paramétrique sur les conditions d'impact a permis d'obtenir une très bonne corrélation compte tenu des informations disponibles, en particulier au niveau de la comparaison de la simulation avec les images de la caméra de surveillance.

Cette corrélation permet également de valider les hypothèses de modélisation de rame et du véhicule.

### **5.2. Variation paramétrique**

L'étude paramétrique effectuée n'a pas permis de mettre en évidence un paramètre qui aurait permis d'éviter le déraillement ou de limiter son amplitude. Une piste intéressante semble néanmoins se dégager de la simulation effectuée avec un degré de liberté supplémentaire en rotation entre la caisse et le bogie. En effet, même si elle n'est pas réalisable en l'état, une limitation de la transmission au bogie des efforts appliqués à l'avant du tramway serait sans doute nécessaire pour diminuer la sensibilité au déraillement des rames.

L'analyse des courbes d'efforts d'interface de contact tramway/véhicule dans les différentes configurations, permet de conclure que la déformabilité du véhicule léger est un facteur important. En effet, dans la configuration de l'accident, le couplage entre le tramway et le véhicule permet l'obtention d'un effort du même ordre de grandeur qu'un choc réalisé directement sur le flanc du tramway.

La limitation de ce couplage par l'intermédiaire d'un élément absorbant une partie de l'énergie d'impact pourrait également être envisagée.

### **5.3. Obstacle fixe**

Il a été démontré que dans l'accident qui a motivé cette étude, le support de type R24 n'était pas la raison principale du déraillement mais qu'il a accéléré la rotation du véhicule et une apparition prématurée du choc secondaire qui fait dérailler le deuxième essieu. Le caractère fusible de ce support n'aurait dans ce cas que peu modifié l'issue de l'impact (comme le prouve la simulation de référence de l'étude paramétrique).

Cependant, il a pu être montré qu'il existe d'autres conditions d'impact au cours desquelles le choc secondaire véhicule/support R24 est à l'origine du déraillement de la rame. Dans ces conditions, la valeur de « fusilage » du support permettant d'éviter le déraillement du tramway a pu être estimée à 672 daN.m. Cette valeur est supérieure à celle de 570 daN.m préconisée par le guide du STRMTG relatif aux obstacles fixes, qui permet d'éviter un écrasement trop important d'une voiture coincée entre un tramway et un support. De fait, le respect de la valeur préconisée permet également de se prémunir du déraillement du tramway lors du choc secondaire.