

# Essais de qualification pour tapis roulants de station de ski

## Rapport analyse biomécanique

Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs  
LBMC UMR\_T9406 Ifsttar-UCBL1

**Veizin Philippe**  
Directeur de Recherche  
Directeur du LBMC UMR\_T9406  
Téléphone : 33 (0)4 72 14 23 79  
Télécopie : 33 (0)4 72 37 68 37  
philippe.vezin@ifsttar.fr

Date : 27/07/2017

Auteur :

Philippe Veizin, LBMC

Signature



Référence sur numéro de contrat :  
Confidentialité :

Marché STRMTG N° 15 05 936 789  
Public



# SOMMAIRE

1. Introduction .....	3
1.1. Contexte .....	3
1.2. Méthodologie proposée .....	3
2. Méthodes d'analyse du risque en Biomécanique de l'impact.....	7
2.1. Statistiques et accidentologie.....	7
2.2. Définition des niveaux de gravité des blessures.....	7
2.3. Critères de blessures.....	9
2.4. Courbes de risques.....	10
2.5. Conclusions .....	11
3. Description du mannequin d'essais de chocs .....	13
3.1. Anthropométrie du mannequin .....	13
3.2. Instrumentation du mannequin .....	13
4. Description des critères de blessures .....	14
4.1. Critères pour la tête .....	14
4.1.1. <i>Head Injury Criterion - HIC</i> .....	14
4.1.2. <i>Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold – GAMBIT</i> .....	15
4.1.3. <i>Critère retenu et courbes de risques associés pour la tête</i> .....	15
4.2. Critères pour le cou .....	16
4.2.1. <i>Neck Injury Criterion - NIC</i> .....	16
4.2.2. <i>Neck Injury Criterion - <math>N_{ij}</math></i> .....	16
4.2.3. <i>Neck Protection Criterion - <math>N_{km}</math></i> .....	17
4.2.4. <i>Critère retenu et courbes de risques associés pour le cou</i> .....	18
5. Résultats .....	22
5.1. Evaluation du critère de blessures tête et des risques lésionnels associés .....	38
5.2. Evaluation du critère de blessures cou et des risques lésionnels associés .....	42
5.3. Comparaison des tapis à deux ans d'intervalle .....	46
6. Conclusions.....	50
7. Références .....	51



# 1. Introduction

## 1.1. Contexte

Dans le cadre de ses missions de conduite d'études, de recherches et expertises, de collecte et d'exploitation des statistiques, de production et de diffusion de documents et référentiels techniques ou de recommandations, le STRMTG a mené depuis 2010 quatre campagnes d'essais sur des tapis roulants à « grande vitesse » de stations de montagne, c'est-à-dire roulant à une vitesse supérieure à 0,7m/s et de 1,2m/s au maximum. L'objectif de ces essais est de mieux caractériser les exigences de sécurité à respecter sur ces tapis à grande vitesse, actuellement non couverts par la réglementation (qui ne couvrent que les tapis de vitesse inférieure ou égale à 0,7m/s) et dans la perspective de produire une réglementation nouvelle sur ces types de tapis à grande vitesse.

L'objet de l'étude couvre notamment la mise en œuvre d'analyses biomécaniques suites aux essais déjà réalisés par le passé, et d'effectuer des essais complémentaires. L'ensemble des prestations sont décrites dans l'offre IFSTTAR du 18 septembre 2014.

Le présent rapport concerne l'analyse biomécanique des essais déjà réalisés par le passé, de plus il analyse les essais supplémentaires réalisés dans le cadre du présent marché.

## 1.2. Méthodologie proposée

La méthode pour l'analyse biomécanique plus étendue notamment au niveau du critère de blessures sur le cou est la suivante :

- a) Une revue des méthodes d'analyse en biomécanique des chocs, des critères de blessures existants pour la tête et le cou avec les courbes de risques associées ainsi qu'une hiérarchisation de ces critères en fonction de leur pertinence vis-à-vis de l'étude.
- b) Une détermination de la valeur des critères de blessures retenus. Cette phase sera réalisée par analyse des données expérimentales des essais sélectionnés par le STRMTG et précédemment réalisés. Les résultats des analyses en termes de valeurs de critères lésionnels sont donnés dans le présent rapport.
- c) Une phase d'intégration des données permettant de qualifier la dangerosité des essais sur une personne. Ces données, également présentées dans ce rapport, chiffrent les probabilités d'atteinte des gravités des blessures cotées selon une échelle basée sur un diagnostic médical, l'Abbreviated Injury Scale (AIS), pour les différents essais retenus.

Les essais déjà réalisés concernés sont les suivants :

Ref essai	Type essai	Vitesse (m/s)	Année	Constructeur Tapis
1	mains en avant	0,4	2010	A
2	mains en avant	0,4	2010	A
3	écharpe	0,4	2010	A
4	écharpe	0,7	2010	A
5	mains en avant	0,7	2010	A
6	mains en avant	0,7	2010	A
7	mains en avant	0,4	2010	B
8	mains en avant	0,4	2010	B
9	mains en avant	0,7	2010	B
10	écharpe	0,4	2010	B
11	écharpe	0,7	2010	B
12	écharpe	0,4	2010	B
13	écharpe	0,7	2010	B
14	mains en avant	0,7	2010	B
15	mains en avant	1,2	2010	B
16	écharpe	0,7	2010	B
17	écharpe	1,2	2010	B
18	écharpe	0,7	2010	B
19	écharpe	1,2	2010	B
20	mains en avant	0,7	2010	B
21	mains en avant	1,2	2010	B
22	mains en avant	1,2	2010	B
23	mains en avant	0,7	2010	A
24	écharpe	0,7	2010	A
25	écharpe	1,2	2010	A
26	mains en avant	1,2	2010	A
27	mains en avant	1,2	2010	A
28	Porte sortie latérale	1,2	2010	A
30	mains en avant collées sur le tapis	0,7	2011	C
31	mains en avant collées sur le tapis	0,9	2011	C
32	écharpe avec scratch (côté cou)	0,7	2011	C
33	écharpe avec scratch (côté fixation sur le tapis)	0,7	2011	C
34	écharpe avec scratch (côté cou)	0,7	2011	C
35	écharpe sans scratch	0,7	2011	C
36	écharpe avec scratch (côté cou)	0,7	2011	C
37	écharpe avec scratch	0,9	2011	C
38	écharpe sans scratch	0,9	2011	C
39	écharpe sans scratch	0,9	2011	C
40	écharpe sans scratch (brin mort 60cm)	0,9	2011	C
41	écharpe sans scratch (brin mort 60cm)	0,9	2011	C

Ref essai	Type essai	Vitesse (m/s)	Année	Constructeur Tapis
42	bras en avant	0,7	2011	B
43	écharpe avec scratch	0,7	2011	B
44	écharpe étendue sans scratch	0,7	2011	B
45	écharpe étendue sans scratch	0,7	2011	B
46	écharpe lâche sans scratch	0,7	2011	B
47	bras en avant	1,2	2011	B
48	écharpe avec scratch	1,2	2011	B
49	écharpe lâche sans scratch	1,2	2011	B
50	écharpe sans scratch	1,2	2011	B
51	écharpe lâche sans scratch	0,7	2011	A
52	bras en avant	1,2	2011	A
53	écharpe avec scratch	1,2	2011	A
54	écharpe lâche sans scratch	1,2	2011	A
55	écharpe normale sans scratch (agrafée)	1,2	2011	A
60	bras en avant	1,2	2013	B
61	bras en avant	1,2	2013	B
62	bras en avant	1,2	2013	B
63	bras en avant	1,2	2013	B
64	écharpe	1,2	2013	B
65	écharpe	1,2	2013	B
66	écharpe	1,2	2013	B
67	écharpe	1,2	2013	B
68	écharpe	1,2	2013	B
69	écharpe	1,2	2013	B
70	bras en avant	1,2	2013	B
71	bras en avant	0,7	2013	B
72	bras en avant	1	2013	B
73	bras en avant	1	2013	B
80	mains en avant	0,7	2013	B
81	mains en avant	1,2	2013	B
82	écharpe en avant avec scratch	0,7	2013	B
83	écharpe en avant avec scratch	0,7	2013	B
84	écharpe en avant avec scratch	1,2	2013	B
85	écharpe en avant avec scratch	1,2	2013	B
87	mains en avant	1,2	2013	A
88	écharpe en avant avec scratch	1,2	2013	A
89	écharpe en avant avec scratch	1,2	2013	A
90	écharpe en avant sans scratch	0,7	2013	A
91	mains en avant	0,7	2013	A

Les nouveaux essais réalisés sont les suivants :

Ref essai	Type essai	Vitesse (m/s)	Année	Constructeur Tapis
92	bras en avant	1,2	2015	B
93	bras en avant	1,2	2015	B
94	bras en avant	1,2	2015	B
95	écharpe avec scratch (mauvais protocole)	1,2	2015	B
96	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	1,2	2015	B
97	bras en avant	0,7	2015	B
98	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	0,7	2015	B
98-1	planche sans casque	0,7	2015	B
98-2	planche sans casque	1,2	2015	B
98-3	lâché mannequin sans casque	-	2015	B
98-4	lâché mannequin avec casque	-	2015	B
99	bras en avant	1,2	2015	A
100	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	1,2	2015	A
101	bras en avant	0,7	2015	A
102	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	0,7	2015	A
102-1	planche sans casque	0,7	2015	A
102-2	planche sans casque	1,2	2015	A
102-3	lâché mannequin sans casque	-	2015	A
102-4	lâché mannequin avec casque	-	2015	A
102-5	planche sans casque	1,2	2015	A
102-6	planche avec casque	1,2	2015	A
103	bras en avant	1,2	2015	C
104	bras en avant	1,2	2015	C
104-1	bras en avant avec casque	1,2	2015	C
105-1	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	1,2	2015	C
106	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	0,7	2015	C
107	bras en avant	0,7	2015	C
108	planche sans casque	0,7	2015	C
109	planche avec casque	0,7	2015	C
110	planche avec casque	1,2	2015	C
111	planche sans casque	1,2	2015	C
112	lâché mannequin sans casque (sur matelas)	-	2015	C
113	lâché mannequin avec casque (sur matelas)	-	2015	C
114	lâché sur angle de la trappe avec casque	-	2015	C
115	lâché sur angle de la trappe sans casque	-	2015	C



## 2. Méthodes d'analyse du risque en Biomécanique de l'impact

### 2.1. Statistiques et accidentologie

Lorsque l'on souhaite définir la dangerosité d'une situation d'accident, c'est-à-dire définir le risque (ou probabilité) d'occurrence de lésions de différentes gravités, on se base généralement sur des données d'accidentologie et/ou des données issues d'expérimentations.

Pour différentes conditions d'accident (réelles ou reconstruites en laboratoire) on identifie les lésions et leur gravité (cf. 2.2 *Définition des niveaux de gravité des blessures*) en fonction des conditions d'accident ou de choc rencontrées. Cette identification se fait soit sur les données réelles d'accidents (étude épidémiologique) soit sur des lésions reproduites sur substituts lors de reconstruction en laboratoire. La variabilité entre personnes des conséquences d'un impact en termes de lésions et la variabilité ou l'incertitude (dans le cas des accidents réels) même des conditions d'accidents impliquent d'avoir des échantillons de grande taille pour avoir des tendances statistiques fiables et représentatives. En accidentologie routière, de nombreuses bases de données collectent les causes, conditions et conséquences des accidents de la route. L'analyse statistique de ces données permet éventuellement de pouvoir définir des relations statistiques entre conditions de choc (vitesse, énergie d'impact, etc.) et la gravité (AIS) des blessures.

Les limitations de cette approche sont que dans certains cas les données d'accidents ne permettent pas d'établir une relation statistiquement significative entre les conditions de choc et la gravité (AIS) et qu'elle ne permet pas de comprendre les mécanismes lésionnels (c'est-à-dire le phénomène physique qui a conduit à la blessure). En l'absence de telles corrélations ou de données suffisantes ou encore pour analyser finement le mécanisme lésionnel, des essais en laboratoire sont réalisés.

Ceci permet de définir le critère de blessures pertinent en fonction du segment corporel considéré et de la situation d'accident. Par exemple, les causes et donc les mécanismes qui conduisent à des fractures de côtes sont totalement différents de ceux qui génèrent des lésions de la tête, en conséquence le critère de blessures et la probabilité d'avoir des blessures de différentes gravités sont très différents pour ces deux segments corporels.

Seul un critère de blessures (ou critère lésionnel) peut permettre le calcul d'une probabilité d'apparition de blessure de sévérité définie.

### 2.2. Définition des niveaux de gravité des blessures

Le type et la sévérité ou gravité des blessures encourues par un individu est décrite par une échelle codant la nature et le degré de sévérité en se basant sur un diagnostic médical. Il existe plusieurs échelles de codification, mais la plus couramment utilisée est l'Abbreviated Injury Scale, AIS, développée par l'Association for the Advancement of the Automotive Medicine (AAAM, [www.carcrash.org](http://www.carcrash.org)). L'AIS est un système standardisé régulièrement mis à jour, la dernière version de cette échelle de sévérité date de 2008 (Version 2005 update 2008, [www.aaam1.org/ais](http://www.aaam1.org/ais)). L'AIS est un système de notation de sévérité globale par segment anatomique.

La codification AIS complète des blessures est composée de 7 caractères pour décrire totalement une lésion :

R T SS NN · X

Avec :

<p><b>R</b> Territoire corporel :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Tête</li> <li>2 Visage</li> <li>3 Cou</li> <li>4 Thorax</li> <li>5 Abdomen</li> <li>6 Colonne vertébrale</li> <li>7 Extrémité supérieure</li> <li>8 Extrémité inférieure</li> <li>9 Non spécifié</li> </ol>	<p><b>SS</b> Structure anatomique spécifique ou nature de la lésion :</p> <p><u>Ensemble du corps</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>02 Dermabrasion</li> <li>04 Contusion</li> <li>06 Plaie</li> <li>07 Arrachement</li> <li>10 Amputation</li> <li>20 Brûlure</li> <li>30 Ecrasement</li> <li>40 Dégantage</li> <li>50 Blessure sans autre précision</li> <li>60 Blessure pénétrante</li> <li>90 Traumatisme autre que mécanique</li> </ol> <p><u>Tête - Durée de perte de conscience :</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>02 Durée de la perte de conscience</li> <li>04 }</li> <li>06 } Degré de conscience</li> <li>08 }</li> <li>10 Commotion</li> </ol> <p><u>Colonne vertébrale :</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>02 Cervicale</li> <li>04 Thoracique</li> <li>06 Lombaire</li> </ol> <p><u>Vaisseaux, nerfs, organe, os, articulations :</u> Sont codés par deux caractères : 02 et suivants</p>
<p><b>I</b> Type de structure anatomique :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Surface totale</li> <li>2 Vaisseaux sanguins</li> <li>3 Nerfs</li> <li>4 Organes, y compris muscles et ligaments</li> <li>5 Squelette, y compris articulations</li> <li>6 Tête - Durée de perte de connaissance</li> </ol>	

**NN** : Type d'atteinte lésionnelle

Les lésions spécifiques sont décrites par deux caractères consécutifs 02 et suivants. Dans la mesure du possible, au sein de la structure du code AIS, le 00 est appliqué lorsqu'une blessure est indiquée "Sans Autre Précision" sur la gravité ou lorsqu'une seule blessure figure à la classification pour cette structure anatomique. Le code 99 est appliqué pour une blessure "sans autre précision" sur sa nature ou sur sa gravité.

La gravité X de l'AIS comporte 6 niveaux de sévérité de 1 à 6, sachant que de plus AIS0 signifie « pas de lésions » et AIS9 signifie « lésion inconnue » :

AIS CODE	Description
1	Mineure
2	Modérée
3	Sérieuse
4	Sévère
5	Critique
6	Maximale

Dans le cadre de la présente étude, et étant donné l'absence de données et d'informations sur le type de blessures rencontrées, seule la gravité de la blessure, définie par AIS dans la suite est utilisé. En effet, il est impossible de définir à partir des valeurs des critères de blessures la localisation fine et le type de lésion, seule une probabilité de gravité est déterminable.

L'AIS est donc une valeur unique, indépendante du temps, pour chaque blessure et pour chaque segment corporel. La sévérité est décrite vis-à-vis de son importance par rapport à une personne adulte en bonne santé. Il est à noter que l'AIS décrit uniquement la blessure mais pas ses conséquences (séquelle à long terme par exemple). De plus, l'AIS n'est pas une échelle linéaire. Par ailleurs, définir un AIS moyen n'a aucun sens, pour décrire la gravité globale d'un accident, la notion d'AIS Maximum « MAIS » est utilisée. Elle est définie comme la valeur la plus élevée d'AIS identifiée sur l'individu, même si il a subi plusieurs lésions à différents endroits de gravité égale ou inférieure (il n'y ni cumul, ni moyenne). Par exemple, le MAIS d'une personne qui a AIS 2 pour la tête et AIS 1 pour le thorax est MAIS = 2 (MAIS 2).

Pour mieux rendre compte des blessures multiples, une échelle complémentaire est introduite par l'AAAM : ISS Injury Severity Score. L'ISS fait la distinction entre 6 régions corporels : tête/cou, face, thorax, abdomen, extrémités incluant le bassin, et surface externe (brûlures, lacérations, abrasions, contusions indépendamment de leur localisation sur le corps). Pour chacune de ces régions l'AIS le plus élevé est déterminé. Puis l'ISS est calculé comme la somme des carrés des AIS pour les 3 régions les plus sévèrement touchés (c'est à dire pour lequel l'AIS est la plus élevée). Par conséquent, l'ISS minimum est 0, l'ISS maximum est 75 (3 régions avec AIS 5). Si une région a un AIS6, automatiquement l'ISS est fixé à 75.

Un ISS supérieur à 15 est considéré comme un trauma majeur. En effet la valeur de 15 est obtenue dès que 2 segments au moins sont touchés avec des niveaux de gravité AIS 3 (ISS = 9 + 9) ou dès que 3 segments sont touchés dont un avec AIS 3 et les deux autres avec AIS 2 (ISS = 9 + 4 +4 =17). L'AIS et ISS sont donc complémentaires, l'ISS étant déduite de l'AIS. Les probabilités de risques établis dans la présente étude seront données pour l'AIS.

### 2.3. Critères de blessures

Un problème crucial en biomécanique des chocs est l'évaluation de la relation entre la sévérité des blessures et le chargement mécanique (déterminé par un critère de blessure) qui a conduit à ces blessures.

Un critère de blessures est donc un outil pour évaluer la sévérité d'un choc et le risque associé de blessure. Par définition, le critère de blessure (ou lésionnel) est la mesure d'un paramètre physique (accélération, vitesse, déplacement, ...) ou d'une combinaison de paramètres physiques, ou d'une fonction de paramètres physiques présentant la meilleure corrélation avec la gravité de blessures. Cette corrélation est exprimée par une probabilité d'apparition d'un niveau de gravité (valeur définie a priori de l'AIS) en fonction de la valeur du critère de blessures.

On définit différents critères de blessures en fonction du segment corporel considéré ou de la situation d'accident (par exemple, il existe des critères spécifiques en choc frontal différents de ceux pour le choc latéral pour un même segment corporel).

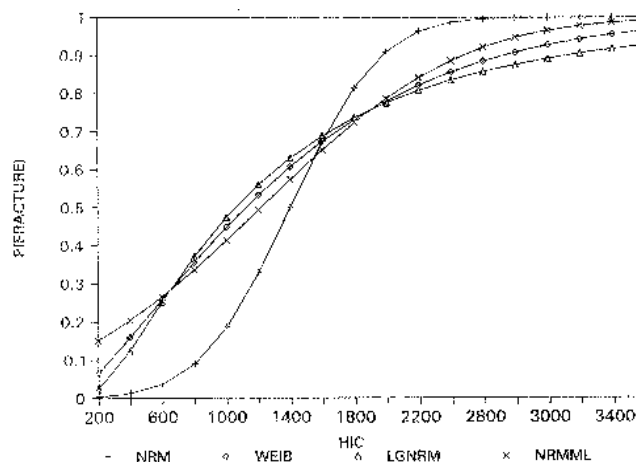
Le critère est généralement construit sur des paramètres physiques intrinsèques à la personne, c'est-à-dire mesurables sur un individu ou sur un mannequin, par exemple, l'accélération de la tête ou le moment de flexion du cou durant un impact. Sa définition doit être indépendante des conditions d'impacts.

## 2.4. Courbes de risques

A chaque critère de blessure sont associées des courbes de risques. Une courbe de risque définit, pour une valeur fixée a priori de l'AIS, une probabilité en fonction de la valeur du critère de blessure.

La méthode consiste, à partir d'un jeu de données expérimentales issues d'essais en laboratoire parfaitement contrôlés, regroupant des cas de différents niveaux d'AIS, à regrouper ces données en deux populations en fonction du niveau d'AIS choisi. Par exemple, pour un niveau AIS = 3, on définit une population de cas où les blessures sont de gravité inférieure à 3, AIS < 3, et on lui attribue la probabilité 0, et une population de cas où les blessures sont de gravité supérieure ou égale à 3, AIS ≥ 3, et on lui attribue la probabilité 1.

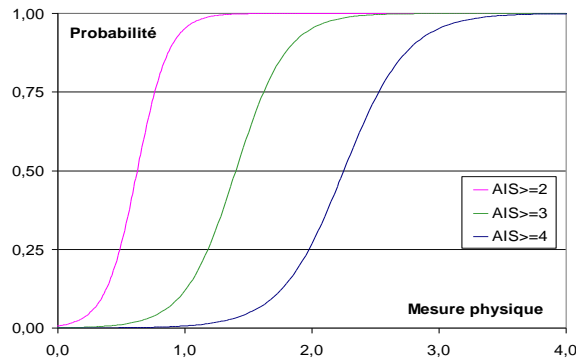
Ensuite, on détermine la loi de probabilité pour ces deux populations. Il existe plusieurs méthodes statistiques pouvant mener à des résultats différents (Figure 1). Toutefois, il faut noter qu'il n'y a pas consensus dans la communauté sur la meilleure méthode statistique à utiliser pour définir les courbes de risques. Sans rentrer dans les détails qui sont hors de l'étude, les méthodes statistiques se classent en deux catégories : les méthodes paramétriques et les méthodes non paramétriques. Les critères de choix dépendent de la taille de l'échantillon disponible, de la connaissance ou non a priori de la distribution (normale, log-normale, etc....), des paramètres à analyser et des mécanismes lésionnels sous-jacents. La méthode la plus couramment utilisée est la régression logistique qui convient pour des populations de 10 à 20 échantillons et à l'avantage d'être bien connu et facile à interpréter. La méthodologie générale est de tester d'abord les méthodes paramétriques puis, en cas d'échec, les méthodes non paramétriques.



**Figure 1 :** Probabilités de fractures du crâne en fonction du HIC obtenues par différentes méthodes statistiques : Mertz/Weber (NRM), Weibull (WEIB), LogNormal (LGNRM) et Normal (NRMML), [Hertz 1993]

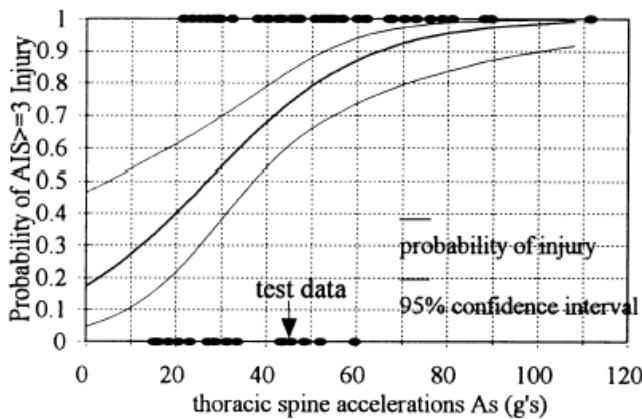
On pourra se référer à une analyse des diverses méthodes d'établissement des courbes de risques menée dans le cadre du projet européen Aprosys (Hynd et al. 2006).

Pour définir les courbes de risques pour chaque AIS variant de 1 à 6, il faut redéfinir à chaque AIS les deux populations citées précédemment, à partir du même jeu de données de cas lésionnels, et calculer la régression logistique correspondante (Figure 2)

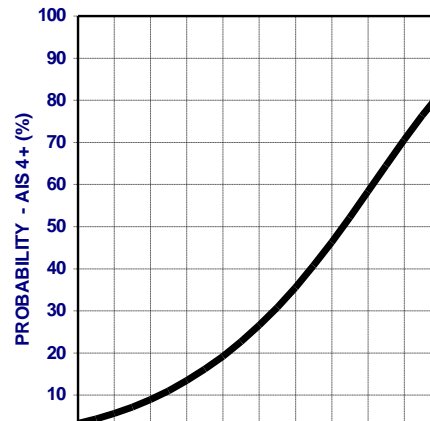


**Figure 2 :** Exemple de courbe de risques pour différentes valeurs de l’AIS à partir du même jeu de données expérimentales

Des exemples de courbes de risques sont donnés ci-après :



**Figure 3.a :** Probabilité des blessures AIS $\geq$ 3 en fonction de l’accélération résultante de la colonne vertébrale [Eppinger et al., 1999]



**Figure 3.b :** Probabilité des blessures AIS $\geq$ 4 en fonction du critère de blessure thoracique TTI [FMVSS 214]

## 2.5. Conclusions

Dans le cas de la présente étude, il n’existe pas de données d’accidentologie permettant d’identifier les blessures, et donc de définir directement les probabilités de sévérité des lésions en fonction des paramètres du choc ou d’émettre des hypothèses sur les mécanismes lésionnels et ainsi définir critères de lésions.

La méthode proposée est, par conséquent, de se baser sur des données existantes en termes de critères de blessures et de courbes de risques. Ces critères de blessures ont été développés en laboratoire à partir d’essais de chocs parfaitement définis (masse, vitesse, énergie d’impact, ...) et reproductibles, sur des sujets humains post mortem. Les critères de blessures ayant été développés initialement pour les crash-tests automobiles, ces essais sont sensés représentés des conditions d’impact proches de celles subies par un corps humain en accidents de la route. Ces conditions de chocs sont en général à des énergies beaucoup plus grandes que celles rencontrées dans un accident avec les tapis de remontées mécanique. Par exemple, les critères de lésions du thorax ont été développés avec des impacts d’une masse de 23 kg lancé à 4,6 ou 6,4 m/s représentant un thorax humain impactant un volant. Il s’agira de les transposer aux cas de la chute sur tapis roulants (pour mémoire : masse de 20kg lancée de 0,4m/s à 1,2m/s). Les limitations consistent en le fait que ces critères ont une plage de validité bornée par les conditions expérimentales des essais.

L'extrapolation a des conditions (vitesses, masses, énergies, etc.) significativement différentes imposent des précautions quant aux conclusions, les phénomènes physiques et mécanique responsables des lésions pouvant être différent de ceux mis en jeu lors de l'établissement des critères lésionnels.

Il est donc nécessaire de vérifier également les cinématiques de l'individu soumis à un impact. Ceci donnera une indication (condition nécessaire mais pas suffisante) sur l'usage des critères de blessures proposés pour le cas de la chute sur un tapis roulant.

En fonction de la valeur obtenue pour un critère, la probabilité des valeurs de l'AIS sera déduite des courbes de risques existantes. La difficulté et les limitations résident en :

1. Le choix des critères lésionnels pertinents parmi ceux existants et mesurables ou calculables par le modèle piétons utilisé.
2. L'accès à ou l'existence de courbes de risque pour chaque AIS de 1 à 6 où la possibilité de recalculer ces courbes de risques à partir du jeu de données ayant permis leur établissement. En effet, la plupart des courbes de risques ont été définis pour des valeurs d'AIS égalent à 3 ou 4, parfois 2 dans certain cas. Le risque étant de ne pas pouvoir explorer l'ensemble des valeurs d'AIS pour certain segment corporel.
3. Définir une relation entre probabilité d'AIS, obtenue pour une ou des valeurs d'un critère de blessure (paramètre intrinsèque à l'individu) pour des situations accidentelles avec des tapis roulants, et les paramètres physiques ou mécaniques (vitesse, ouverture de trappes, etc.) de ces éléments de tapis roulants.

### 3. Description du mannequin d'essais de chocs

L'étude a été menée pour un mannequin de chocs enfant de type P6 (développé par le TNO). Ce mannequin est issu du domaine du crash test automobile, il s'agit d'un mannequin de type P6.

#### 3.1. Anthropométrie du mannequin

Le mannequin P6 correspond à un enfant moyen représentatif de la population des enfants âgés de 6 ans. Les grandeurs anthropométriques caractéristiques sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Anthropométrie du mannequin P6

Taille [m]	Poids [kg]
1,22	22

#### 3.2. Instrumentation du mannequin

L'instrumentation intégrée au mannequin comprend un capteur d'efforts et de moments « 6 axes » de cou, un accéléromètre 3 axes de tête, et des capteurs d'efforts intégrés aux bras. Ces derniers ne font pas partie de l'instrumentation standard du mannequin P6, c'est une modification apportée par l'Ifsttar dans le cadre de l'étude antérieure.

L'articulation des poignets du mannequin avait également été modifiée pour permettre le positionnement bien à plat des mains sur le tapis.

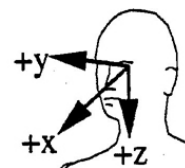
Les voies de mesure enregistrées et à traiter sont :

- L'accélération au centre de gravité de la tête suivant les trois axes :  $a_x, a_y, a_z$ .
- Les 3 efforts au niveau du cou selon les 3 axes :  $F_x, F_y, F_z$ .
- Les 3 moments associés au niveau du cou selon les 3 axes :  $M_x, M_y, M_z$ .

La fréquence d'acquisition des mesures est de 20 kHz.

La convention d'orientation des axes pour les signes des mesures, qui seront utilisées pour le calcul du risque de blessure, doit être conforme à la norme SAE J211 à savoir:

- Axe horizontale x positif de l'arrière vers l'avant ;
- Axe verticale z positif du haut vers le bas ;
- Axe horizontale y positif de gauche à droite.



En conséquence, certains essais qui ont été enregistrés dans un autre système d'axes ont subi une transformation afin d'exprimer les mesures dans le système d'axes conforme à la norme SAE J211.

## 4. Description des critères de blessures

Dans le cadre de l'étude, nous ne disposons pas de données d'accidentologies, ni de données d'essais permettant de définir des critères lésionnels appropriés et de construire des courbes de risques associées. Il est donc proposé d'utiliser des critères existants et développés pour d'autre situation d'impact (par exemple choc automobile) qui sont jugés le plus pertinents dans le cas de l'étude. Les segments corporels susceptibles d'être le plus exposés sont la tête et le cou. Les critères lésionnels associés sont décrits ci-après. Pour rappel, dans la suite, et conformément à la norme SAE J211, la direction  $z$  est positive vers le bas pour un individu debout et la direction  $x$  est dirigée positive vers l'avant.

Le choix final des critères de blessures pour l'étude va dépendre des mécanismes lésionnels observés pour les différents types d'accidents, en fonction des segments corporels blessés, de la cinématique de la personne au cours de l'impact et des conditions de cet impact.

### 4.1. Critères pour la tête

#### 4.1.1. Head Injury Criterion - HIC

Le *HIC* est déterminé à partir de la résultante linéaire de l'accélération  $a$  au centre de gravité de la tête. C'est la valeur de l'intégrale de l'accélération définie entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  définie par :

$$HIC = \sup_{t_1, t_2} \left\{ \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right)^{2,5} (t_2 - t_1) \right\} \quad a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

Avec l'accélération exprimée en  $g = 9,81\text{m/s}$ . Les composantes sont filtrées au préalable avec un filtre CFC1000 conformément à la norme ISO 6487 et SAE J211 (CFC est l'abréviation de Channel Frequency Class, il s'agit de filtre Butterworth quadripolaire à absence de phase). Le filtre CFC est utilisé en particulier pour les tests de collision. La classe 1000 correspond à une fréquence de coupure à -3db de 1650Hz.

$t_1$  et  $t_2$  sont les instants durant lesquels le *HIC* est maximum.

Il existe 3 versions du *HIC* en fonction de la durée entre  $t_1$  et  $t_2$ , durée indéterminée mais  $\leq 36$  ms (*HIC*), durée fixée à 15 ms (*HIC*<sub>15</sub>) ou à 36 ms (*HIC*<sub>36</sub>).

A partir du *HIC*, un critère spécifique pour les fractures du crâne a également été développé, il permet de relier la probabilité de fracture à la valeur du *HIC* :

$$p(\text{fracture}) = N\left(\frac{\ln(HIC - \mu)}{\sigma}\right)$$

Où  $N(\ )$  est la distribution normale,  $\mu = 6,96352$  et  $\sigma = 0,84664$ .

Bien que très critiqué, notamment par ce qu'il ne tient pas compte des accélérations angulaires de la tête, le *HIC* est toujours le critère tête utilisé couramment.



### 4.1.2. Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold – GAMBIT

Afin de pallier la principale limitation du *HIC* qui ne prend pas en compte les accélérations angulaires de la tête pouvant entraîner des lésions neuronales, un nouveau critère a été proposé par Newman (1986) :

$$GAMBIT = \left[ \left( \frac{a(t)}{a_c} \right)^n + \left( \frac{\ddot{\varphi}(t)}{\ddot{\varphi}_c} \right)^m \right]^{\frac{1}{k}}$$

Où  $a(t)$  et  $\ddot{\varphi}(t)$  sont respectivement les résultantes des accélérations linéaires exprimées en  $g$  et angulaires exprimées en  $krad/s$  déterminées au centre de gravité de la tête.  $a_c$  et  $\ddot{\varphi}_c$  sont des constantes représentant des valeurs critiques déterminées par des méthodes statistiques et de simulations sur des données expérimentales disponibles.

Aujourd'hui, ce critère est très peu utilisé et n'a été introduit dans aucune réglementation ou norme car sa validation est sujette à caution. Seul le *HIC* est utilisé pour évaluer le risque de blessures de la tête sans distinction de leur nature (fractures ou lésions neuronales).

### 4.1.3. Critère retenu et courbes de risques associés pour la tête

Parmi les critères tête existant, le critère le plus pertinent et fiable est le *HIC*.

Afin d'utiliser correctement le critère cou *HIC* pour un enfant de 6 ans, il est, en théorie nécessaire, de mettre à échelle les valeurs des constantes utilisées pour son calcul. Le rapport NHTSA de Eppinger *et al.* (1999) donne divers facteurs d'échelle et méthodes pour passer d'un adulte 50<sup>e</sup> percentile male à un enfant de 6 ans. Le rapport indique clairement l'incertitude forte de ces diverses méthodes et au final propose que la limite pour l'enfant de 6 ans soit de 700 comme pour l'adulte de taille moyenne. Par extrapolation de ce résultat il est suggéré d'utiliser les courbes de risques adulte telle que.

Les courbes de risques associées sont celles définies par l'étude de Prasad et Mertz (1982) et complétés par une étude de la NHTSA (Eppinger *et al.* 1999). Prasad et Merz ont défini la courbe d' $AIS \geq 4$ , la NHTSA a établi les courbes pour les autres AIS. Les courbes de risques ayant été établies sur des essais où les durées d'impact sont inférieures à 12 ms, elles sont valables indépendamment du calcul du *HIC*,  $HIC_{15}$  ou  $HIC_{36}$ . Pour la présente étude il a été décidé de calculer systématiquement le  $HIC_{36}$  noté par défaut *HIC* dans la suite.

Les courbes de risques pour la tête en fonction du *HIC* sont utilisables indépendamment de la direction de choc. Ces courbes de risques sont considérées par l'IFSTTAR comme reposant sur un jeu de données et un choix de fonction de probabilité fiable.

Une valeur de :

- $HIC > 3000$  entraîne systématiquement des lésions fatales ;
- $HIC = 1850$  correspond à 50%  $AIS \geq 5$  et
- $HIC = 1430$  correspond à 50% d' $AIS \geq 4$ .

Les formules pour chaque AIS et les courbes de risques sont données dans la Figure 4 suivante.

$$p(AIS \geq 1) = \frac{1}{1 + \exp\left(\left(1,54 + \frac{200}{HIC}\right) - 0,0065 \times HIC\right)}$$

$$p(AIS \geq 2) = \frac{1}{1 + \exp\left(\left(2,49 + \frac{200}{HIC}\right) - 0,00483 \times HIC\right)}$$

$$p(AIS \geq 3) = \frac{1}{1 + \exp\left(\left(3,39 + \frac{200}{HIC}\right) - 0,00372 \times HIC\right)}$$

$$p(AIS \geq 4) = \frac{1}{1 + \exp\left(\left(4,9 + \frac{200}{HIC}\right) - 0,00351 \times HIC\right)}$$

$$p(AIS \geq 5) = \frac{1}{1 + \exp\left(\left(7,82 + \frac{200}{HIC}\right) - 0,00429 \times HIC\right)}$$

$$p(AIS \geq 6) = \frac{1}{1 + \exp\left(\left(12,24 + \frac{200}{HIC}\right) - 0,00565 \times HIC\right)}$$

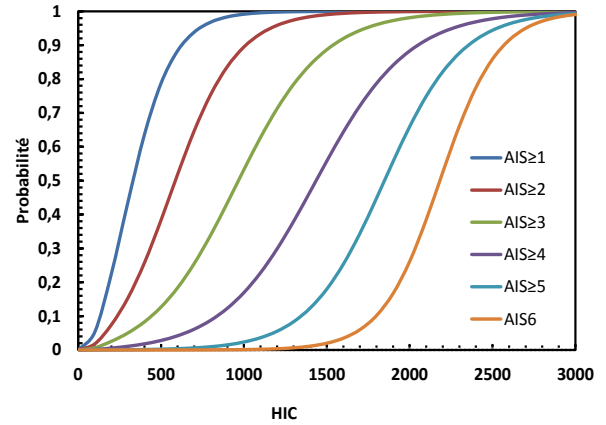


Figure 4 : Courbes de risque pour la tête en fonction du HIC.

## 4.2. Critères pour le cou

### 4.2.1. Neck Injury Criterion - NIC

Il existe plusieurs critères de blessures pour le cou dans la littérature, ou en fonction des réglementations.

Le Neck Injury Criterion, *NIC*, développé par BoCrom et al (1996), est une relation, fonction du temps, entre l'accélération linéaire relative, dirigée dans la direction antéropostérieure (axe  $x$  selon la norme SAE J211), du centre de gravité tête et de la 1<sup>e</sup> vertèbre thoracique, T1, (base du cou) et la vitesse relative qui en dérive.

$$NIC = 0,2a_{rel}(t) + v_{rel}^2(t)$$

Avec :  $a_{rel}(t) = a_x^{T1}(t) - a_x^{Tête}(t)$  et  $v_{rel}(t) = \int a_{rel}$

Les accélérations mesurées sont filtrées avec un CFC180 (La classe 180 correspond à une fréquence de coupure à -3db de 300Hz, norme SAE J211). Bien qu'utilisé en accidentologie, ce critère montre des limitations en fonction de l'angle d'extension de la tête, défini par l'angle entre les directions  $x$  des accélérations tête et T1, lorsque ce dernier atteint des valeurs de l'ordre de 20 à 30. L'analyse qualitative des vidéos des essais « tapis » montre que ces valeurs sont atteintes et dépassées, ce critère n'est donc pas adapté à la présente étude.

### 4.2.2. Neck Injury Criterion - $N_{ij}$

Le Neck Injury Criterion  $N_{ij}$  (Kleinberger et al., 1998) a été développé pour prédire les lésions du cou en choc frontal. Il est déterminé à partir de la force de compression axiale  $F_z$  et le moment de flexion/extension  $M_y$  (filtrés avec un CFC600) mesuré à la base du cou :

$$N_{ij} = \frac{F_z}{F_{zc}} + \frac{M_y}{M_{yc}}$$

Où  $F_{zc}$  et  $M_{yc}$  sont deux constantes définies pour normaliser la valeur du  $N_{ij}$  en fonction du type d'individu. Pour un 50<sup>e</sup> percentile mâle les valeurs sont respectivement de 4500 N (tension et compression) et de 310 N.m en flexion et 125 N.m en extension.

Les indices  $ij$  correspondent au 4 cas possibles :

$N_{ij}$	Forces	Moments
$N_{CF}$	Compression	Flexion (vers l'avant)
$N_{CE}$		Extension (vers l'arrière)
$N_{TF}$	Tension	Flexion (vers l'avant)
$N_{TE}$		Extension (vers l'arrière)

Ce critère est couramment utilisé, notamment dans la réglementation fédérale américaine pour les crash-tests. Des études ont cependant montré certaines limites pour le cas du choc arrière qui est la situation la plus fréquente pour les lésions du cou en accidentologie routière.

#### 4.2.3. Neck Protection Criterion - $N_{km}$

Une modification du  $N_{ij}$  a été proposé par Schmitt et al (2002) pour l'adapter au choc arrière. Cette modification est basée sur l'hypothèse que le mécanisme lésionnel du cou en choc arrière est relié aux efforts de cisaillement plutôt qu'aux efforts de compression. Il est alors proposé de remplacer la force de compression axiale  $F_z$  par la force de cisaillement  $F_x$  (les signaux mesurés sont aussi filtrés avec un filtre CFC600, fréquence de coupure à -3db de 1000Hz) :

$$N_{km} = \frac{F_x(t)}{F_{int}} + \frac{M_y(t)}{M_{int}}$$

Où  $F_{int}$  et  $M_{int}$  dépendent du type de chargement du cou : flexion/extension et mouvement vers l'avant ou vers l'arrière, soit 845 N pour le cisaillement ( $F_{int}$ , positif ou négatif) et 47,5 N.m ( $M_{int}$ , extension) et 88,1 N.m ( $M_{int}$ , flexion).

De manière similaire au  $N_{ij}$ , les indices du  $N_{km}$  correspondent au 4 cas possibles :

$N_{km}$	Forces	Moments
$N_{fa}$	Compression antérieure (vers l'avant)	Flexion (vers l'avant)
$N_{ea}$		Extension (vers l'arrière)
$N_{fp}$	Tension postérieure (vers l'arrière)	Flexion (vers l'avant)
$N_{ep}$		Extension (vers l'arrière)

Plusieurs autres critères sont régulièrement proposés. A ce jour, les mécanismes lésionnels du cou sont encore mal compris notamment pour les blessures de faible gravité (mais nécessitant des traitements à long terme) qui sont difficiles à identifier. Il est à noter qu'à ce jour, il n'y a pas de réglementation spécifique aux chocs arrière faute de critères et d'outils d'évaluation (mannequin) qui fassent l'unanimité.

#### 4.2.4. Critère retenu et courbes de risques associés pour le cou

Pour le cou, parmi les différents critères existants, le critère retenu est le Neck Injury Criterion  $N_{ij}$  qui correspond le mieux aux mécanismes lésionnels possibles lors de la chute sur tapis, impact vers l'avant sur la tête.

Les courbes de risques associées sont celles définies par le rapport NHTSA de Eppinger *et al.* (1999) et données dans la Figure 5. Ces courbes sont issues des essais sur porc réalisées par Mertz *et al.* (1982) et Prasad and Daniel (1984) pour prédire le risque de blessure d'un enfant de 3 ans. Les courbes de risque publiées par Mertz *et al.* (1997) pour l'adulte ont été obtenues, par ces auteurs, après mise à échelle des données expérimentales.

Elles sont basées sur une analyse statistique développée spécifiquement (Mertz/Weber méthode). Par contre, Eppinger *et al.* ont utilisé une régression logistique classique sur ces mêmes données.

La courbe AIS $\geq$ 3 diffère des autres. Ceci est probablement dû à la distribution des résultats expérimentaux et/ou à la méthode d'analyse. Le rapport NHTSA ne donne pas la courbe AIS $\geq$ 1 et indique que la courbe AIS $\geq$ 6 (fatal) est la même que celle pour AIS $\geq$ 5, ce qui est surprenant vu la distribution des données initiales de Mertz ou de Prasad. Cependant, faute d'explications convaincantes, les courbes de la NHTSA seront utilisées telle que.

Comme pour le HIC, les courbes de risques pour le cou sont utilisées quelle que soit la direction d'impact. Une valeur de :

- $N_{ij} > 7$  entraîne 100% de lésions AIS $\geq$ 5 (et fatales) ;
- $N_{ij} = 2,25$  correspond à 50% AIS $\geq$ 4 ;
- $N_{ij} = 1,6$  correspond à 50% d'AIS $\geq$ 3 et
- $N_{ij} = 1$  correspond à 22% d'AIS $\geq$ 3.

$$p(AIS \geq 2) = \frac{1}{1 + \exp(2,054 - 1,195 N_{ij})}$$

$$p(AIS \geq 3) = \frac{1}{1 + \exp(3,227 - 1,969 N_{ij})}$$

$$p(AIS \geq 4) = \frac{1}{1 + \exp(2,693 - 1,195 N_{ij})}$$

$$p(AIS \geq 5) = \frac{1}{1 + \exp(3,817 - 1,195 N_{ij})}$$

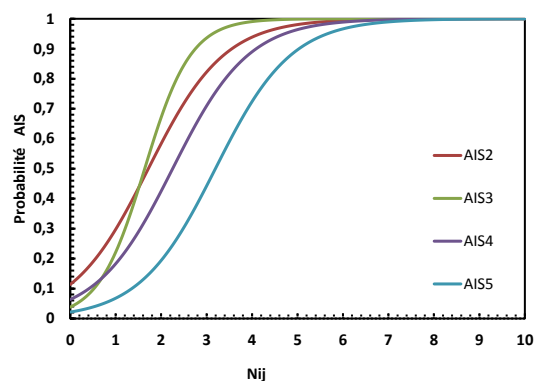


Figure 5 : Courbes de risque pour le cou en fonction du  $N_{ij}$

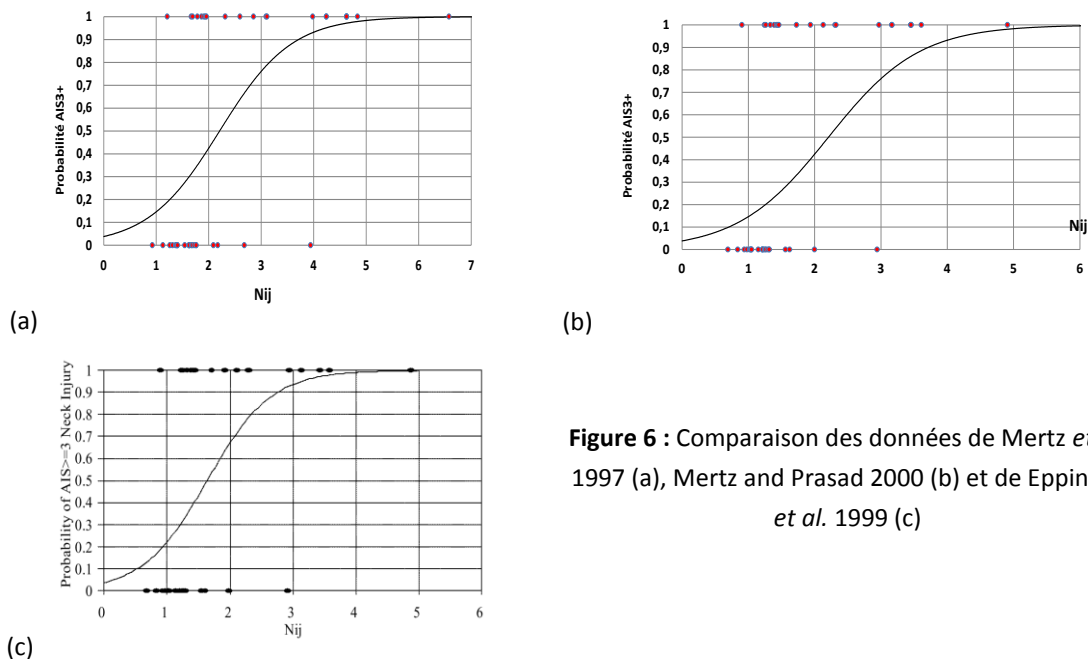
Les courbes de risque sur la Figure 5 donnent un risque non nul pour un  $N_{ij}$  de zéro ce qui est physiquement impossible. Ceci implique une confiance relative dans l'évaluation du risque pour les faibles valeurs du critère cou, notamment pour les faibles risques ( $AIS \leq 4$ ).

Il est à noter que dans une version précédente du document Eppinger *et al.* (1999), à savoir Kleinberger *et al.* (1998) les données de Mertz sur le cochon avaient été corrigées pour représenter l'humain. Ceci a engendré des courbes de risques différentes, par exemple :

$$p(AIS \geq 3) = \frac{1}{1 + \exp(3,906 - 2,185 N_{ij})} \text{ et } p(AIS \geq 5) = \frac{1}{1 + \exp(4,310 - 1,361 N_{ij})}$$

Il est à noter également que la comparaison, réalisée par l'IFSTTAR, entre les données de Mertz (1997) avec le rapport NHTSA (Eppinger *et al.* 1999) montre une différence entre les valeurs des données utilisées. La Figure 6 compare les distributions pour les  $AIS \geq 3$ . Il semble qu'un facteur correctif a été appliqué aux valeurs du  $N_{ij}$ . Cependant le rapport NHTSA ne signale pas ce facteur.

Mertz and Prasad (2000) ont ré-analysé leurs données et proposent des valeurs différentes pour le passage des données de l'enfant à l'adulte. En prenant en compte ces nouvelles valeurs on retrouve une distribution conforme à Eppinger *et al.*



**Figure 6** : Comparaison des données de Mertz *et al.* 1997 (a), Mertz and Prasad 2000 (b) et de Eppinger *et al.* 1999 (c)

D'autre part, Mertz and Prasad (2000) donnent des valeurs différentes du critère lésionnels  $N_{ij}$  après ré analyse des données.

Ces différentes considérations et incertitudes, font que l'IFSTTAR suggère d'utiliser les courbes de risques de la NHTSA donnée par Eppinger *et al.* tout en considérant ces courbes de risques comme faiblement fiable à faible valeur du risque ( $N_{ij} < 1.0$  et  $AIS \leq 3$ ) et comme relativement fiable à grande valeur du risque ( $N_{ij} > 1.0$  et  $AIS > 3$ ). Le risque dans les cas les plus sévères sera donc correctement évalué. En d'autres termes des valeurs du  $N_{ij} < 1.0$  peuvent être considéré comme un indicateur d'un risque faible de blessures modérées à sérieuse. La courbe de risque AIS3+ est donné dans la Figure 7 avec les intervalles de confiance à 95%.

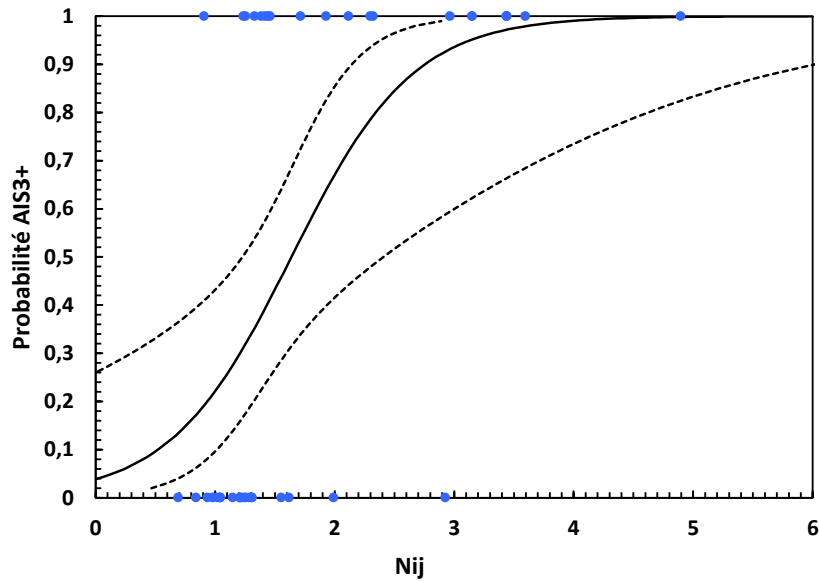


Figure 7 : Courbe de risque AIS3+ pour le cou avec les intervalles de confiance à 95%

Afin d'utiliser correctement le critère cou  $N_{ij}$  pour un enfant de 6 ans, il est nécessaire de mettre à échelle les valeurs des constantes utilisées pour son calcul. Cette mise à échelle du critère permet d'utiliser les courbes de risques telles quelles. Le rapport NHTSA de Eppinger *et al.* (1999) donne les facteurs d'échelle pour passer d'un adulte 50<sup>e</sup> percentile male à un enfant de 6 ans.

	Mannequin enfant 6 ans	Mannequin adulte
Compression (N)	2800	4500
Tension (N)	2800	4500
Flexion (N.m)	93	310
Extension (N.m)	37	125

Le rapport NHTSA donne ces valeurs pour un mannequin Hybrid III de 6 ans. A la connaissance de l'IFSTTAR, il n'existe pas d'études sur la comparaison directe entre un mannequin P6 et un Hybrid III 6 ans à l'exception d'Oster et Trommler (1996). Ceci a été confirmé par Humanetics fabricant de P6 (et concepteur de son successeur le Q6) et d'Hybrid III 6 ans. La série des mannequins P (« P » pour Pinocchio) est le premier mannequin enfant européen introduit dans la réglementation des tests d'homologation pour les dispositifs de retenues enfants en 1981. L'utilisation croissante des airbags et ceintures de sécurités, le développement de nouveaux sièges enfants a entraîné la nécessité de développer de nouveaux mannequins au cours des années 90, à savoir l'Hybrid III aux Etats Unis et la série des mannequins Q en Europe.

Les principales différences entre le P6 et l'Hybrid III 6 ans sont la masse du complexe tête/cou qui est 3,45 kg pour le P6 contre 4,02 kg pour l'Hybrid III 6 ans. Oster et Trommler (1996) comparent uniquement la cinématique des deux modèles de mannequins car le cou du P6 utilisé n'était pas instrumenté. Ils mettent seulement en évidence que le cou du P6 est plus souple que celui de l'Hybrid III 6 ans. La seule différence entre un Hybrid III 6 ans et un mannequin P6 sera la valeur de  $N_{ij}$  enregistrée.

Comme indiqué précédemment, les courbes de risques ont été développées pour un enfant de 3 ans par comparaison entre des essais animaux (bilan lésionnels donnant les valeurs d'AIS) et des essais sur mannequin Hybrid III de 3 ans (pour obtenir les valeurs des efforts et du critère lésionnel). Ces courbes de risque sont utilisables ensuite pour n'importe quelle population d'âge différent dès lors que le critère a été mis à échelle (Merz et Prasad 2000). Le rapport NHTSA décrit les facteurs de mise à échelle pour différents âges du critère. La seule valeur qui différencierait entre le mannequin Hybrid III 6 ans et le P6, intervenant dans les facteurs d'échelle, serait la circonférence du cou. Elle est de 264 mm pour l'Hybrid III (Eppinger *et al.* 1999) contre 254 mm pour le P6 (Walsh et Kelleher 1981). Une estimation de la variation sur les constantes (la circonférence intervient au carré pour la Force et au cube pour le Moment) du  $N_{ij}$  donnerait une variation de l'ordre de 10% sur les valeurs finale du critère soit de l'ordre de 2 points de différence sur les probabilités d'AIS (par exemple une probabilité de 20% au lieu de 18% d'AIS). Toutefois, il n'est pas possible dans le cadre de l'étude de déterminer correctement les constantes du critère cou spécifique au P6 et celles-ci n'existent pas dans la littérature.

En conséquence, et vu le faibles impact sur l'évaluation du risque, il est recommandé d'utiliser les valeurs du critère et les courbes de risques de l'Hybrid III 6 ans.

## 5. Résultats

Les résultats sont présentés en termes de valeurs des critères lésionnels pour chaque essai réalisé et de probabilité de survenue de blessure au minimum d'une gravité donnée. C'est à dire un niveau d'AIS fixé (en fait MAIS) et les niveaux supérieurs. Par exemple, les courbes de risque AIS3+ (ou AIS $\geq$ 3) indiquent le risque d'une gravité MAIS3, 4, 5 ou 6.

L'ensemble des valeurs du critère de blessures pour la tête et les 4 valeurs du critère cou, correspondant au quatre cas de figure de chargement, est regroupé dans les Tableaux 2 et 2.bis. Les tableaux dénotés « bis » regroupant des essais dit de « référence » (impact sur « planche » et « lâché vertical »).

Les valeurs maximales correspondantes des Forces de cisaillement, tension et compression ainsi que de Moments de flexion et d'extension, sont données dans les Tableaux 3 et 3.bis. Il est rappelé que les valeurs du critère cou sont calculées à chaque instant  $t$ , la valeur maximale du critère est ensuite déterminée. Le critère n'est donc pas calculé à partir des valeurs maximales des Forces axiales et des Moments de flexion-extension des Tableaux 3.

Les données utilisées pour le calcul des critères et la détermination des valeurs maximales sont issues des fichiers de données brutes, filtrées avec les filtres CFC requis par la norme SAE J211, des essais.

Les probabilités de risques associés aux différents critères de blessures sont regroupées dans les Tableaux 4 et 4.bis. Les cas où la probabilité de risque de lésions du cou est supérieure à 20% sont surlignés en bleu dans le Tableau 4. Ce niveau de 20% correspond au seuil limite de signification des critères en choc automobile pour lesquels ils ont été développés. Les accidents étudiés ici étant de moindre sévérité un seuil de 10% (surlignage saumon dans les Tableaux 4) est proposé et représente une solution plus sécuritaire.



**Tableau 2 : Valeurs du critère de blessures pour la tête et des critères de blessures pour le cou (en gras le Nij max)**

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC <sub>36</sub>	NCE	NCF	NTE	NTF
1	mains en avant	A	0,4	3,84	0,05	0,01	<b>0,23</b>	0,00
2	mains en avant	A	0,4	8,85	0,03	0,00	<b>0,25</b>	0,00
3	écharpe	A	0,4	1,76	0,01	0,05	<b>0,29</b>	0,05
7	mains en avant	B	0,4	NC*	NC	NC	NC	NC
8	mains en avant	B	0,4	0,14	0,00	0,00	<b>0,20</b>	0,00
10	écharpe	B	0,4	12,14	0,04	0,05	<b>0,17</b>	0,00
12	écharpe	B	0,4	2,63	0,13	0,09	<b>0,27</b>	0,01
4	écharpe	A	0,7	21,40	0,05	0,06	<b>0,44</b>	0,04
5	mains en avant	A	0,7	0,05	0,08	0,01	<b>0,14</b>	0,00
6	mains en avant	A	0,7	1,95	0,06	0,02	<b>0,18</b>	0,00
9	mains en avant	B	0,7	4,36	0,05	0,00	<b>0,19</b>	0,00
11	écharpe	B	0,7	21,05	0,00	0,09	<b>0,56</b>	0,18
13	écharpe	B	0,7	5,37	0,13	0,05	<b>0,24</b>	0,04
14	mains en avant	B	0,7	3,20	0,04	0,01	<b>0,09</b>	0,00
16	écharpe	B	0,7	44,64	0,08	0,08	<b>0,55</b>	0,04
18	écharpe	B	0,7	156,50	0,11	0,12	<b>0,59</b>	0,11
20	mains en avant	B	0,7	0,57	0,00	<b>0,07</b>	0,00	0,01
23	mains en avant	A	0,7	0,26	0,07	0,00	<b>0,21</b>	0,01
24	écharpe	A	0,7	4,00	0,05	0,10	<b>0,36</b>	0,08
30	mains en avant collées sur le tapis	C	0,7	0,02	0,00	<b>0,09</b>	0,00	0,00
32	écharpe avec scratch (côté cou)	C	0,7	2,98	0,08	<b>0,24</b>	0,21	0,03
33	écharpe avec scratch (côté fixation sur le tapis)	C	0,7	3,00	0,21	<b>0,31</b>	0,10	0,03
34	écharpe avec scratch (côté cou)	C	0,7	1,00	0,07	<b>0,10</b>	0,04	0,04
35	écharpe sans scratch	C	0,7	2,41	0,13	<b>0,31</b>	0,25	0,03
36	écharpe avec scratch (côté cou)	C	0,7	1,49				

\* NC : Non mesuré

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC <sub>36</sub>	NCE	NCF	NTE	NTF
51	écharpe lâche sans scratch	A	0,7	0,37	0,14	0,16	<b>0,23</b>	0,01
42	bras en avant	B	0,7	0,02	0,00	<b>0,07</b>	0,06	0,02
43	écharpe avec scratch	B	0,7	0,22	0,07	0,12	<b>0,14</b>	0,04
44	écharpe étendue sans scratch	B	0,7	5,37	0,19	0,45	<b>0,78</b>	0,05
45	écharpe étendue sans scratch	B	0,7	5,89	0,06	<b>0,39</b>	0,34	0,04
46	écharpe lâche sans scratch	B	0,7	0,16	0,08	0,19	<b>0,43</b>	0,01
80	mains en avant	B	0,7	0,01				
71	bras en avant	B	0,7	0,01	0,57	0,46	0,04	<b>0,87</b>
82	écharpe en avant avec scratch	B	0,7	0,96	0,08	0,06	<b>0,29</b>	0,11
83	écharpe en avant avec scratch	B	0,7	2,19	0,01	0,04	<b>0,37</b>	0,22
90	écharpe en avant sans scratch	A	0,7	6,20	0,00	0,11	<b>0,24</b>	0,16
91	mains en avant	A	0,7	0,07				
31	mains en avant collées sur le tapis	C	0,9	0,03	0,00	<b>0,09</b>	0,02	0,02
37	écharpe avec scratch	C	0,9	2,85	0,08	<b>0,22</b>	0,20	0,05
38	écharpe sans scratch	C	0,9	18,03	0,12	<b>0,50</b>	0,31	0,05
39	écharpe sans scratch	C	0,9	6,49	0,16	<b>0,31</b>	0,25	0,03
40	écharpe sans scratch (brin mort 60cm)	C	0,9	5,37	0,21	<b>0,44</b>	0,27	0,04
41	écharpe sans scratch (brin mort 60cm)	C	0,9	11,75	0,21	<b>0,38</b>	0,29	0,04
72	bras en avant	B	1,0	0,97				
73	bras en avant	B	1,0	6,97	0,35	0,22	<b>0,73</b>	0,09
15	mains en avant	B	1,2	16,00	0,11	0,08	<b>0,45</b>	0,03
17	écharpe	B	1,2	74,14	0,16	0,14	<b>1,06</b>	0,04
19	écharpe	B	1,2	226,5	0,05	0,19	<b>1,00</b>	0,14
21	mains en avant	B	1,2	9,81	0,03	0,03	<b>0,61</b>	0,03
22	mains en avant	B	1,2	14,59	0,11	0,05	<b>0,52</b>	0,03

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC <sub>36</sub>	NCE	NCF	NTE	NTF
25	Echarpe	A	1,2	6,53	0,30	0,13	<b>0,73</b>	0,27
26	mains en avant	A	1,2	5,05	0,05	0,06	0,46	<b>0,62</b>
27	mains en avant	A	1,2	6,00	0,04	0,08	0,49	<b>0,63</b>
28	Porte sortie latérale	A	1,2	3,62	0,02	0,02	0,07	<b>0,19</b>
52	bras en avant	A	1,2	2,34	0,07	<b>0,36</b>	0,10	0,03
53	écharpe avec scratch	A	1,2	1,65	0,12	0,22	<b>0,23</b>	0,02
54	écharpe lâche sans scratch	A	1,2	1,66	0,27	0,22	<b>0,34</b>	0,04
55	écharpe normale sans scratch (agrafée)	A	1,2	5,92	<b>0,44</b>	0,22	0,38	0,00
47	bras en avant	B	1,2	3,60				
48	écharpe avec scratch	B	1,2	3,19	0,06	<b>0,25</b>	0,17	0,05
49	écharpe lâche sans scratch	B	1,2	3,69	0,31	0,27	<b>0,50</b>	0,02
50	écharpe sans scratch	B	1,2	14,3	0,37	<b>0,47</b>	0,24	0,08
60	bras en avant	B	1,2	16,23	0,19	0,22	<b>1,02</b>	0,34
61	bras en avant	B	1,2	0,06				
62	bras en avant	B	1,2	2,99	0,08	0,22	<b>0,78</b>	0,09
63	bras en avant	B	1,2	0,78	0,12	<b>0,22</b>	0,21	0,00
64	Echarpe	B	1,2	0,80	0,14	0,22	<b>0,41</b>	0,05
65	Echarpe	B	1,2	6,91	0,00	0,22	<b>0,61</b>	0,05
66	Echarpe	B	1,2	3,12	0,21	0,22	<b>0,57</b>	0,03
67	Echarpe	B	1,2	5,69	0,01	0,22	<b>0,66</b>	0,01
68	Echarpe	B	1,2	3,55	0,00	0,22	<b>0,70</b>	0,03
69	Echarpe	B	1,2	31,10	0,22	0,22	<b>1,14</b>	0,36
70	bras en avant	B	1,2	7,73	0,04	0,22	<b>0,58</b>	0,44
81	mains en avant	B	1,2	3,75	0,14	0,09	<b>0,76</b>	0,05
84	écharpe en avant avec scratch	B	1,2	1,98	0,01	0,02	<b>0,59</b>	0,03
85	écharpe en avant avec scratch	B	1,2	7,09	0,00	0,00	<b>0,90</b>	0,13
87	mains en avant	A	1,2	0,94	0,06	0,06	<b>0,57</b>	0,17
88	écharpe en avant avec scratch	A	1,2	1,16	0,11	0,09	<b>0,51</b>	0,07
89	écharpe en avant avec scratch	A	1,2	6,17	0,37	0,13	<b>0,65</b>	0,27

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC <sub>36</sub>	NCE	NCF	NTE	NTF
97	bras en avant	B	0,7	0,31	0,00	0,00	<b>0,48</b>	0,00
98	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	B	0,7	6,96	0,06	0,07	<b>0,79</b>	0,05
101	bras en avant	A	0,7	0,03	0,01	0,00	<b>0,16</b>	0,00
102	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	A	0,7	5,18	0,04	0,07	<b>0,74</b>	0,04
106	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	C	0,7	1,13	0,02	0,04	<b>0,23</b>	0,09
107	bras en avant	C	0,7	0,02	0,04	0,00	<b>0,11</b>	0,00
92	bras en avant	B	1,2	NC*	0,10	0,12	<b>1,01</b>	0,38
93	bras en avant	B	1,2	NC*	0,03	0,13	<b>0,66</b>	0,08
94	bras en avant	B	1,2	9,27	0,08	0,10	<b>0,75</b>	0,04
95	écharpe avec scratch (mauvais protocole)	B	1,2	4,98	0,08	0,06	<b>0,47</b>	0,02
96	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	B	1,2	6,55	0,08	0,15	<b>0,71</b>	0,04
99	bras en avant	A	1,2	0,81	0,01	0,10	<b>0,35</b>	0,06
100	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	A	1,2	4,91	0,00	0,05	<b>0,85</b>	0,06
103	bras en avant	C	1,2	6,79	0,12	0,07	0,30	<b>0,56</b>
104	bras en avant	C	1,2	9,34	0,02	0,05	0,12	<b>0,63</b>
104-1	bras en avant avec casque	C	1,2	15,43	0,03	0,11	0,22	<b>0,48</b>
105-1	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	C	1,2	2,20	0,06	0,07	<b>0,43</b>	0,19

\* NC : Non calculé, accélération selon axe-z non disponible

**Tableau 2.bis** : Valeurs du critère de blessures pour la tête et des critères de blessures pour le cou (en gras le Nij max)  
pour les essais les essais de « référence » (« planche » et « lâché vertical »)

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC <sub>36</sub>	NCE	NCF	NTE	NTF
98-1	planche sans casque	B	0,7	0,62	0,00	0,00	0,10	<b>0,30</b>
102-1	planche sans casque	A	0,7	0,47	0,00	0,00	0,09	<b>0,27</b>
98-2	planche sans casque	B	1,2	3,71	0,06	0,05	0,17	<b>0,50</b>
102-2	planche sans casque	A	1,2	3,05	0,00	0,00	0,22	<b>0,32</b>
102-5	planche sans casque	A	1,2	3,46	0,00	0,00	0,15	<b>0,37</b>
102-6	planche avec casque	A	1,2	0,68	0,00	0,10	0,20	<b>0,31</b>
108	planche sans casque	C	0,7	0,62	0,00	0,00	<b>0,15</b>	0,12
109	planche avec casque	C	0,7	0,11	0,00	0,00	<b>0,17</b>	0,15
110	planche avec casque	C	1,2	0,60	0,00	0,00	0,16	<b>0,26</b>
111	planche sans casque	C	1,2	3,49	0,00	0,00	0,15	<b>0,29</b>
98-3	lâché mannequin sans casque	B	-	9,57	0,20	0,09	0,16	<b>0,87</b>
98-4	lâché mannequin avec casque	B	-	9,98	0,15	0,01	0,17	<b>1,02</b>
102-3	lâché mannequin sans casque	A	-	2,21	0,00	0,11	0,05	<b>0,43</b>
102-4	lâché mannequin avec casque	A	-	3,11	0,01	0,12	0,10	<b>0,52</b>
112	lâché mannequin sur matelas trappe sans casque	C	-	5,30	0,39	0,00	0,42	<b>0,48</b>
113	lâché mannequin sur matelas trappe avec casque	C	-	3,48	0,00	0,00	0,20	<b>0,73</b>
114	lâché sur angle trappe avec casque	C	-	47,64	0,31	0,12	0,17	<b>0,58</b>
115	lâché sur angle trappe sans casque	C	-	83,55	0,08	0,05	0,13	<b>0,77</b>

**Tableau 3 : Valeurs des efforts et moments maximum pour le cou (valeur absolue sauf pour F<sub>x</sub> où le signe du maximum d'intensité est donné)**

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	F <sub>x</sub> max. (N)	F <sub>z</sub> max. Tension (N)	F <sub>z</sub> max. Compression (N)	M <sub>y</sub> max. Flexion (N.m)	M <sub>y</sub> max. Extension (N.m)
1	mains en avant	A	0,4	-56,0	170,5	21,1	0,5	6,4
2	mains en avant	A	0,4	-33,5	107,4	13,8	0,0	7,9
3	écharpe	A	0,4	-510,0	304,2	63,9	2,4	6,7
7	mains en avant	B	0,4	NC*	NC	NC	NC	NC
8	mains en avant	B	0,4	-48,5	69,6	0,0	0,0	6,4
10	écharpe	B	0,4	-200,9	206,3	82,7	2,5	3,5
12	écharpe	B	0,4	-214,3	242,2	125,5	4,3	6,6
4	écharpe	A	0,7	-472,4	442,1	71,7	3,1	10,4
5	mains en avant	A	0,7	-37,2	42,0	15,5	0,1	4,6
6	mains en avant	A	0,7	-25,6	82,7	28,9	0,7	5,8
9	mains en avant	B	0,7	-40,3	57,1	10,0	0,0	6,6
11	écharpe	B	0,7	-859,0	563,6	119,0	4,6	13,4
13	écharpe	B	0,7	-202,0	202,8	96,1	1,7	8,1
14	mains en avant	B	0,7	-22,5	28,1	8,7	0,5	3,2
16	écharpe	B	0,7	-331,1	422,1	113,8	5,1	14,7
18	écharpe	B	0,7	-717,2	612,5	155,3	6,0	13,6
20	mains en avant	B	0,7	-26,8	1,8	66,1	4,6	0,0
23	mains en avant	A	0,7	-44,0	177,0	17,2	0,2	5,4
24	écharpe	A	0,7	-549,0	398,1	66,9	7,4	8,6
30	mains en avant collées sur le tapis	C	0,7	44,3	0,7	76,3	5,7	0,0
32	écharpe avec scratch (côté cou)	C	0,7	136,7	136,4	500,8	11,3	6,1
33	écharpe avec scratch (côté fixation sur le tapis)	C	0,7	222,2	125,9	706,2	5,2	6,3
34	écharpe avec scratch (côté cou)	C	0,7	195,5	117,3	270,6	0,4	0,6
35	écharpe sans scratch	C	0,7	605,0	113,5	522,0	11,0	7,8
36	écharpe avec scratch (côté cou)	C	0,7					

\* NC : Non mesuré

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	F <sub>x</sub> max. (N)	F <sub>z</sub> max. Tension (N)	F <sub>z</sub> max. Compression (N)	M <sub>y</sub> max. Flexion (N.m)	M <sub>y</sub> max. Extension (N.m)
51	écharpe lâche sans scratch	A	0,7	120,1	137,9	211,3	9,3	6,6
42	bras en avant	B	0,7	41,1	40,0	66,9	4,8	1,7
43	écharpe avec scratch	B	0,7	135,2	90,9	96,4	8,8	3,9
44	écharpe étendue sans scratch	B	0,7	882,3	770,0	799,5	15,6	19,0
45	écharpe étendue sans scratch	B	0,7	239,4	348,4	763,7	15,4	9,1
46	écharpe lâche sans scratch	B	0,7	242,3	240,1	252,4	9,6	12,8
71	bras en avant	B	0,7					
80	mains en avant	B	0,7	8,2	23,9	38,2	80,1	20,6
82	écharpe en avant avec scratch	B	0,7	-98,3	525,4	63,5	3,5	8,9
83	écharpe en avant avec scratch	B	0,7	288,3	605,7	45,4	7,6	9,3
90	écharpe en avant sans scratch	A	0,7	540,7	504,1	76,7	8,4	4,8
91	mains en avant	A	0,7					
31	mains en avant collées sur le tapis	C	0,9	49,7	29,3	76,5	5,8	0,4
37	écharpe avec scratch	C	0,9	159,8	121,7	350,0	13,7	5,7
38	écharpe sans scratch	C	0,9	843,3	151,2	790,6	20,1	9,4
39	écharpe sans scratch	C	0,9	276,6	115,2	623,3	11,1	7,7
40	écharpe sans scratch (brin mort 60cm)	C	0,9	425,1	121,3	715,2	18,1	8,9
41	écharpe sans scratch (brin mort 60cm)	C	0,9	389,1	150,7	652,6	17,2	8,7
72	bras en avant	B	1,0					
73	bras en avant	B	1,0	196,2	772,6	249,6	14,3	17,0
15	mains en avant	B	1,2	-78,4	614,2	151,9	4,1	11,7
17	écharpe	B	1,2	-807,3	743,5	174,4	7,1	29,5
19	écharpe	B	1,2	-999,2	891,9	241,8	10,6	25,2
21	mains en avant	B	1,2	-81,4	654,3	45,5	2,0	15,1
22	mains en avant	B	1,2	-93,9	694,1	76,3	2,5	12,8

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	Fx max. (N)	Fz max. compression (N)	Fz max. tension (N)	My max. flexion (N.m)	My max. extension (N.m)
25	écharpe	A	1,2	-731,3	586,7	106,2	11,6	19,3
26	mains en avant	A	1,2	-164,9	1270,9	65,3	15,8	13,5
27	mains en avant	A	1,2	155,5	1270,9	73,5	16,8	11,7
28	Porte sortie latérale	A	1,2	93,3	453,8	13,0	4,1	2,3
52	bras en avant	A	1,2	207,8	61,6	467,9	19,1	3,3
53	écharpe avec scratch	A	1,2	261,9	112,3	261,4	14,5	6,9
54	écharpe lâche sans scratch	A	1,2	163,2	170,6	294,6	10,8	10,7
55	écharpe normale sans scratch (agrafée)	A	1,2	723,4	147,9	672,0	15,0	13,7
47	bras en avant	B	1,2					
48	écharpe avec scratch	B	1,2	250,2	115,7	387,7	11,3	4,9
49	écharpe lâche sans scratch	B	1,2	265,4	264,6	368,9	12,9	15,6
50	écharpe sans scratch	B	1,2	863,2	205,6	794,6	17,2	8,7
60	bras en avant	B	1,2	366,4	776,3	123,6	10,3	27,7
61	bras en avant	B	1,2					
62	bras en avant	B	1,2	313,8	663,9	101,5	7,2	20,5
63	bras en avant	B	1,2	-93,4	137,5	79,3	3,7	6,5
64	écharpe	B	1,2	217,5	306,0	116,5	9,0	12,8
65	écharpe	B	1,2	311,6	347,6	58,1	6,1	19,7
66	écharpe	B	1,2	286,0	392,1	63,6	3,8	17,9
67	écharpe	B	1,2	517,0	654,1	35,0	1,5	16,7
68	écharpe	B	1,2	498,0	496,6	83,7	5,1	21,3
69	écharpe	B	1,2	806,6	1069,6	286,8	16,2	28,1
70	bras en avant	B	1,2	262,1	842,3	172,2	12,9	15,2
81	mains en avant	B	1,2	-97,4	1104,2	66,3	6,1	16,2
84	écharpe en avant avec scratch	B	1,2	238,0	445,4	21,1	1,0	18,5
85	écharpe en avant avec scratch	B	1,2	914,0	1182,3	2,0	3,6	17,9
87	mains en avant	A	1,2	129,5	448,8	69,4	5,0	15,3
88	écharpe en avant avec scratch	A	1,2	206,9	635,6	89,2	5,7	10,6
89	écharpe en avant avec scratch	A	1,2	877,4	650,2	129,4	11,2	19,0



N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	F <sub>x</sub> max. (N)	F <sub>z</sub> max. Tension (N)	F <sub>z</sub> max. Compression (N)	M <sub>y</sub> max. Flexion (N.m)	M <sub>y</sub> max. Extension (N.m)
97	bras en avant	B	0,7	216,2	508,9	0,0	0,0	11,2
98	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	B	0,7	381,3	838,5	91,3	3,2	18,3
101	bras en avant	A	0,7	116,1	156,5	3,7	0,0	3,7
102	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	A	0,7	243,2	674,9	77,8	3,6	18,5
106	écharpe sans scratch	C	0,7	256,7	342,7	40,8	3,6	7,5
107	bras en avant	C	0,7	49,1	50,5	8,4	0,0	3,4
92	bras en avant	B	1,2	262,9	741,0	120,9	11,5	28,2
93	bras en avant	B	1,2	671,0	720,6	138,9	8,0	15,6
94	bras en avant	B	1,2	64,8	759,3	119,5	5,3	17,8
95	écharpe avec scratch (mauvais protocole)	B	1,2	985,0	439,9	96,9	2,6	15,1
96	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	B	1,2	133,0	756,0	210,0	7,6	16,5
99	bras en avant	A	1,2	789,5	357,6	98,6	5,7	8,4
100	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	A	1,2	115,7	880,9	50,3	3,2	19,8
103	bras en avant	C	1,2	-360,3	934,0	108,4	21,2	5,3
104	bras en avant	C	1,2	-317,0	945,8	56,5	28,5	3,6
104-1	bras en avant avec casque	C	1,2	315,8	976,4	127,4	12,8	4,0
105-1	écharpe sans scratch agrafée (protocole OK)	C	1,2	422,8	531,4	70,9	8,7	12,1

**Tableau3.bis** : Valeurs des efforts et moments maximum pour le cou (valeur absolue sauf pour  $F_x$  où le signe du maximum d'intensité est donné)  
pour les essais les essais de « référence » (« planche » et « lâché vertical »)

N° Test	Type d'essai	Tapis	Vitesse (m/s)	$F_x$ max. (N)	$F_z$ max. Tension (N)	$F_z$ max. Compression (N)	$M_y$ max. Flexion (N.m)	$M_y$ max. Extension (N.m)
98-1	planche sans casque	B	0,7	-411,8	679,5	0,0	5,4	3,0
102-1	planche sans casque	A	0,7	174,4	573,1	1,2	6,5	0,9
98-2	planche sans casque	B	1,2	-88,7	1140,3	47,0	10,5	5,2
102-2	planche sans casque	A	1,2	119,0	683,3	2,1	7,2	5,5
102-5	planche sans casque	A	1,2	671,0	813,8	4,7	7,5	2,7
102-6	planche avec casque	A	1,2	64,8	660,0	63,2	8,5	3,4
108	planche sans casque	C	0,7	-77,8	342,1	0,5	2,7	2,7
109	planche avec casque	C	0,7	-89,0	410,3	0,0	3,1	4,6
110	planche avec casque	C	1,2	-83,2	563,4	0,0	5,7	3,9
111	planche sans casque	C	1,2	-100,4	635,7	0,0	5,9	3,5
98-3	lâché mannequin sans casque	B	-	-753,2	1869,3	192,5	20,7	6,4
98-4	lâché mannequin avec casque	B	-	-43,9	2114,6	32,3	28,0	5,8
102-3	lâché mannequin sans casque	A	-	153,7	757,1	97,2	14,6	-0,6
102-4	lâché mannequin avec casque	A	-	262,9	965,3	12,6	16,6	3,1
112	lâché mannequin sur matelas trappe sans casque	C	-	-465,1	1134,5	76,0	7,2	13,5
113	lâché mannequin sur matelas trappe avec casque	C	-	-374,1	1418,6	2,7	20,4	6,
114	lâché sur angle trappe avec casque	C	-	-228,9	1143,2	307,9	18,5	7,6
115	lâché sur angle trappe sans casque	C	-	-275,5	1489,7	94,3	26,7	3,4

**Tableau 4** : Probabilité d'AIS pour la tête et le cou (en surligné les cas présentant un risque de blessures d'une gravité donnée  $\geq 10\%$  (saumon) et  $\geq 20\%$  (bleu))

N° Test	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC et AIS associés							N <sub>ij</sub> et AIS associés				
			HIC <sub>36</sub>	AIS1	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5	AIS6	N <sub>ij</sub>	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5
1	A	0,4	3,84	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,23	14,49%	5,91%	8,21%	2,82%
2	A	0,4	8,85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,25	14,74%	6,10%	8,36%	2,88%
3	A	0,4	1,76	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,29	15,33%	6,55%	8,73%	3,01%
7	B	0,4	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*
8	B	0,4	0,14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,20	13,95%	5,51%	7,88%	2,70%
10	B	0,4	12,14	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,17	13,51%	5,20%	7,62%	2,61%
12	B	0,4	2,63	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,27	14,97%	6,27%	8,50%	2,93%
4	A	0,7	21,40	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,44	17,79%	8,59%	10,25%	3,58%
5	A	0,7	0,05	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,14	13,15%	4,96%	7,40%	2,53%
6	A	0,7	1,95	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,18	13,77%	5,39%	7,78%	2,67%
9	B	0,7	4,36	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,19	13,90%	5,48%	7,85%	2,70%
11	B	0,7	21,05	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,56	20,06%	10,71%	11,70%	4,13%
13	B	0,7	5,37	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,24	14,51%	5,93%	8,22%	2,83%
14	B	0,7	3,20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,09	12,51%	4,53%	7,02%	2,39%
16	B	0,7	44,64	0,32%	0,12%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,55	19,78%	10,43%	11,51%	4,06%
18	B	0,7	156,50	14,18%	4,69%	1,65%	0,36%	0,02%	0,00%	0,59	20,53%	11,17%	12,00%	4,24%
20	B	0,7	0,57	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,07	12,26%	4,37%	6,87%	6,77%
23	A	0,7	0,26	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,21	14,13%	5,65%	7,99%	2,75%
24	A	0,7	4,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,36	16,53%	7,51%	9,47%	3,29%
30	C	0,7	0,02	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,09	12,45%	4,50%	6,98%	2,38%
32	C	0,7	2,98	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,24	14,60%	5,99%	8,28%	2,85%
33	C	0,7	3,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,31	15,58%	6,75%	8,88%	3,07%
34	C	0,7	1,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,10	12,59%	4,58%	7,06%	2,41%
35	C	0,7	2,41	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,31	15,58%	6,75%	8,88%	3,07%
36	C	0,7	1,49	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					

\* NC : Non calculé

N° Test	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC et AIS associés							Nij et AIS associés				
			HIC <sub>36</sub>	AIS1	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5	AIS6	Nij	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5
51	A	0,7	0,37	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,23	14,37%	5,82%	8,14%	2,80%
42	B	0,7	0,02	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,07	12,29%	4,39%	6,88%	2,35%
43	B	0,7	0,22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,14	13,12%	4,94%	7,38%	2,53%
44	B	0,7	5,37	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,78	24,65%	15,67%	14,73%	5,31%
45	B	0,7	5,89	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,39	17,02%	7,92%	9,77%	3,40%
46	B	0,7	0,16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,43	17,67%	8,48%	10,17%	3,55%
71	B	0,7	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					
80	B	0,7	0,01	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,87	26,59%	18,01%	16,05%	5,85%
82	B	0,7	0,96	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,29	15,35%	6,56%	8,73%	3,02%
83	B	0,7	2,19	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,37	16,67%	7,62%	9,55%	3,32%
90	A	0,7	6,20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,24	14,62%	6,01%	8,29%	2,85%
91	A	0,7	0,07	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					
31	C	0,9	0,03	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,09	12,48%	4,51%	7,00%	2,39%
37	C	0,9	2,85	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,22	14,26%	5,74%	8,07%	2,77%
38	C	0,9	18,03	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,50	18,86%	9,57%	10,93%	3,84%
39	C	0,9	6,49	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,31	15,62%	6,77%	8,90%	3,08%
40	C	0,9	5,37	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,44	17,86%	8,65%	10,30%	3,60%
41	C	0,9	11,75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,38	16,77%	7,71%	9,61%	3,34%
72	B	1,0	0,97	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					
73	B	1,0	6,97	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,73	23,56%	14,41%	13,99%	5,02%
15	B	1,2	16,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,45	18,00%	8,78%	10,38%	3,63%
17	B	1,2	74,14	2,28%	0,79%	0,30%	0,07%	0,00%	0,00%	1,06	31,35%	24,34%	19,42%	7,26%
19	B	1,2	226,5	27,87%	9,29%	3,14%	0,68%	0,04%	0,00%	1,00	29,75%	22,13%	18,27%	6,77%
21	B	1,2	9,81	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,61	20,96%	11,61%	12,28%	4,35%
22	B	1,2	14,59	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,52	19,18%	9,86%	11,13%	3,91%

N° Test	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC et AIS associés							N <sub>ij</sub> et AIS associés				
			HIC <sub>36</sub>	AIS1	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5	AIS6	N <sub>ij</sub>	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5
25	A	1,2	6,53	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,73	23,37%	14,19%	13,86%	4,97%
26	A	1,2	5,05	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,62	21,22%	11,88%	12,45%	4,42%
27	A	1,2	6,00	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,63	21,36%	12,02%	12,54%	4,45%
28	A	1,2	3,62	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,19	13,86%	5,45%	7,83%	2,69%
52	A	1,2	2,34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,36	16,39%	7,39%	9,37%	3,25%
53	A	1,2	1,65	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,23	14,37%	5,82%	8,14%	2,80%
54	A	1,2	1,66	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,34	16,21%	7,24%	9,26%	3,21%
55	A	1,2	5,92	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,44	17,90%	8,68%	10,32%	3,60%
47	B	1,2	3,60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					
48	B	1,2	3,19	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,25	14,74%	6,10%	8,36%	2,88%
49	B	1,2	3,69	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,50	18,92%	9,62%	10,97%	3,85%
50	B	1,2	14,3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,47	18,30%	9,05%	10,57%	3,70%
60	B	1,2	16,23	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,02	30,18%	22,71%	18,58%	6,90%
61	B	1,2	0,06	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%					
62	B	1,2	2,99	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,78	24,63%	15,64%	14,71%	5,31%
63	B	1,2	0,78	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,22	14,12%	5,64%	7,98%	2,74%
64	B	1,2	0,80	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,41	17,34%	8,20%	9,97%	3,47%
65	B	1,2	6,91	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,61	21,02%	11,67%	12,32%	4,37%
66	B	1,2	3,12	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,57	20,14%	10,79%	11,75%	4,15%
67	B	1,2	5,69	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,66	21,97%	12,66%	12,94%	4,61%
68	B	1,2	3,55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,70	22,80%	13,56%	13,48%	4,82%
69	B	1,2	31,10	0,04%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	1,14	33,37%	27,24%	20,90%	7,91%
70	B	1,2	7,73	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,58	20,43%	11,08%	11,93%	4,22%
81	B	1,2	3,75	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,76	24,02%	14,93%	14,30%	5,14%
84	B	1,2	1,98	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,59	20,60%	11,25%	12,05%	4,26%
85	B	1,2	7,09	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,90	27,41%	19,05%	16,62%	6,08%
87	A	1,2	0,94	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,57	20,27%	10,92%	11,83%	4,18%
88	A	1,2	1,16	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,51	19,03%	9,72%	11,04%	3,87%
89	A	1,2	6,17	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,65	21,80%	12,49%	12,83%	4,56%

N° Test	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC et AIS associés							Nij et AIS associés				
			HIC <sub>36</sub>	AIS1	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5	AIS6	Nij	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5
97	B	0,7	0,31	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,48	18,63%	9,35%	10,78%	3,78%
98	B	0,7	6,96	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,79	24,88%	15,93%	14,88%	5,37%
101	A	0,7	0,03	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,16	13,40%	5,13%	7,55%	2,58%
102	A	0,7	5,18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,74	23,69%	14,55%	14,08%	5,06%
106	C	0,7	1,13	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,23	14,47%	5,90%	8,20%	2,82%
107	C	0,7	0,02	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,11	12,72%	4,67%	7,14%	2,44%
92	B	1,2	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	1,01	29,96%	22,40%	18,42%	6,83%
93	B	1,2	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	NC*	0,66	22,05%	12,75%	12,99%	4,63%
94	B	1,2	9,27	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,75	23,97%	14,88%	14,27%	5,13%
95	B	1,2	4,98	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,47	18,41%	9,15%	10,64%	3,73%
96	B	1,2	6,55	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,71	23,09%	13,88%	13,68%	4,90%
99	A	1,2	0,81	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,35	16,35%	7,36%	9,35%	3,24%
100	A	1,2	4,91	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,85	26,15%	17,46%	15,75%	5,73%
103	C	1,2	6,79	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,56	20,08%	10,73%	11,71%	4,13%
104	C	1,2	9,34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,63	21,44%	12,10%	12,59%	4,47%
104-1	C	1,2	15,43	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,48	18,61%	9,33%	10,77%	3,77%
105-1	C	1,2	2,20	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,43	17,56%	8,39%	10,11%	3,53%

**Tableau 4.bis** : Probabilité d’AIS pour la tête et le cou (en surligné les cas présentant un risque de blessures d’une gravité donnée  $\geq 10\%$  (saumon) et  $\geq 20\%$  (bleu) pour les essais les essais de « référence » (« planche » et « lâché vertical »)

N° Test	Tapis	Vitesse (m/s)	HIC et AIS associés							N <sub>ij</sub> et AIS associés				
			HIC <sub>36</sub>	AIS1	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5	AIS6	N <sub>ij</sub>	AIS2	AIS3	AIS4	AIS5
98-1	B	0,7	0,62	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,30	15,46%	6,65%	8,80%	3,04%
102-1	A	0,7	0,47	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,27	15,06%	6,34%	8,56%	2,95%
98-2	B	1,2	3,71	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,50	18,88%	9,58%	10,94%	3,84%
102-2	A	1,2	3,05	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,32	15,84%	6,95%	9,03%	3,13%
102-5	A	1,2	3,46	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,37	16,60%	7,57%	9,51%	3,30%
102-6	A	1,2	0,68	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,31	15,71%	6,85%	8,96%	3,10%
108	C	0,7	0,62	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,15	13,26%	5,03%	7,47%	2,55%
109	C	0,7	0,11	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,17	13,59%	5,26%	7,67%	2,63%
110	C	1,2	0,60	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,26	14,81%	6,15%	8,41%	2,90%
111	C	1,2	3,49	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,29	15,32%	6,54%	8,72%	3,01%
98-3	B	-	9,57	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,87	26,64%	18,06%	16,08%	5,86%
98-4	B	-	9,98	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,02	30,36%	22,96%	18,70%	6,96%
102-3	A	-	2,21	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,43	17,60%	8,42%	10,13%	3,53%
102-4	A	-	3,11	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,52	19,31%	9,98%	11,21%	3,94%
112	C	-	5,30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,48	18,54%	9,26%	10,72%	3,76%
113	C	-	3,48	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,73	23,37%	14,19%	13,86%	4,97%
114	C	-	47,64	0,44%	0,16%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,58	20,37%	11,02%	11,90%	4,20%
115	C	-	83,55	3,26%	1,12%	0,42%	0,09%	0,01%	0,00%	0,77	24,41%	15,38%	14,56%	5,25%

## 5.1. Evaluation du critère de blessures tête et des risques lésionnels associés

L'ensemble des essais réalisés montre des valeurs de *HIC* extrêmement faible et dans tous les cas inférieur à 250 avec un cas à 156 et un autre à 226 (Tableau 2). A ces faibles niveaux de *HIC*, l'évaluation du risque lésionnel est peu fiable car se situant à l'extrémité basse des courbes de risque où les probabilités ont une précision relativement faible (*i.e.* intervalle de confiance large).

Cependant, il apparaît évident que le risque de blessure modérée (AIS 2) est négligeable voire nul dans la quasi-totalité des cas. Seul 4 cas ont des probabilités d'AIS 2+ non nulles. Il s'agit des essais numéros 16 et 18, à 0,7 m/s (Tapis Constructeur B), des essais numéros 17, 19 et 60 à 1,2 m/s (également tapis Constructeur B). Les cas 16,17, 18 et 19 ont la particularité que la trappe ne s'est pas ouverte correctement lors des essais. Etant donné les niveaux d'accélération enregistrés, deux cas présentent un risque non négligeable (> 10%) bien que relativement faible, à savoir les essais n°18 et 19, respectivement à 0,7 et 1,2 m/s où l'évaluation du risque de blessure donne des probabilités d'AIS2+ de 14% et 28% respectivement. Ces deux cas ont la particularité d'être des essais avec « écharpe » dont le plus sévère sans ouverture de trappe. La probabilité de blessure de gravité AIS ≥ 3 tombe rapidement en dessous de 5% et 10% pour ces deux cas et est négligeable pour les autres.

A titre d'exemple, pour la tête les niveaux d'AIS cités correspondent respectivement aux blessures suivantes :

	<b>AIS 1</b>	<b>AIS 2</b>	<b>AIS 3 /4</b>	<b>AIS 5</b>
	<b>Mineure</b>	<b>Modérée</b>	<b>Sérieuse / Sévère</b>	<b>Critique</b>
<b>HIC</b>	<150	150 – 500	500 – 1800	> 1800
<b>Blessures au Cerveau</b>	Pas de commotion	Commotion légère	Commotion sévère 1 – 24hr	Pronostic vital engagé coma >24hr
<b>HIC</b>	<500	500 – 900	900 – 1800	> 1800
<b>Blessures au Crane</b>	Pas de fracture	Fracture mineure	Fracture majeure	Fracture engageant le pronostic vital

Il est difficile de déterminer une influence de la vitesse sur le risque de blessure sur l'ensemble des essais (Figure 8.a.) ou sur les essais où la trappe a correctement fonctionné (Exclusion des cas n° : 16, 17, 18 et 19, Figure 8.b.). Si les *HIC* calculés semblent logiquement augmenter, mais faiblement, avec la vitesse de fonctionnement du tapis pour l'ensemble des essais, ceci n'est pas aussi évident lorsque l'on regarde séparément les cas pour les essais de type « bras en avant » (Figure 9) et pour le sous ensemble « écharpe » (Figure 10). Toutefois, lorsque l'on regarde par tapis et par station, l'effet de la vitesse sur la valeur du *HIC* semble apparait plus clairement.

Toutefois, vu la dispersion entre essais pour une configuration de choc donnée, la comparaison simple des moyennes n'a pas réellement de sens. Une analyse statistique (analyse de variance) serait nécessaire pour déterminer un effet de la vitesse ou déduire une différence significative entre conditions d'essais ou entre tapis. Cependant, le nombre d'essais par catégorie est parfois insuffisant. De plus, le critère tête n'atteint pas des valeurs prédisant une probabilité significative de survenue de blessures modérée (Tableau 4). Seules des lésions mineures semblent susceptibles d'être causées par les tapis. En tout cas, en l'état des configurations de tests actuellement utilisés pour évaluer la dangerosité de ces tapis mécanique.



Cette configuration de test est à des vitesses relativement faibles en comparaison de celles usuelle pour une évaluation du risque de blessure par le *HIC*. Ce dernier a plutôt été développé pour des impacts plus sévères. Cependant, à notre connaissance, le *HIC* est le seul critère réellement robuste et fiable pour évaluer le risque de blessures de la tête.

**Evolution du HIC36 en fonction de la vitesse du tapis**

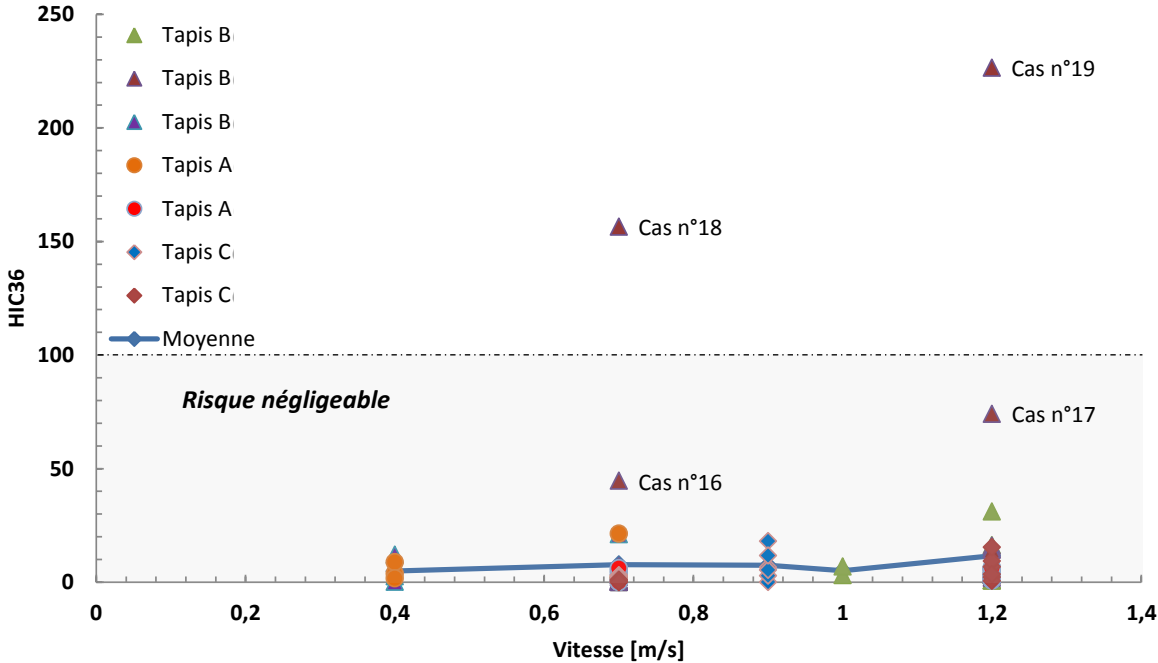


Figure 8.a : Evolution du *HIC*<sub>36</sub> en fonction de la vitesse du tapis pour toutes les configurations d’essais.

**Evolution du HIC36 en fonction de la vitesse du tapis**

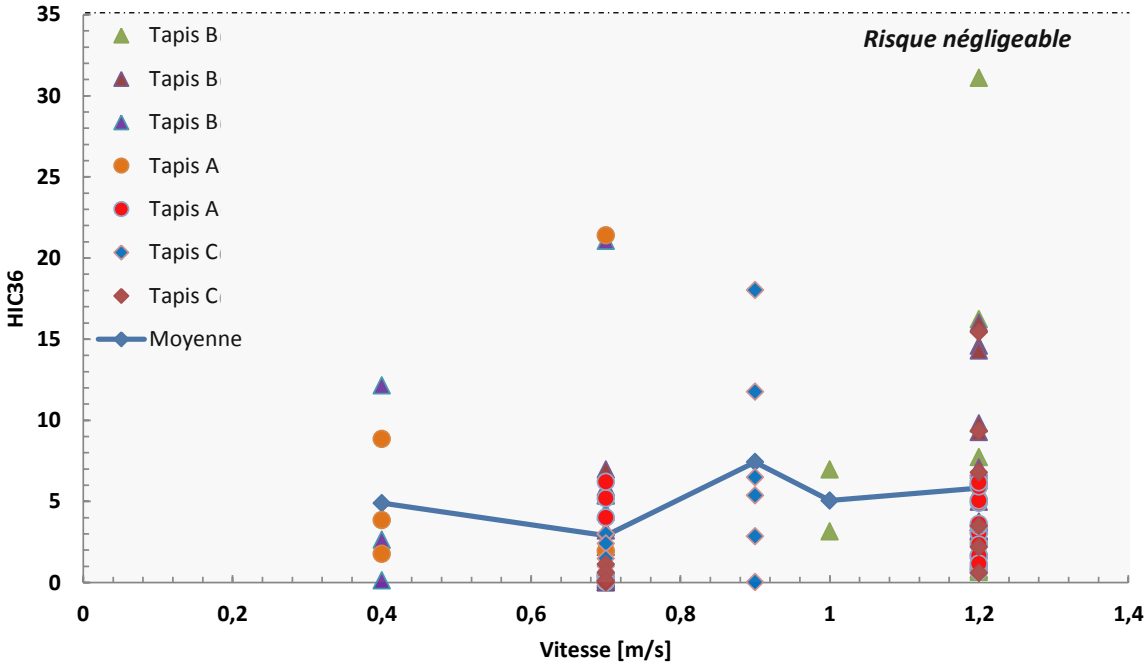


Figure 8.b : Evolution du *HIC*<sub>36</sub> en fonction de la vitesse du tapis pour toutes les configurations d’essais avec ouverture de trappe.

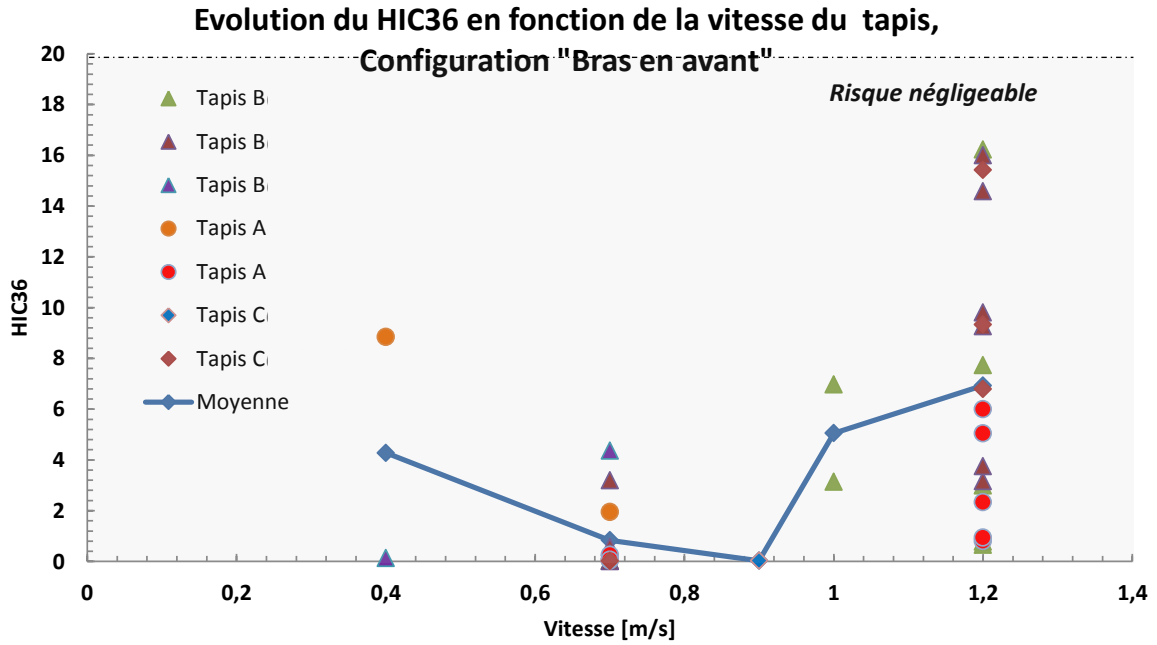


Figure 9 : Evolution du  $HIC_{36}$  en fonction de la vitesse du tapis, configuration « bras en avant ».

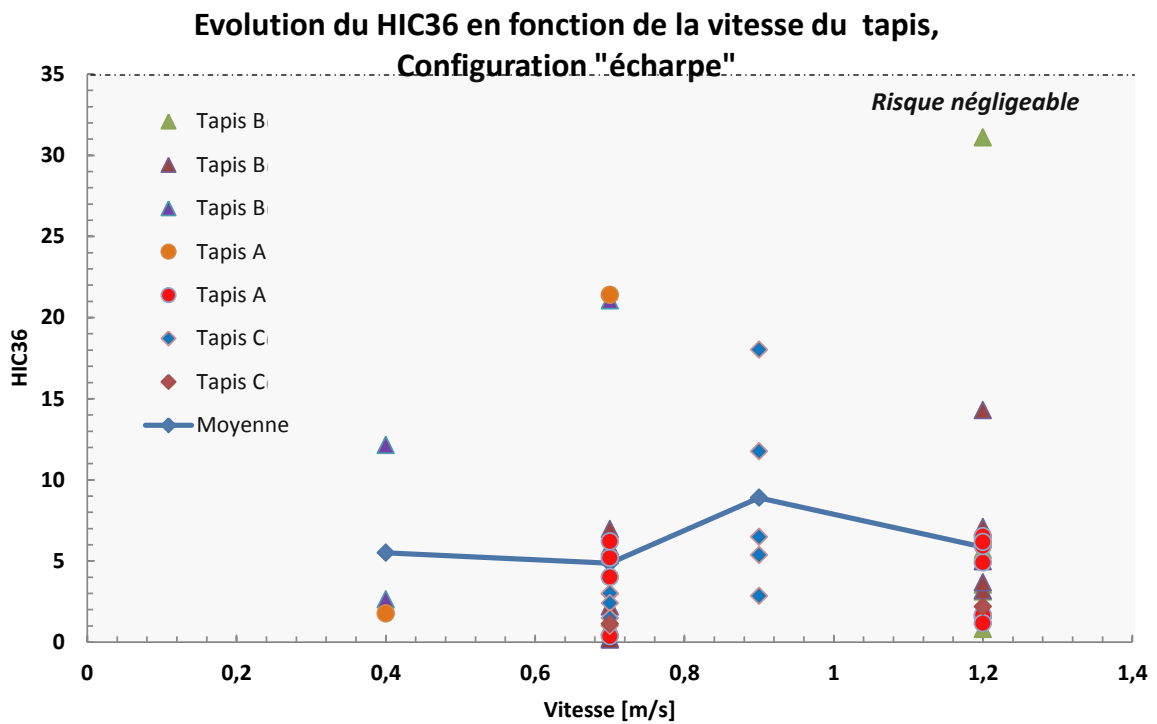


Figure 10 : Evolution du  $HIC_{36}$  en fonction de la vitesse du tapis, configuration « écharpe ».  
Pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.

Le protocole d'essai et l'usage du mannequin peut éventuellement poser questions. En théorie, un mannequin est un instrument de mesure dont les capacités principales sont la **répétabilité** et la **reproductibilité**.

En d'autres termes, un même essai avec un même mannequin devrait, théoriquement, donner des valeurs identiques, ou au minimum très proche. Plusieurs cas d'essai de tapis montrent des variations très importantes en termes de mesures du *HIC*. Les causes de ces variations, c'est-à-dire les éléments des essais qui ont changé et ont pu affecter les mesures, sont à étudier.

**En conclusion, le test proposé pour évaluer le risque de blessures de la tête chez l'enfant n'est pas suffisamment discriminant pour évaluer la performance des tapis. On peut se poser la question, vue les valeurs de *HIC* mesurées, si le test est suffisamment sensible et donc pertinent pour estimer les blessures éventuelles.**

La question sous-jacente est l'existence réelle du risque de blessures de la tête. En effet, si le test est fiable, alors il montre clairement que le risque de blessure de la tête est négligeable. Si cette absence de risque est réelle en service, un simple test de fonctionnement, par exemple d'ouverture des trappes serait par conséquent suffisant. Seule, l'accidentologie de terrain peut permettre de conclure s'il y a un risque avéré de lésions de la tête en cas de chute d'enfants et par suite si un test biomécanique est nécessaire. Une alternative, en l'absence de données épidémiologiques, serait une étude paramétrique par simulation numérique à l'aide d'un modèle simple du type corps rigide articulés permettant l'accès au critère de blessures (par exemple Madymo®).

## 5.2. Evaluation du critère de blessures cou et des risques lésionnels associés

Le Tableau 3 donne les valeurs des efforts et moments maximum pour le cou pour tous les essais. L'ensemble des forces mesurées qu'elles soient de compression, tension ou de cisaillement sont inférieures à, respectivement, 800 N, 1200 N (sauf pour 2 cas à 1280 N : les essais n° 26 et 27 à 1,2 m/s tapis Constructeur A) et 1000 N. Ces valeurs correspondent à aucun risque de blessures. Les moments de flexion/extension mesuré sont tous inférieurs à 30 N.m. Sauf pour un cas (essai n° 80 Constructeur B à 0,7 m/s) où un moment de flexion de 80,1 N.m a été mesuré, soit un risque faible de blessure mineures ou modérées.

Pour le cou et à titre d'exemple les AIS correspondent respectivement aux blessures suivantes :

	Pas de blessure	AIS 1 - 3		AIS 4 - 6	
		Mineure / Modérée		Sévère / Maximale	
<b>Compression (N)</b>	<1500	1500 – 4000	Lésion mineure des ligaments ou muscles	>4000	Fracture majeure et dislocation
<b>Tension (N)</b>	<1200	1200 – 3300	Lésion mineure des ligaments ou muscles	>3300	Rupture majeure du cou et dislocation
<b>Cisaillement (N)</b>	<1100	1100 – 3300	Lésion mineure des ligaments ou muscles	>3300	Rupture majeure du cou et dislocation
<b>Flexion (N.M)</b>	<61	61 – 190	Lésion mineure des ligaments ou muscles	190 – 203 Fracture majeure (AIS 3-5)	>203 Dislocation du cou (AIS 6)
<b>Extension (N.M)</b>	<47	47 – 57	Lésion mineure des ligaments ou muscles	>57	Rupture majeure du cou et dislocation

Le tableau 3 donne pour chaque essai les 4 valeurs du critère cou  $N_{ij}$ . L'analyse du risque de blessures à l'aide de ce critère lésionnel basé sur la force axiale et sur le moment de flexion que subit le cou montre un risque plus élevé que pour la tête.

Les valeurs du  $N_{ij}$  ont un niveau suffisamment élevé pour dans la quasi-totalité des cas donner un niveau de risque de blessures modérée (AIS2+) non négligeable ou en tout cas nécessitant un intérêt pour une évaluation du risque d'usage des tapis. Le risque prédit par le calcul du  $N_{ij}$  est donc plus élevé que celui prédit par les valeurs des Forces de cisaillement ou axiale ou encore du Moment de flexion/Extension. Rappelons que le  $N_{ij}$  est une combinaison de la Force axiale et du Moment de flexion/extension ce qui explique une prédiction du risque différente de celle basée uniquement sur une force ou un moment.

Si on regarde la probabilité de blessure d' AIS3+, 11 essais ont une probabilité supérieure à 15% (essais n° 17, 19, 44, 60, 62, 69, 80, 85, 92, 98 et 100) dont 6 supérieures à 20% (essais n° 17, 19, 60, 69, 92 et 100). C'est-à-dire une valeur significative sur les courbes de risque (Figure 5).

Ces 6 essais sont tous des essais sur tapis Constructeur B à 1,2 m/s à l'exception du n° 100 (Constructeur A). Parmi eux 4 sont du type « écharpe ». Si on regarde le risque d' AIS4+ celui-ci reste relativement élevé (>18%) pour 5 (ensemble des essais Constructeur B) de ces 6 essais.

Les essais n° 17, 19, 44, 60, 62, 69, 80 et 85 correspondent tous à des cas où la trappe ne s'est pas ouverte correctement. Le tableau ci-dessous récapitule les dysfonctionnements de trappe observés sur les vidéos.

N° de Test	Vitesse (m/s)	Type d'essais	Observations sur l'essai
17	1,2	Echarpe	Pas d'ouverture de la 2 <sup>nde</sup> trappe de sécurité
19	1,2	Echarpe	Pas d'ouverture de la 2 <sup>nde</sup> trappe de sécurité
44	1,2	Echarpe	Mauvaise ouverture de la 2 <sup>nde</sup> partie de la trappe de sécurité : ouverture très lente du 2 <sup>nd</sup> volet de trappe
60	1,2	Bras en avant	Ouverture des 2 volets de trappe en 2 temps. Déclenchement trappe de sécurité n°1, puis blocage d'ouverture à 62mm, puis nouveau choc pour déclencher la 2 <sup>nde</sup> partie de trappe
62	1,2	Bras en avant	Ouverture des 2 volets de trappe en 2 temps. Déclenchement trappe de sécurité n°1, puis blocage d'ouverture à 62mm, puis nouveau choc pour déclencher la 2 <sup>nde</sup> partie de trappe
69	1,2	Echarpe	Pas d'ouverture de la 2 <sup>nde</sup> trappe de sécurité
80	1,2	Bras en avant	Pas d'ouverture de la 2 <sup>nde</sup> trappe de sécurité
85	1,2	Echarpe	Pas d'ouverture de la 2 <sup>nde</sup> trappe de sécurité

Si on exclut ces cas de l'analyse, les valeurs moyennes du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse sont les suivantes :

Vitesse (m/s)	0,4	0,7	0,9	1	1,2
<b>moyenne</b>	0,23	0,28	0,32	0,73	0,51
<b>moyenne Bras en avant</b>	0,23	0,17	0,09*	0,73*	0,57
<b>moyenne écharpe</b>	0,24	0,34	0,37	-	0,53

\*1 seul cas

L'analyse de l'ensemble des valeurs maximales du critère cou ne permet de déduire d'influence particulière des conditions d'essai (« mains en avant » ou « écharpe »), et une influence attendue de la vitesse (Figure 11.a et 11.b, 12 et 13). Cependant, comme pour la tête, une analyse statistique serait nécessaire pour établir si la variation en fonction de la vitesse est significative.

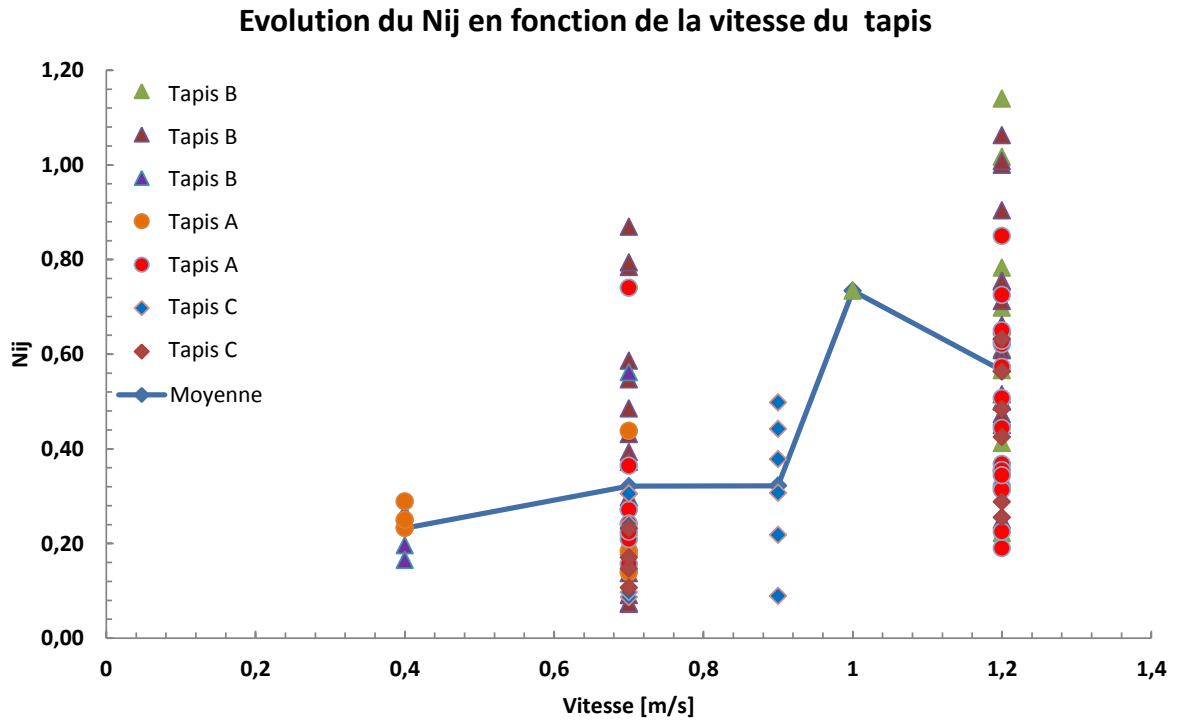


Figure 11.a : Evolution du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse du tapis pour toutes les configurations d'essais.

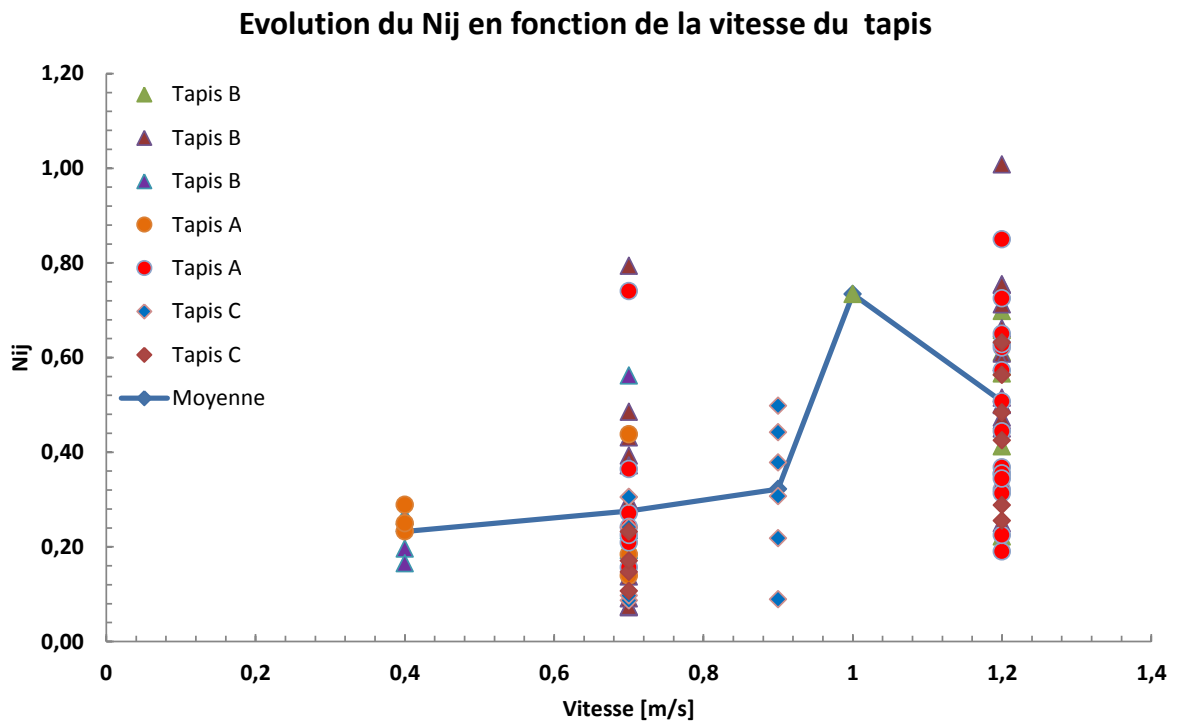
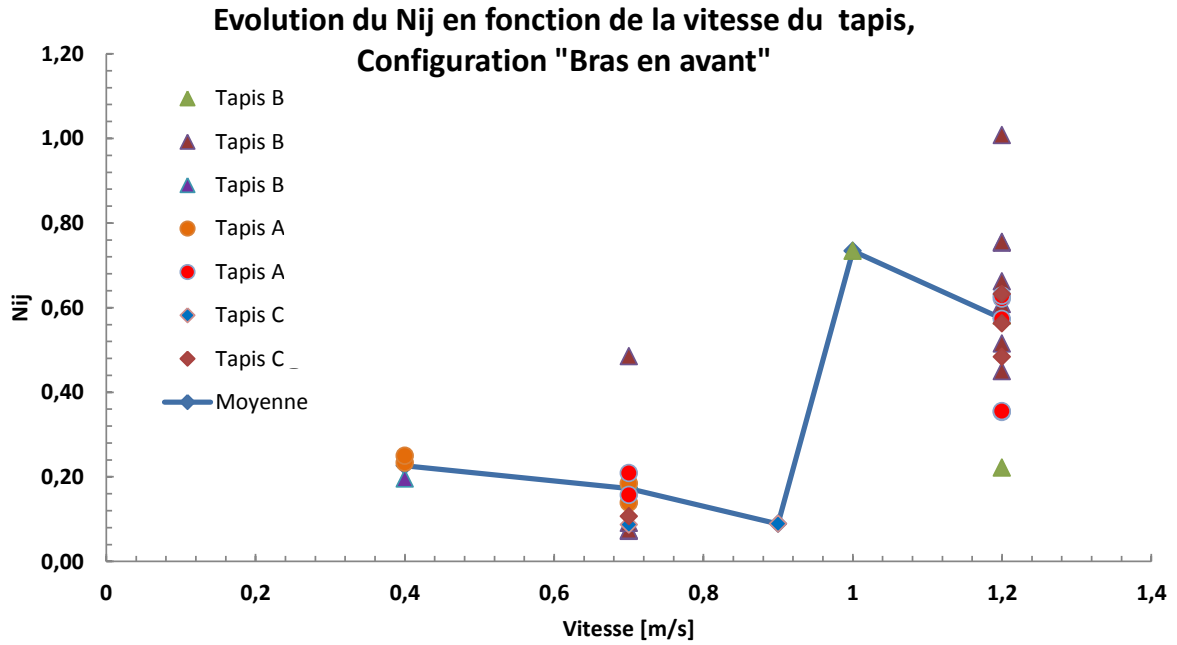
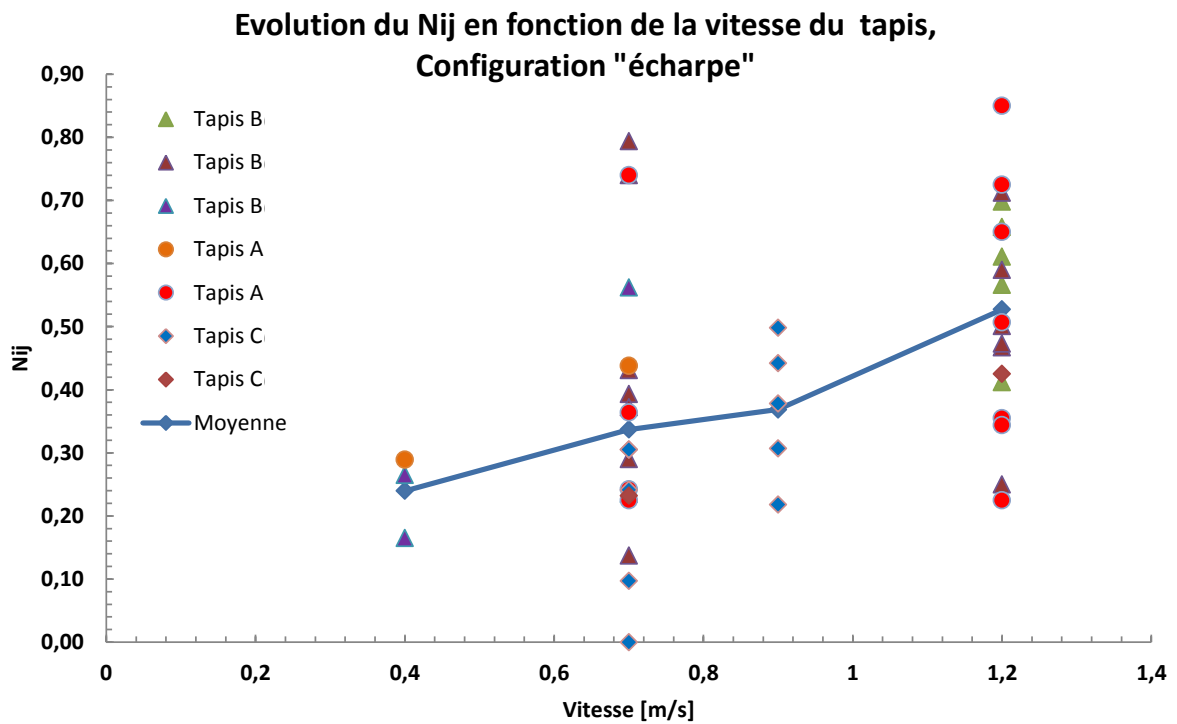


Figure 11.b : Evolution du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse du tapis pour toutes les configurations d'essais pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.



**Figure 12 :** Evolution du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse du tapis, configuration « bras en avant » pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.



**Figure 13 :** Evolution du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse du tapis, configuration « écharpe » pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.

Si on s'intéresse plus particulièrement aux mécanismes possibles de lésions, la comparaison des cas combinatoires possible du  $N_{ij}$  montre que c'est le  $N_{TE}$  qui est maximal dans la majorité des cas. En d'autres termes, le cou subit une tension/extension relativement forte impliquant un risque de lésions mineures. C'est le cas pour les essais Constructeur B et Constructeur A dans certaines stations.

L'ensemble des essais Constructeur C montre, à l'opposé, un mécanisme lésionnel de compression/flexion ( $N_{CF}$  maximal).

Les résultats des divers essais dans une station sont plus variables d'un tapis à l'autre et en fonction des conditions. Cette variation n'est pas, semble-t-il, liée à la vitesse du tapis. Les essais du Constructeur A montrent également un mécanisme de tension/extension du cou sauf dans 5 cas (sur 15). Tous ces cas sont à 1,2 m/s, parmi ceux-ci deux montrent un mécanisme de tension/flexion (n°26 et 27) et sont du type « mains en avant » avec des valeurs du critère similaire (0,6). Un autre test (n°28) montre le même mécanisme lésionnel mais avec un niveau moins élevé ( $N_{TF}$  de 0,2) et correspond au cas d'ouverture latérale des portes. Enfin, 2 essais, les n°52 (mains en avant) et 55 (écharpe) ont des mécanismes de blessures différents. A savoir, une compression/extension pour le test n°52 et une compression/flexion pour l'essai n°55.

Pour les tapis du Constructeur B, 5 tests sur 23 montrent un mécanisme lésionnel de compression/flexion. Ce sont les tests n°20,42, 45, 48 et 50. Les essais 20 et 42 ont cependant des  $N_{CF}$  relativement peu élevé, de l'ordre de 0,07, et sont des essais type « mains en avant ». Les 3 autres, sont des essais type « écharpe » et ont des valeurs du critère plus élevées, entre 0,25 et 0,47. Il est à noter également que, pour ces essais, les valeurs du  $N_{TE}$ , qui est le cas le plus fréquent, sont proches. Le test n°80 est un atypique car il montre un  $N_{TE}$ , tension/extension élevé.

En conclusion, le risque de blessures mineure des ligaments ou muscles est éventuellement à prendre en considération pour l'ensemble des tapis quel que soit la configuration d'essai.

### 5.3. Comparaison des tapis à deux ans d'intervalle

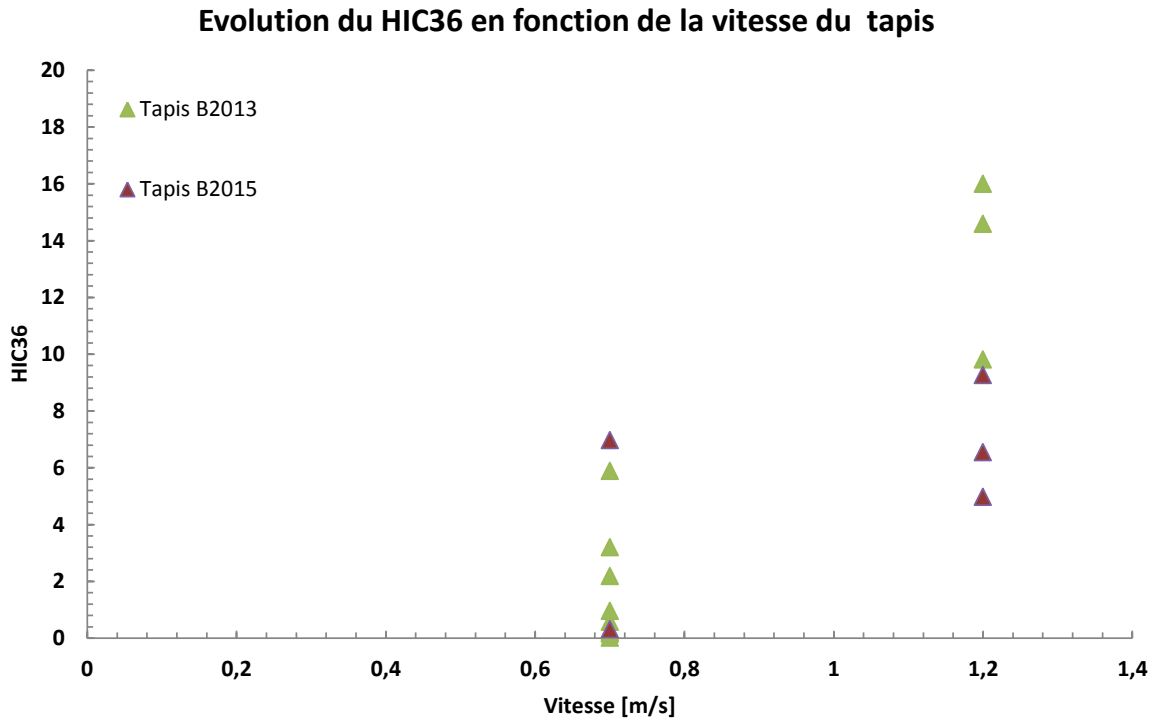
Deux tapis, Constructeur B et Constructeur A, ont été testés dans la même station à deux ans d'intervalle pour des vitesses de 0,7 m/s et 1,2 m/s.

Si comme précédemment on exclut de l'analyse les cas où les trappes ne se sont pas correctement ouvertes (et en ne gardant que les conditions similaire à savoir « écharpe » et « bras en avant »), les valeurs moyennes du  $HIC$  et du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse sont les suivantes :

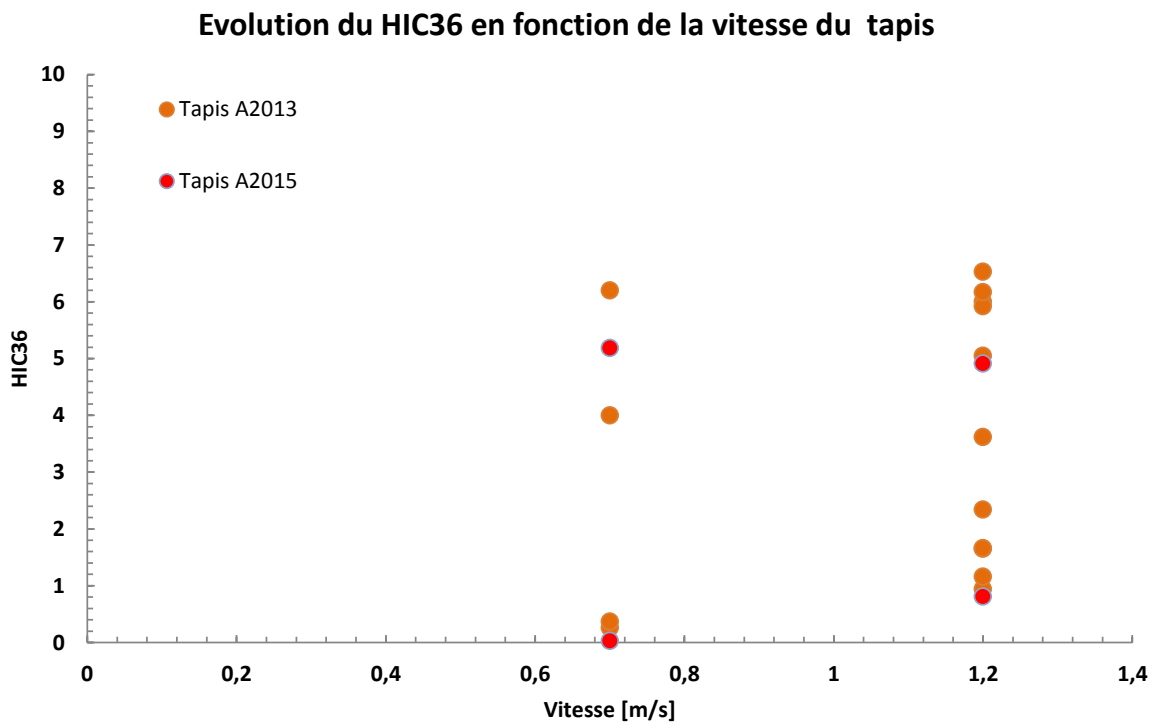
Vitesse (m/s)	HIC			Nij		
	0,7	1,2	Ensemble des cas	0,7	1,2	Ensemble des cas
<b>Constructeur B 2013</b>	1,65	13,47	4,87	0,23	0,52	0,31
<b>Constructeur B 2015</b>	3,64	6,93	5,61	0,64	0,72	0,70
<b>Constructeur A 2013</b>	2,70	3,73	3,46	0,25	0,45	0,41
<b>Constructeur A 2015</b>	2,61	2,86	2,73	0,48	0,62	0,52

Il y a une grande dispersion dans les essais (Figure 14 À 17) et dans certain cas (Constructeur A 2015) on ne dispose que de 2 échantillons par vitesse.

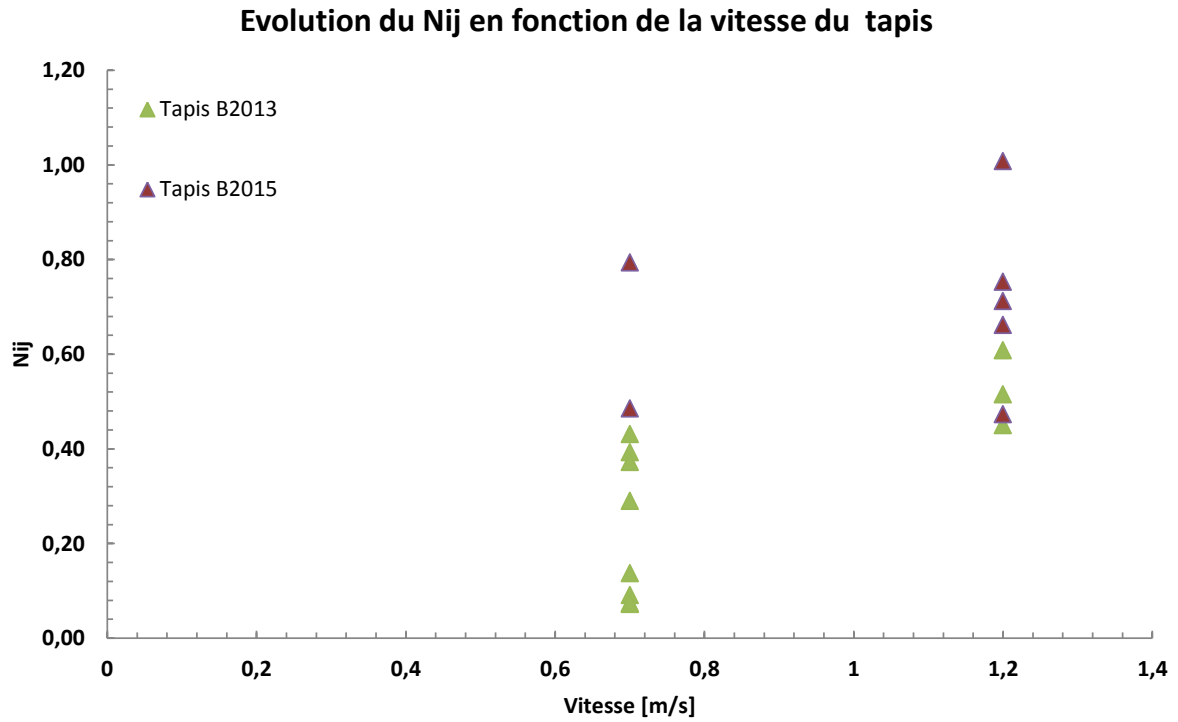




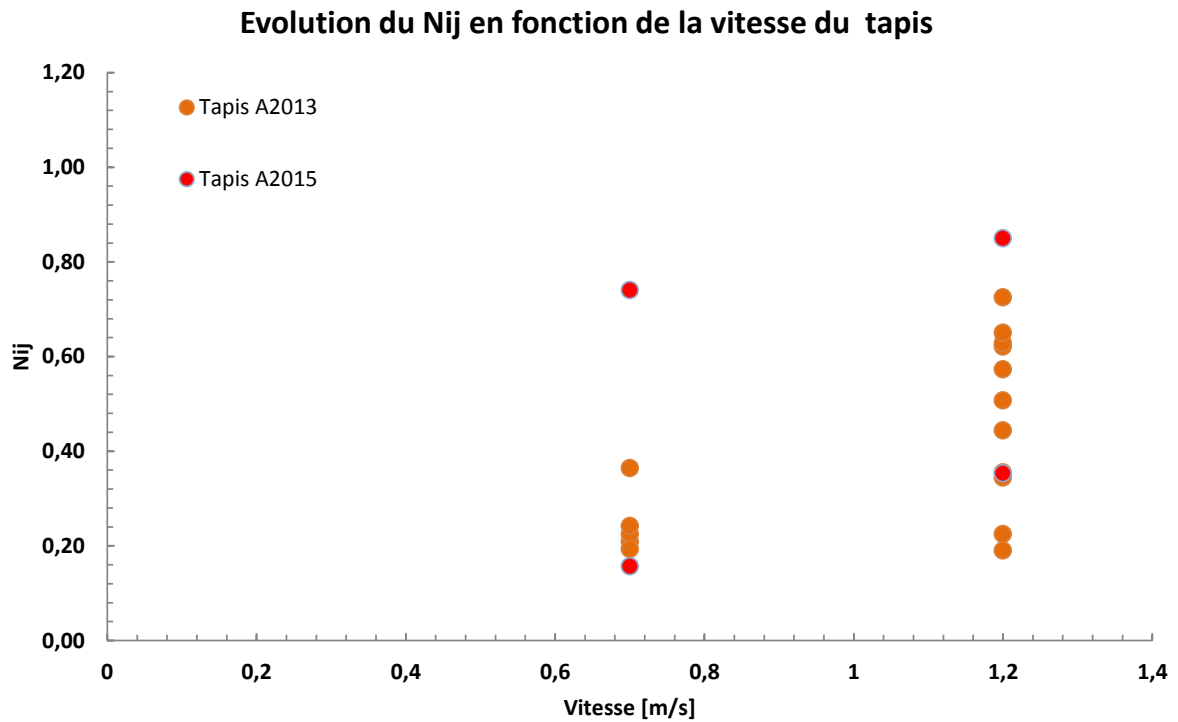
**Figure 14** : Comparaison à 2 ans d'intervalle du  $HIC_{36}$  en fonction de la vitesse du tapis Constructeur B. Pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.



**Figure 15** : Comparaison à 2 ans d'intervalle du  $HIC_{36}$  en fonction de la vitesse du tapis Constructeur A. Pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.



**Figure 16 :** Comparaison à 2 ans d'intervalle du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse du tapis Constructeur B. Pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.



**Figure 17 :** Comparaison à 2 ans d'intervalle du  $N_{ij}$  en fonction de la vitesse du tapis Constructeur A. Pour toutes les configurations d'essais avec ouverture de trappe.

L'analyse des données ne montrent pas d'augmentation significative du risque pour le *HIC* avec le vieillissement de systèmes d'ouverture. Concernant le  $N_{ij}$  une légère augmentation semble être visible avec le vieillissement. Toutefois, les incertitudes sur la répétabilité des tests évoqués précédemment et les faibles échantillons ne permettent pas une conclusion définitive. Toutefois, les niveaux du critère cou enregistrés et les probabilités en termes de lésions associées restent faibles et les évolutions au cours du temps non significative en l'état.

## 6. Conclusions

Une étude biomécanique a été réalisée à partir des données d'essais de chocs avec un mannequin enfant de type P6 (correspondant à un enfant de 6 ans) pour plusieurs types de tapis et plusieurs vitesses de déplacement variant de 0,4 m/s à 1,2 m/s. Diverses configurations d'accident ont été testées. Pour chaque essai, des critères lésionnels, choisis en fonction de l'état de l'art et des recommandations de l'IFSTTAR, pour la tête et le cou ont été calculés. Il s'agit pour la tête du HIC (Head Injury Criteria) et du Nij pour le cou (Neck Injury Criteria). A chacun de ces critères de blessures sont associés des courbes de risques qui donnent pour une gravité de blessure donnée (par exemple : mineur, sévère, ...) la probabilité d'avoir cette gravité de blessure. Le critère et la courbe de risque associée ne permettent pas de prédire le type de blessure mais seulement sa gravité. Des lésions sont caractéristiques des valeurs du critère mesuré et sont données à titre d'exemple dans le document.

Deux scénarios de références ont été considérés : 1°) un mannequin P6 modifié (type enfant de 6 ans) allongé à plat ventre sur la bande, bras en avant, à leur passage : les mains déclenche la trappe de sécurité. 2°) un mannequin P6 modifié (type enfant de 6 ans) allongé à plat ventre sur la bande, bras le long du corps, avec une écharpe infiniment solide (ceinture de sécurité) et infiniment collée au tapis (agrafée) étendue devant la tête, c'est le passage de l'écharpe tendue entre le cou et la bande qui déclenche la trappe de sécurité. Il est à noter que ces deux scénarios sont à ce jour purement fictifs, et qu'aucun REX depuis 2004 (date de départ du suivi des TRSM par le STRMTG) n'a rapporté de tel comportement, incident ou accident. En particulier le scénario 2°) est très improbable mais nous avons tout de même souhaité explorer les conséquences sur la santé d'un enfant de 6 ans de la survenu d'un tel évènement.

Pour ces deux scénarios, sur plus de 100 essais réalisés sur 4 campagnes d'essais entre 2010 et 2015, et pour 4 constructeurs différents : l'analyse des critères lésionnels et du risque de blessure associé montre que pour la tête le risque est quasiment négligeable dès lors que les trappes du tapis ont un fonctionnement correct. Concernant les lésions du cou, le risque est également minime. On observe moins de 15% de risque de blessures sérieuses et moins de 20% de blessures modérées pour un fonctionnement optimal des ouvertures de trappes.

Les limitations de l'étude concerne la faible répétabilité entre tests avec des conditions similaires. Cependant étant donné les faibles valeurs mesurées d'accélération de la tête et des efforts dans le cou, et malgré la dispersion des données, **on peut conclure que le risque, même à la vitesse élevée de 1,2 m/s est faible. Seuls les cas de mauvaise ouverture des trappes montrent un risque plus élevé non négligeable pour des enfants. En conséquence, à technologie équivalente de tapis, des tests fonctionnels d'ouverture de trappe peuvent suffire à déterminer de la bonne conception de la trappe du tapis.**

Il est donc recommandé de ne pas systématiquement réaliser des essais sur mannequins de chocs (test IFSTTAR). Ces essais avec mannequin de chocs seraient éventuellement nécessaires en cas de nouvelle conception ou de modification substantielle du principe d'ouverture des trappes. Il est recommandé de procéder pour les technologies de type de tapis évalués dans le présent rapport de procéder à un test fonctionnel d'ouverture. A savoir, à grande vitesse vérifier une bonne ouverture des 2 volets de la trappe de sécurité, vérifier l'absence de « point dur » entre l'ouverture du premier volet de trappe et du second volet de trappe, c'est à dire bien garantir une continuité de l'ouverture totale.

## 7. Références

1. BoCrom O, Svensson M, Aldman B, Hansson H, Håland Y, Lövsund P, Seemn T, Suneson A, Säljö A and Örtengen T (1996). *A new neck injury criterion candidate based on injury findings in the cervical spinal ganglia after experimental neck extension trauma*. Proceedings of IRCOBI Conference, 123-136.
2. Eppinger R, Sun E, Bandak F, Haffner M, Khaewpong N, Maltese M, Kuppa S, Nguyen T, Takhounts E, Tannous R, Zhang A and Saul R (1999). *Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems - II*. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), U.S. Department of Transportation (available on the NHTSA internet site: <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/>).
3. FMVSS 214. *Federal Motor Vehicule Safety Standard- Side Impact Protection: Dynamic Performance Requirement*. U.S. Department of Transportation.
4. Hertz E (1993). *A note on the Head Injury Criterion (HIC) as a predictor of the risk of skull fracture*. 37th Annual Proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine, 303-312.
5. Hynd D, Sextion B, Walter L (2006). *Review of Injury Risk Calculation Techniques*. Livrable AP-SP51-0036 du projet européen « Advanced Protection Systems » TIP3-CT-2004-506503 « Aprosys ».
6. ISO 6487 (2002). *Véhicules routiers — Techniques de mesure lors des essais de chocs — Instrumentation*. ISO/TC22/SC12 Committee, International Organization for Standardization.
7. Kleinberger M, Sun E, Eppinger R, Kuppa S and Saul R (1998). *Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems*. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), U.S. Department of Transportation (available on the NHTSA internet site: <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/>).
8. Mertz HJ, Driscoll GD, Lennox JB, Nyquist GW, Weber DA (1982). *Responses of Animals Exposed to Deployment of Various Passenger Inflatable Restraint System Concepts for a Variety of Collision Severities and Animal Positions*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, pp. 352-368. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, DC.
9. Mertz HJ, Prasad P, Irwin AL (1997). *Injury Risk Curves for Children and Adults in Frontal and Rear Collisions*. Proceedings of the 41<sup>st</sup> Stapp Car Crash Conference, Society of Automotive Engineers Paper N°973318.
10. Mertz HJ, Prasad P (2000). *Improved Neck Injury Risk Curves for Tension and Extension Moment Measurements of Crash Dummies*. Stapp Car Crash Journal 44:59-75.
11. Newman J (1986). *A generalized acceleration model for brain injury threshold (GAMBIT)*. Proceedings of IRCOBI Conference, 121-131.
12. Oster J, Trommler B (1996). *Comparison of the six-year-old hybrid III, part 572 and TNO P6 child dummies*. Society of Automotive Engineers Paper 962437.
13. Prasad P, Daniel RP (1984). *A Biomechanical Analysis of Head, Neck, and Torso Injuries to Child Surrogates Due to Sudden Torso Acceleration*. Proceedings of the 28<sup>th</sup> Stapp Car Crash Conference, Society of Automotive Engineers Paper No. 841656.
14. Prasad P, Mertz H (1982). *The position of the United States delegation to the ISO working group 6b on the use of HIC in the automotive environment*. Society of Automotive Engineers Paper 821246.
15. SAE J211 (2007). *Instrumentation for Impact Test-Part 1-Electronic Instrumentation*. Safety Test Instrumentation Standards Committee, Society of Automotive Engineering, Warrendale PA, USA.
16. Schmitt K-U, Muser M, Walz F and Niederer P (2002). *N<sub>km</sub> - a proposal for a neck protection criterion for low speed rear-end impacts*. Traffic Injury Prevention, Vol 3(2): 117-126.
17. Walsh MJ, Kelleher B (1981). *Development and evaluation of a belt restraint system for small cars using force limiting: volume II: final report*. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), U.S. Department of Transportation. DOT-HS-806-106.