



Ecole d'ingénieurs
de l'aménagement durable
des territoires

Ecole Nationale
des Travaux Publics
de l'Etat

STAGE DE MISE EN SITUATION PROFESSIONNELLE

Organisme d'accueil :

CETE de Lyon

Thème du stage :

**Impact de la circulation poids lourds
sur les ouvrages d'art**

rue Maurice Audin
69518 Vaulx-en-Velin Cedex

téléphone :
+33 (0)4 72 04 70 70

télécopie :
+33 (0)4 72 04 62 54

<http://www.entpe.fr>

**COSTESEQUE
Guillaume
Promotion 56
Année 2010**

NOTICE ANALYTIQUE

	NOM	PRENOM	
AUTEUR	COSTESEQUE	Guillaume	
TITRE DU STAGE	Impact et gestion des poids lourds sur ouvrages d'art		
	ORGANISME D'AFFILIATION ET LOCALISATION	NOM PRENOM	
MAITRE DE STAGE	CETE de Lyon	CEREZO Véronique	
COLLATION	108 pages	6 annexes (22 pages)	30 réf. biblio.
MOTS CLES	Poids lourd, EMS, pont, ouvrage d'art, interdistance, effets extrêmes, agressivité, bridge formula		
RESUME	<p>L'étude porte sur les impacts des poids lourds et des EMS (European Modular Sytem) sur les ouvrages d'art et surtout sur les ponts. Il s'agit de connaître les effets extrêmes engendrés par ces véhicules lourds sur différentes configurations et différentes longueurs de ponts. Cela met en évidence que pour les courtes et moyennes travées (≤ 50 mètres), les EMS ne sont pas plus agressifs que les poids lourds classiques. Ils le deviennent pour les ponts de grande longueur, où ils peuvent excéder jusqu'à 40 % l'effet extrême dû au PL européen de référence, le semi-remorque de 40 tonnes. Globalement, les groupes de deux EMS sont plus agressifs que les groupes de trois PL correspondants, et ce pour une même charge transportée (120 tonnes). Cependant, l'introduction des EMS dans le trafic n'engendrent pas une hausse des effets extrêmes trop conséquente. Ce sont les impacts en termes de fatigue de ces EMS qui doivent surtout faire l'objet d'études plus approfondies.</p>		
ABSTRACT	<p>The study deals with trucks and EMS (European Modular Sytem) impacts on infrastructures, especially on bridges. The main goal is to know the extreme effects due to heavy vehicles on different bridge configuration and for different bridge length. This highlights that for short and medium spans (lower than 50 meters), the EMS are not more aggressive than the workhorses. But they are for long bridges spans, exceeding up to 40 % the extreme load of European reference workhorse. Two EMS are globally more aggressive than the corresponding group of three workhorses. However, introducing EMS in traffic does not mean a dramatic increase of extreme effects.</p>		

REMERCIEMENTS

Je tenais à remercier vivement ma maitre de stage, Madame CEREZO, chef de la section « Adhérence et sécurité » au LRPC de Lyon ainsi que Monsieur BOUTELDJA, chargé de recherche dans cette même section, pour leur accueil, pour leur encadrement, pour tout le temps qu'ils m'ont consacré ainsi que pour leurs conseils avisés. Je tiens également à remercier tous les agents de la section « Adhérence et sécurité » du Laboratoire Régional de Lyon qui ont rendu mon intégration aisée et qui ont su m'accompagner tout au long de ces cinq mois de stage.

Mes remerciements vont également à l'endroit des personnes qui ont de près ou de loin collaboré au travail technique de ce stage, qu'elles soient du CETE de Lyon, du CETE de l'Est, du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris, ou encore de l'ENTPE et que je ne saurais citer sans en oublier. Qu'elles reçoivent ici ma plus sincère gratitude.

Enfin, je tiens à témoigner ma reconnaissance à M. EDOUARD Mario, mon collègue haïtien qui a réalisé son Travail de Fin d'Etudes sous la direction de Madame CEREZO et avec qui j'ai partagé le quotidien au CETE durant trois mois. Je le remercie de m'avoir prodigué ces précieuses recommandations.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	8
1 PRESENTATION	9
1.1 Contexte	9
1.1.1 Commanditaire	9
1.1.2 Commande	9
1.1.3 Motivations	10
1.2 Méthodologie	11
1.2.1 Méthodes existantes	11
1.2.1 Méthode adoptée	12
2 ÉTAT DE L'ART	14
2.1 Vocabulaire et notions clés	14
2.1.1 Unités de PL	14
2.1.2 Types d'essieux	15
2.1.3 Agressivité	16
2.2 Études précédentes	17
2.2.1 Présentation et méthodologies	17
2.3 Conclusion de l'état de l'art	30
2.3.1 Synthèse des recommandations	30
2.3.2 Limites des études	31
3 HYPOTHESES	32
3.1 Poids lourds étudiés	32
3.1.1 Présentation	32
3.1.2 Données de trafic	32
3.1.3 Silhouettes d'EMS envisagées	35
3.1.4 Silhouettes choisies	37
3.2 Charges	41
3.2.1 Réglementations	41
3.2.2 Cas de charges	42
3.2.3 Caractéristiques des EMS retenus	43
3.3 Ponts étudiés	44
3.3.1 Modélisations retenues	44
3.3.2 Lignes d'influence	46

4	SIMULATIONS	47
4.1	Présentation du logiciel	47
4.1.1	Présentation	47
4.1.2	Interface	48
4.1.3	« Prétraitements »	48
4.2	Etude de cas simples	49
4.2.1	Véhicules individuels	49
4.2.2	Groupes de véhicules	61
4.2.3	Cas particuliers : dépassement, croisement	65
4.3	Etude de trafics incluant les EMS	67
4.3.1	Modification des fichiers de trafic	67
4.3.2	Calculs sous POLLUX	70
5	FORMULES DE PONT	74
5.1	Formules existantes	74
5.1.1	Historique	74
5.1.2	Présentation synthétique	74
5.1.3	Commentaires	77
5.2	Méthodologies	77
5.3	Remarques	78
5.4	Propositions	78
	CONCLUSION	79
	DEFINITIONS	81
	GLOSSAIRE	82
	ANNEXES	83
	BIBLIOGRAPHIE	106

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.1 : Mécanisme sous-jacents à la décision d'introduction des EMS.....	11
Figure 1.2 : Schéma de cohérence de l'étude	13
Figure 2.1 : Schéma des types d'essieux couramment utilisés.....	15
Figure 2.2 : Schéma de la charge d'un poids lourd sur un ouvrage d'art.....	23
Figure 2.3 : Récapitulatif des effets des PL sur les infrastructures (étude DG/TREN).....	24
Figure 2.4 : Principe de la modélisation utilisée par l'étude OCDE.....	26
Figure 3.1 : Analyse statistique du trafic PL en 2005.....	34
Figure 3.2 : Carte des itinéraires des PL étrangers sur le réseau routier français en 2005	38
Figure 3.3 : Schéma tridimensionnel d'un élément de pont.....	46
Figure 3.4 : Exemple d'une ligne d'influence théorique.....	46
Figure 4.1 : Principe de fonctionnement du logiciel POLLUX.....	47
Figure 4.2 : Histogramme des moments fléchissants maximaux relatifs à mi-travée.....	59
Figure 4.3 : Illustration des moments fléchissants maximaux relatifs à mi-travée.....	61
Figure 4.4 : Schéma de la configuration de deux pelotons de poids lourds.....	63
Figure 4.5 : Histogramme des moments fléchissants à mi-travée pour ponts isostatiques	65
Figure 4.6 : Histogramme des efforts tranchants extrêmes pour ponts isostatiques et à 2 travées	66
Figure 4.7 : Schéma de la ligne d'influence transversale d'un pont.....	66
Figure 4.8 : Principe de modification des fichiers de trafic pour l'introduction d'EMS	69
Figure 4.9 : Carte de présentation des sites de mesure du trafic poids lourds.....	70
Figure 4.10 : Histogrammes du trafic poids lourds au mois de février 2010, station de Saint-Jean de Védas	71
Figure 4.11 : Allure de l'évolution des efforts extrêmes en fonction du pourcentage d'EMS introduits dans le trafic.....	71
Figure 4.12 : Moment fléchissant maximal relatif en fonction du pourcentage d'EMS introduits	73
Figure 5.1 : Graphique des valeurs de poids limites selon la longueur du véhicule.....	76
Figure 5.2 : Schéma de poids lourd américain	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats de l'étude avec Excel [TA, 2009].....	18
Tableau 2 : Résultats de l'étude avec POLLUX [TA, 2009].....	18
Tableau 3 : Silhouettes d'EMS choisies [SETRA, 2007].....	20
Tableau 4 : Recommandations de limitations de poids [SETRA, 2007].....	21
Tableau 5 : Silhouettes d'EMS choisies [DG/TREN, 2008].....	23
Tableau 6 : Analyse statistique du trafic PL de 2005.....	33
Tableau 7 : Poids lourds du trafic retenus.....	35
Tableau 8 : Silhouettes d'EMS envisagées.....	36
Tableau 9 : Silhouettes d'EMS choisies pour la présente étude.....	37
Tableau 10 : Combinaisons des PL de trafic en EMS retenus.....	40
Tableau 11 : Récapitulatif des limitations de charge à l'essieu.....	41
Tableau 12 : Caractéristiques des PL du trafic et des EMS retenus.....	43
Tableau 13 : Analyse statistique de la « population » des ponts en France en 2008.....	44
Tableau 14 : Configurations de ponts retenues pour la présente étude.....	45
Tableau 15 : Illustration du prétraitement sous POLLUX.....	48
Tableau 16 : Matrice de corrélation entre les variables (Moments fléchissants maximaux pour ponts isostatiques).....	50
Tableau 17 : Matrice de corrélation entre les variables (Efforts tranchants minimaux pour ponts isostatiques).....	52
Tableau 18 : Matrice de corrélation entre variables (Moments fléchissants maximaux avec appui à mi-travée, ponts à 2 travées).....	52
Tableau 19 : Matrice de corrélation entre variables (Moments fléchissants minimaux avec appui sur pile, ponts à 2 travées).....	53
Tableau 20 : Matrice de corrélation entre variables (Efforts tranchants maximaux, ponts à 2 travées).....	54
Tableau 21 : Matrice de corrélation (Moments fléchissants maximaux avec appui à mi-travée de rive, ponts à 3 travées).....	54
Tableau 22 : Matrice de corrélation (Moments fléchissants maximaux avec appui à mi-travée centrale, ponts à 3 travées).....	55
Tableau 23 : Matrice de corrélation (Moments fléchissants maximaux avec appui sur pile, ponts à 3 travées).....	55
Tableau 24 : Matrice de corrélation entre les variables (Efforts tranchants maximaux pour ponts à trois travées).....	56
Tableau 25 : Agressivité relative des PL de l'étude.....	58
Tableau 26 : Classement des agressivités des EMS de l'étude.....	60
Tableau 27 : Valeurs de quelques distances de sécurité en fonction de la vitesse.....	61
Tableau 28 : Comparaison des effets extrêmes des groupes de PL du trafic et des groupes d'EMS.....	62
Tableau 29 : Classement des différents groupes de « workhorses » et d'EMS.....	64
Tableau 30 : Comparaison des effets extrêmes des groupes d'EMS selon les interdistances.....	64
Tableau 31 : Récapitulatif des formules de pont existantes.....	75

INTRODUCTION

Dans le cadre de mon stage de mise en situation professionnelle, j'ai pu intégrer l'équipe « adhérence et sécurité » dirigée par Madame CERESO Véronique. Cette unité appartient au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Lyon. J'ai ainsi eu l'occasion de reprendre et compléter les sujets de recherche de deux de mes prédécesseurs de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), Messieurs TA Van-Bao et MARIA Ludovic, qui avaient eu comme sujets respectifs, l'impact des poids-lourds sur les ouvrages d'art puis sur les chaussées. Pour ma part, je me suis intéressé au premier sujet à savoir les conséquences qu'aurait l'introduction de poids lourds plus longs et transportant des charges plus lourdes sur les ouvrages d'art.

Cette étude s'inscrivait dans la réponse faite par un consortium entre le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le SETRA, à l'analyse technique demandée par la Direction Européenne des Transports et de l'Environnement (DG-TREN) en 2009. Ce travail provient de la demande de plusieurs entités afin d'autoriser la circulation de systèmes modulaires, appelés European Modular System (EMS). Ces nouvelles configurations de poids lourds sont déjà autorisées dans certains pays européens comme la Suède, la Finlande, le Danemark ou les Pays-Bas. Ce sont des unités standards de poids lourds assemblées afin de constituer un seul convoi. Ces poids lourds sont plus longs et plus lourds que ce que nous pouvons voir actuellement sur les routes en France. Avant de pouvoir accepter à ces « méga camions », il est essentiel que les pouvoirs publics puissent juger de la pertinence d'une telle autorisation. Ce document vise à apporter certaines recommandations du point de vue des infrastructures existantes. Dans ce contexte, il est essentiel de préciser et de comparer les dommages qu'auraient différents types de camions sur des ponts types.

Après avoir pris le soin de définir les objets, nous réaliserons un état de l'art s'appuyant sur les études antérieures sur le sujet. Les travaux préliminaires réalisés au LRPC de Lyon en 2009 sous la direction de Madame CERESO ont mis à jour certains résultats non triviaux : il serait ainsi préférable d'opter pour l'autorisation de véhicules type EMS plutôt que d'encourager les véhicules actuels à transporter une plus grande charge. En effet, ces derniers causeraient plus de dégâts aux chaussées et aux ponts que ne le feraient les poids lourds combinés.

Dans un second temps, nous décrivons la méthodologie adoptée dans notre cas. Nous introduirons et nous justifierons les hypothèses prises pour réaliser cette étude. Ces hypothèses concernent le choix des poids lourds et des EMS, tant au niveau de la configuration que des caractéristiques techniques. Le choix des ponts sera également présenté et justifié.

Nous présenterons ensuite les résultats auxquels nous avons abouti. Cette partie comprendra aussi une description des conditions d'obtentions de ces résultats ainsi qu'une discussion sur la validité de ces derniers. Cette rétrospective aura pour but de formuler certaines recommandations. Celles-ci serviront pour la suite qu'il serait souhaitable de donner à ce travail de simulation.

1 PRESENTATION

Il s'agit pour l'équipe de recherche associée (ERA 12) au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, de répondre à la commande technique lancée par les services de la Commission Européenne au sujet de l'introduction ou non des EMS¹. Dans ce cadre-là, les impacts qu'auraient de tels poids lourds sur le réseau routier en France doivent être déterminés.

1.1 Contexte

L'appel d'offre a été lancé en septembre 2009 par la Commission Européenne, plus exactement par la Direction Générale des Transports, de la Mobilité et de l'Énergie (DG-TREN). L'équipe ERA 12 du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon travaille sur ce sujet car elle est directement liée avec le LCPC qui forme lui-même un consortium avec le Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements (SETRA), afin de répondre à cet appel à projet.

1.1.1 Commanditaire

La DG/TREN est l'organisme européen spécialisé sur les domaines de la mobilité, des transports mais aussi de l'énergie. Depuis le courant de l'année 2010, la DG TREN a été rebaptisée en DG MOVE à la suite de la séparation des services de transport de ceux de l'énergie. Il est l'organe consultatif de la Commission européenne. Pour rappel, l'Union européenne à 27 pays compte plusieurs institutions dont le Conseil de l'Union européenne, le Parlement européen et la Commission européenne (dont le nom officiel est la Commission des communautés européennes). Cette dernière est l'institution garante de la mise en œuvre des politiques communes au sein de l'Union européenne ; elle dispose du droit d'initiative en matière de législation. Dans son travail, la Commission européenne s'appuie sur 40 directions générales (DG). Ces directions générales formulent des propositions sur des dossiers qui sont sujets au débat, après avoir consulté les différents groupes d'intérêt ainsi que les administrations nationales. C'est dans ce contexte là que la DG chargée du transport a saisi l'administration française, afin qu'elle produise un avis quant à l'homologation des EMS sur les réseaux routiers nationaux en vue d'une autorisation européenne.

1.1.2 Commande

L'appel d'offre européen a été emporté par le consortium. Le dossier à constituer doit comporter différents points :

- Une analyse des conclusions tirées par les études précédentes, en faisant le point sur les accords et les désaccords, mais aussi en reprenant les hypothèses énoncées et en évoquant la nécessité d'études complémentaires si besoin est.
- Une étude socio-économique avec :
 - une analyse des élasticités,
 - une étude par segments de marché dans l'Union européenne,
 - une analyse des pertes et profits,
 - une analyse des parts modales du rail et de la route selon les valeurs des élasticités, des relations nationales et internationales.
- Et bien sûr, une étude technique portant entre autres sur :
 - Une définition des coûts, des masses et de la « géométrie » des nouveaux véhicules,
 - L'identification des risques et des opportunités en matière de sécurité,
 - Les risques et les bénéfices pour les infrastructures,

¹ Ces configurations de poids lourds portent différentes appellations : EMS pour European Modular System, « gicaliner », EuroCombi, EcoLiner, véhicule commercial innovant, LHV pour « Longuer and Heavier Vehicule »... Nous avons décidé de ne concerner ici qu'une seule dénomination, à savoir EMS afin de conserver la plus grande neutralité.

-
- La recherche de technologies pour réduire les risques pour les infrastructures,
 - L'évaluation de la performance environnementale des poids lourds.

Parmi ces éléments, le présent rapport s'attachera essentiellement à répondre aux points portant sur l'analyse technique des risques pour les infrastructures et plus particulièrement pour les ouvrages d'art. Il sera également énoncé quelques recommandations de régulation vis-à-vis des vitesses et des interdistances.

1.1.3 Motivations

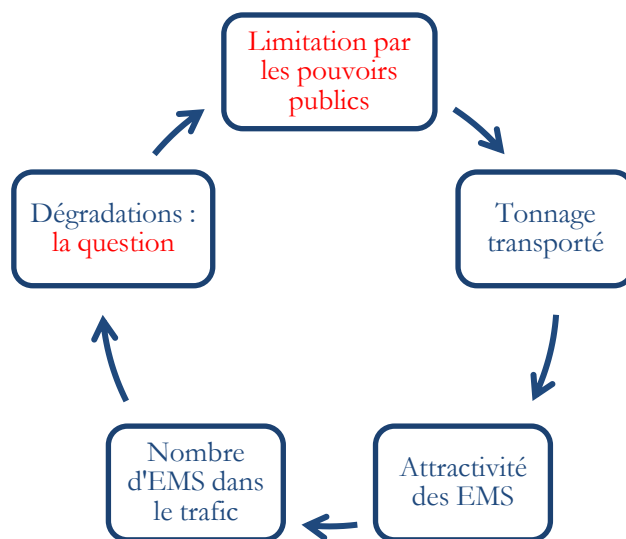
La question de l'introduction de camions plus longs et plus lourds a provoqué de nombreux débats. L'idée de ces « méga camions » est apparue dès les années 2000. Ce type de poids lourds est soutenu par de nombreux opérateurs de transport routier, associés au sein du « club 25.25 ». Parmi les acteurs en France, nous pouvons énumérer :

- Des transporteurs de fret (Norbert Dentressangle, TNT...),
- Des constructeurs (Volvo, Renault trucks...),
- Des carrossiers (SAMRO) ou d'autres entreprises (Michelin...).

Les opposants sont essentiellement représentés soit par des associations écologistes (France Nature Environnement), soit dans des associations d'usagers automobilistes ou de riverains d'axes routiers supportant un trafic poids lourds important. Ces diverses associations regroupées au sein de l'alliance « NO MEGA TRUCKS » voient l'arrivée des EMS comme un véritable danger en termes de sécurité routière, d'un point de vue environnemental mais aussi pour les finances publiques.

Les arguments lancés dans les débats au sujet des EMS portent sur la sécurité routière, les enjeux en termes d'infrastructures et donc sur les coûts pour la collectivité. L'efficacité énergétique, environnementale et économique des véhicules est aussi abordée. Les défenseurs affirment qu'un ensemble modulaire pourrait permettre de réduire le nombre de poids lourds en augmentant le tonnage transporté par camion, d'où une réduction d'émission de gaz à effet de serre. Ils avancent également les gains pour les transporteurs qui pourraient faire circuler deux poids lourds au lieu de trois actuellement, pour transporter une même charge utile.

Quant aux opposants, ils soutiennent que les EMS ne feraient que court-circuiter la politique favorable au ferroutage en améliorant la compétitivité des poids lourds vis-à-vis du transport ferré. Ils contredisent l'argument de la réduction de pollution en soulignant que l'augmentation du transport de marchandises par la route va dans le sens contraire. Selon eux, les infrastructures en Europe ne sont pas prévues pour permettre le passage de ces méga camions ce qui entraînerait de forts coûts de travaux de mise aux normes.



Les enjeux de l'étude

Figure 1.1 : Mécanisme sous-jacents à la décision d'introduction des EMS

L'intervention des pouvoirs publics aurait pour but de limiter le tonnage transporté. Il pourrait conserver les limitations actuelles ou les élever afin de permettre la circulation des EMS. En fonction du tonnage autorisé, les systèmes modulaires auraient plus ou moins d'attrait, ce qui influencerait leur part dans le trafic poids lourds total. La question est alors de déterminer l'impact que cela aurait sur les infrastructures. Le degré de dégradation serait alors un élément rétroactif quant à la limitation de tonnage par les décideurs publics.

Devant les diverses mobilisations pour ou contre ces nouveaux poids lourds, les pouvoirs publics doivent décider de l'opportunité ou non de leur permettre de circuler librement. Certains pays européens se sont déjà lancés dans des expérimentations ou ont déjà homologué les systèmes modulaires sur leurs routes. C'est le cas des pays scandinaves (Finlande et Suède) pour l'autorisation de ces nouveaux poids lourds (et ce depuis plus de 10 ans), des Pays-Bas, de la Belgique, du Danemark et de l'Allemagne pour les expérimentations.

C'est pour cela qu'il a été demandé aux services scientifiques et techniques de l'État de réaliser plusieurs études afin d'apporter des éléments de réponse sur ces différents aspects.

1.2 Méthodologie

La question de l'autorisation de véhicules plus longs et plus lourds s'est présentée dans d'autres pays avant de se poser en France. Il est intéressant de relever les méthodes étrangères qui ont été adoptées afin de faire face à l'arrivée de ces méga-camions.

1.2.1 Méthodes existantes

Les Américains n'ont imposé que peu de limites à l'expansion des gabarits et des charges de leurs PL. De la sorte, des véhicules très longs et surtout très lourds ont pu circuler sur leur réseau routier. Les autorités ont alors réalisé des tests empiriques afin de déterminer les impacts des poids lourds sur les chaussées et sur les ponts. Ils ont développé une formule permettant de limiter le poids des véhicules afin de protéger les ponts. Cette limitation ne se présente pas sous la forme d'une valeur maximale, uniforme pour l'ensemble des poids lourds. Elle dépend de la longueur de charge considérée : plus un PL disposera d'essieux et sera long, plus il pourra transporter de marchandises. Cela s'explique par le fait que ce sont les charges à l'essieu qui sont déterminantes dans la dégradation des infrastructures. En répartissant la charge sur une plus grande longueur et un

plus grand nombre d'essieux, la charge uniformément répartie diminue. Cela sera détaillé par la suite.

Les Australiens, les Sud-Africains et les Canadiens ont développé une autre méthodologie qui se base sur un principe de performances. Il s'agit de standards de performances (PBS pour « Performance Based Standards ») qui s'appuie davantage sur le comportement du poids lourd sur route plutôt que sur ses caractéristiques de poids et de dimension. A partir de critères de performance, ils testent chaque matériel afin de les homologuer ou non. Les critères concernent :

- Le comportement longitudinal à basse vitesse :
 - Capacité à s'engager sur une pente donnée ;
 - Capacité à maintenir le mouvement et une vitesse pour une pente donnée ;
 - Capacité d'accélération en départ arrêté sur route ;
- Le comportement longitudinal à grande vitesse :
 - Occupation du véhicule sur route rectiligne ;
- Le comportement directionnel à basse vitesse :
 - Zone couverte par tourne à droite ou tourne à gauche ;
 - Oscillation de l'avant du véhicule ;
 - Oscillation de l'arrière du véhicule ;
 - Forces de friction horizontales des pneus sur la chaussée ;
- Le comportement directionnel à grande vitesse :
 - Seuil de basculement statique ;
 - Amplification des oscillations de l'arrière du véhicule ;
 - Comportement des essieux arrières lors d'une manœuvre brusque ;
 - Coefficient d'amortissement des oscillations ;
 - Stabilité au freinage ;
- L'impact sur les infrastructures :
 - Chargement vertical sur chaussées ;
 - Chargement horizontal sur chaussées ;
 - Distribution de la pression des pneus ;
 - Chargement sur pont.

Ils donnent ainsi des valeurs cibles que les véhicules doivent atteindre. Cette méthode permet de ne pas restreindre les techniques satisfaisant aux exigences de l'homologation.

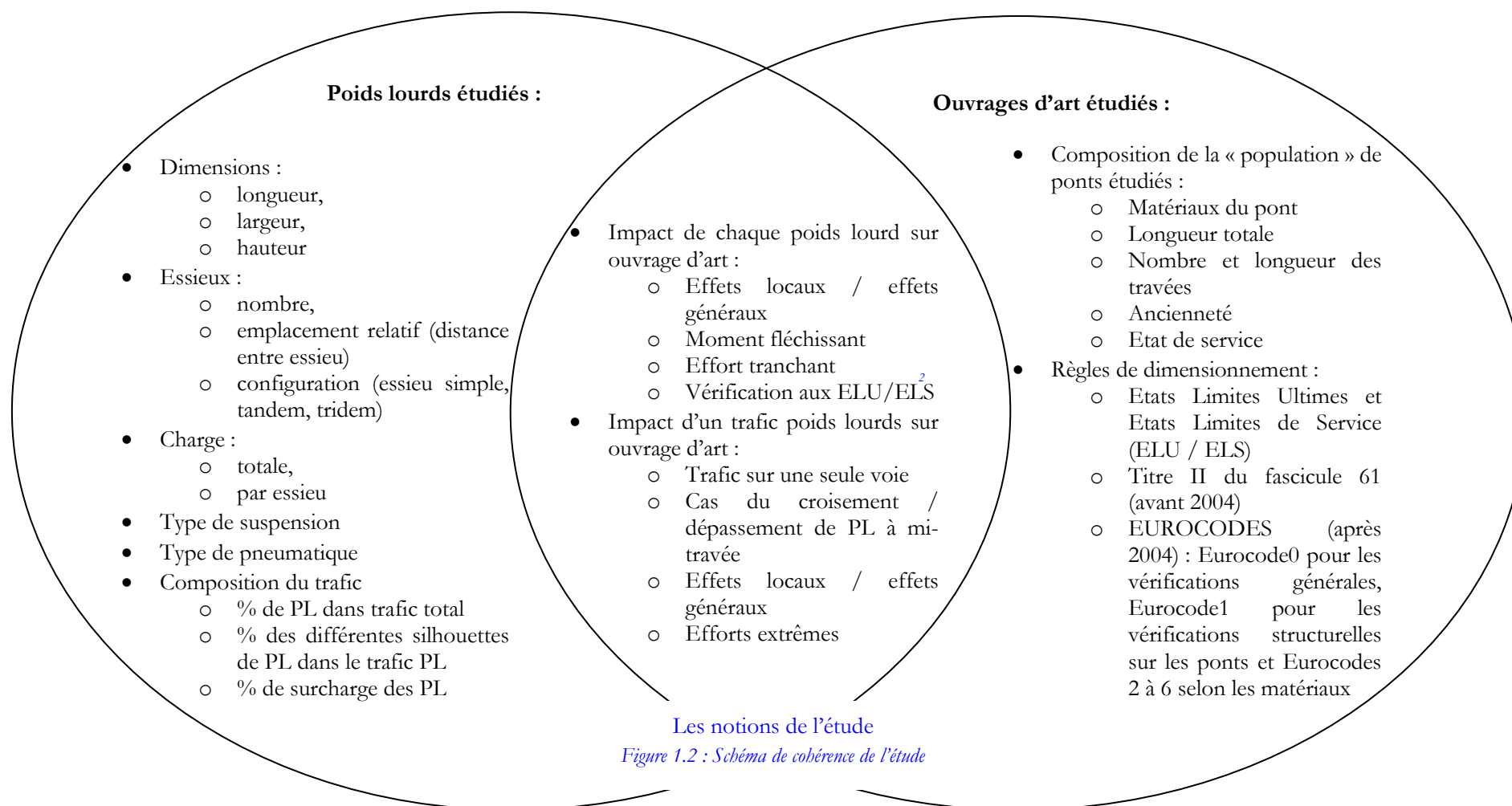
A ce jour, les normes européennes ne prennent en compte qu'une seule valeur limite pour un essieu simple, un groupe d'essieu ou un véhicule dans sa globalité. Pour l'instant, il n'est pas question d'introduire des normes basées sur des caractéristiques de comportement. De plus, la formule de pont américaine s'est révélée être inadéquate dans le cadre européen. En effet, les limitations qu'elle imposerait aux véhicules européens, sont bien en-dessous des limites actuellement admises au sein de l'Union Européenne. Il est donc essentiel de travailler sur la détermination d'une masse totale limite acceptable pour les poids lourds.

1.2.1 Méthode adoptée

La présente étude portera dans un premier temps sur la réalisation d'un état de l'art à partir des études précédentes. Ensuite, les conclusions et les différentes recommandations qui avaient été formulées seront analysées puis une étude complémentaire sera menée.

Ainsi, nous allons étudier les efforts extrêmes engendrés par les nouvelles configurations de poids lourds pour ensuite faire la vérification de quelques ponts caractéristiques du réseau français, sous ces sollicitations. Nous comparerons entre eux les effets maximaux générés par les mégacamions. Cela permettra de connaître l'agressivité moyenne de chaque poids lourds. Nous travaillerons ensuite sur des trafics réels comparés à des trafics fictifs avec des EMS. Dans cette dernière phase de calcul, il sera intéressant de jouer sur le pourcentage d'EMS introduits dans le trafic.

Le schéma suivant a pour but d'illustrer le principe de l'étude et les différentes notions qui y sont abordées.



² L'ELU (Etat Limite Ultime) correspond à l'état menant à la ruine complète de l'ouvrage. L'ELS (Etat Limite de Service) caractérise la limite au-delà de laquelle l'ouvrage est rendu impropre à sa destination.

2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Vocabulaire et notions clés

Nous présentons le domaine d'étude et certaines notions qui ont un rôle important dans la suite du rapport et de l'étude. Nous abordons notamment le vocabulaire propre au domaine des poids lourds.

Tout d'abord, un poids lourd est défini dans la loi française par le Code de la Route comme étant *un véhicule routier motorisé dont le poids total roulant autorisé est supérieur à 3,5 tonnes*. Le poids total roulant autorisé (PTRA) désigne la masse maximale autorisée pour un ensemble de véhicules (dont le tracteur et une ou plusieurs remorques).






2.1.1 Unités de PL

Il existe différents types de poids lourds. Ces poids lourds sont des assemblages d'unités. Se distinguent les véhicules tracteurs et les véhicules tractés. Parmi les véhicules tracteurs, il se trouve le porteur. Il s'agit d'un camion transportant sur ses propres essieux toute la charge légalement admissible. Il possède sur le même châssis la cabine et un volume de chargement pour le transport de marchandises. La seconde catégorie de véhicules moteurs est représentée par le tracteur. C'est un véhicule motorisé comportant sur le châssis, la cabine et une sellette d'attelage.

Parmi les véhicules tractés, nous trouvons les remorques et les semi-remorques. Une remorque a la particularité de soutenir la totalité de la charge sur ses propres essieux. Au contraire, le poids d'une semi-remorque repose en partie sur ses propres essieux ainsi que sur les essieux du tracteur par le biais de la sellette.

Un poids lourds mono-corps désigne un porteur avec sa charge transportée. Un véhicule articulé est formé par un tracteur auquel est attelée une semi-remorque. Par extension, un tel assemblage est aussi appelé un semi-remorque.

Voici les représentations schématiques des principales unités d'un poids lourd :

- Tracteur : 
- Porteur : 
- Semi-remorque : 
- Remorque à essieux centraux : 
- Dolly : 

L'élément appelé dolly est utilisé dans le cas d'un train double. Il s'agit d'un ensemble constitué d'un porteur auquel est attelée une semi-remorque.

2.1.2 Types d'essieux


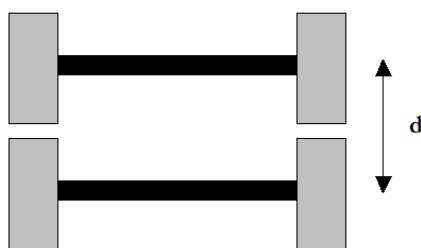
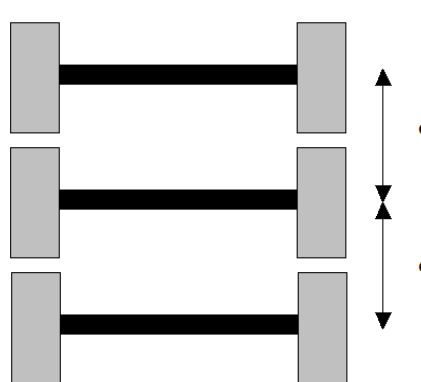

L'essieu est la *pièce disposée transversalement sous un véhicule pour en supporter le poids et dont les extrémités entrent dans le moyeu des roues*. Il n'est pas rare de trouver aussi l'appellation d'« axe ».

Outre l'essieu isolé, il existe des groupements d'essieux. On parle alors de :

- Essieu tandem si la distance entre les axes de deux essieux consécutifs est inférieure à 1,80 m;
- Essieu tridem lorsque ce sont trois essieux qui sont distants l'un de l'autre de moins de 1,80 m.

Ainsi se fait un amalgame entre les essieux à proprement parler et le groupement de ceux-ci, puisqu'on parle d'un essieu tandem ou tridem pour désigner 2 ou 3 essieux groupés.

A noter que les roues qui composent l'essieu peuvent être simples (cela donne donc deux roues par essieu) ou jumelées (soit quatre roues par essieu).

Type	Illustration
Essieu isolé	
Essieu tandem	
Essieu tridem	
Roues jumelées	

Types d'essieux couramment utilisés

Figure 2.1 : Schéma des types d'essieux couramment utilisés

Les essieux d'un véhicule tracteur peuvent être directeurs ou moteurs. Généralement, ce sont les essieux isolés à l'avant du véhicule qui sont directeurs. Les essieux moteurs sont alors les essieux à l'arrière du véhicule tracteur. Les roues des essieux moteurs sont classiquement des roues jumelées.

2.1.3 Agressivité

L'agressivité est une grandeur mathématique qui permet de comparer les impacts de différents véhicules sur les infrastructures. En effet, selon le type de véhicule, le passage des essieux n'aura pas la même importance vis-à-vis de la structure de la chaussée et des éléments d'un ouvrage d'art. L'agressivité des véhicules permet de dimensionner l'infrastructure, de déterminer les frais de construction et ceux d'entretien.

Il existe une multitude de formules d'agressivité. Cependant, elles gardent la même logique qui est de comparer le poids d'un essieu donné par rapport à un essieu de référence. L'agressivité de l'essieu de référence est prise égale à 1.

$$A_{essieu\ i} = k_i * \frac{P_{essieu\ i}}{P_{essieu\ référence}}$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} P_{essieu\ i} \text{ le poids de l'essieu } i \text{ étudié} \\ P_{essieu\ référence} \text{ le poids de l'essieu de référence} \\ k_i \text{ coefficient correctif} \end{array} \right.$

Le coefficient k_i varie en fonction des formules. Il peut prendre en compte entre autres le type de pneumatique ou le type de suspension de l'essieu.

Comme l'agressivité est une grandeur additive, il suffit de sommer l'agressivité de chaque essieu d'un véhicule afin d'obtenir l'agressivité globale de celui-ci.

$$A_{véhicule} = \sum_i A_{essieu\ i}$$

Après avoir pris connaissance des notions essentielles, voici une synthèse des principales études qui ont été réalisées sur le même domaine.

2.2 Études précédentes

2.2.1 Présentation et méthodologies

Outre l'étude réalisée par l'ERA 12 [TA, 2009], il convient de citer quelques rapports d'études dont :

- En France, le document [SETRA, 2007] édité par le SETRA ;
- Dans le cadre de l'Union Européenne (UE), le rapport [DG/TREN, 2008] de la Direction Générale des Transports et de l'Énergie (DG/TREN) ;
- Dans le cadre de l'Organisation de Coopération de Développement Economiques (OCDE), le rapport final [OCDE, 2010].

2.2.1.1 Étude du LCPC [TA, 2009]

Le LCPC a coordonné plusieurs études sur le sujet des « futurs » poids lourds. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de commandes internationales provenant :

- de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques s'appuyant sur le Centre Conjoint de Recherche sur les Transports (« Joint Transport Research Centre » en anglais),
- ou de commandes européennes, émanant de la DG/TREN.

L'équipe de recherche associée (ERA) du LRPC de Lyon a contribué à certaines de ces études. L'étude réalisée dans le cadre d'une commande de l'OCDE, se proposait de réaliser un programme d'évaluation des performances (« benchmarking » en anglais) entre divers poids lourds du trafic des pays membres de l'OCDE.

a. Méthodologie

Dans un premier temps, les différences entre les poids de chaque silhouette de PL et les poids limites donnés par la formule fédérale de pont américaine³ ont été examinées. Ensuite, l'impact de chacune de ces silhouettes a été testé avec des lignes d'influence théoriques grâce au logiciel POLLUX. Une comparaison entre les effets de trois PL du trafic de 40 tonnes et les effets de deux EMS de 60 a aussi été menée [TA, 2009].

L'utilisation de POLLUX nécessite la manipulation d'histogrammes de « rain-flow » ; il s'agit d'une méthode de comptage utilisée en analyse de la fatigue. Le but est de traduire le chargement en contraintes en fonction du temps, sous forme de cycles de contraintes simples caractérisés par une contrainte minimum et une contrainte maximum. Il faut donc décomposer le chargement en associant par paires les minima croissants et les maxima décroissants.

Le principe de calcul de l'agressivité est le suivant :

- Déterminer l'histogramme des efforts du PL de référence, qui est du type :

Valeur du cycle	Nombre de cycles
S	n

- Poser S_{max} la valeur du cycle d'amplitude maximale de cet histogramme.
- Calculer l'agressivité théorique pour le PL de référence : $d_{réf} = \sum n * (\frac{S}{S_{max}})^5$ pour toute valeur de cycle S tel que $S > 0,55 * S_{max}$
- Considérer l'histogramme de « rain-flow » des autres PL.

³ La section 5. du présent document est consacrée à la présentation des formules de pont existantes dans le monde, dont la « Federal Bridge Formula » utilisée aux Etats-Unis.

- Calculer l'agressivité pour les autres PL : $d = \sum n_i * (\frac{S_i}{S_{max}})^3 + \sum n_j * (\frac{S_j}{S_{max}})^5$ où les $S_i > S_{max}$ et les $S_j \leq S_{max}$ tout en conservant S_{max} du premier histogramme.
- Déterminer l'agressivité relative du PL considéré vis-à-vis du PL de référence : $D = \frac{d}{d_{réf}}$

b. Résultats

Voici les résultats obtenus avec une macro développée sous Excel par le SETRA. Le classement correspond à l'ordre décroissant des agressivités :





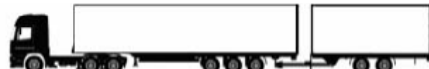
Type de PL	Silhouette	Agressivité	Classement
Trois 40 tonnes sur 5 essieux		3,41	4
Trois 44 tonnes sur 5 essieux		10,8	1
Trois 44 tonnes sur 6 essieux		9,75	2
2 EMS de type 1		5,04	3
2 EMS de type 2		2,62	5

Tableau 1 : Résultats de l'étude avec Excel [TA, 2009]

Voici les agressivités obtenues avec le logiciel POLLUX, pour une travée isostatique de 100 m :






Type de PL	Silhouette	Agressivité	Classement
Trois 40 tonnes sur 5 essieux		1	5
Trois 44 tonnes sur 5 essieux		1	3
Trois 44 tonnes sur 6 essieux		1	4
2 EMS de type 1		2,28	1
2 EMS de type 2		2,28	2

Tableau 2 : Résultats de l'étude avec POLLUX [TA, 2009]

Il est à remarquer que les PL sont très peu différenciés dans les résultats obtenus avec POLLUX. Ceci semble dû au fait que les valeurs des cycles dans les histogrammes de « rain-flow » sont identiques pour des silhouettes de poids lourds relativement semblables.

L'étude traite également des moments extrêmes pour une même poutre et pour une même silhouette de poids lourd, en fonction de la vitesse. Il apparaît que la vitesse n'impacte pas significativement la valeur des moments extrêmes. Ce résultat devient faux lorsqu'on considère un trafic de poids lourds. En effet, intervient alors la notion de zone d'influence. Le passage d'un premier véhicule va interagir avec le passage du véhicule qui le suit. La longueur de la zone d'influence va dépendre de la vitesse des véhicules. Il s'agit ensuite de déterminer une interdistance minimale supérieure à la zone d'influence afin de réduire les effets du trafic poids lourds.

Dans le cas du pont de Tancarville (département de Seine-Maritime), l'introduction des EMS réduirait sensiblement la durée de vie de l'ouvrage ; ainsi, avec l'hypothèse que 40% de la circulation poids lourds s'effectue grâce aux EMS (soit 800 EMS/jour sur un trafic total de 20 000 véhicules/jour dont 2 000 PL/jour), la réduction de la durée de vie du pont serait de l'ordre de 3% de la durée de vie initiale (soit une réduction de 3 ans sur une durée de vie initiale de 100 ans).

Nous résumons les conclusions apportées par ce rapport ci-dessous :

- La formule de pont américaine est trop restrictive dans le cas européen : l'essieu tandem serait limité à 15 tonnes et l'essieu tridem à 19 tonnes. Or le Code de la Route autorise 19 tonnes sur essieu tandem. De même, les EMS seraient limités à 50 tonnes, ce qui est bien en deçà des 60 tonnes espérées.
- Imposer au sein du Code de la Route, une limite de masse concernant l'essieu tridem semble indispensable.
- La charge à l'essieu est plus importante à considérer que la charge totale roulante (PTRA) du véhicule.
- Équilibrer le chargement du PL peut réduire considérablement l'agressivité de celui-ci.
- Augmenter la charge totale roulante par camion en augmentant proportionnellement le nombre d'essieux : favoriser le passage aux EMS plutôt qu'aux 44 tonnes sur 5 essieux.
- Les configurations de dépassement et de croisement de deux poids lourds à mi-travée reviennent à considérer le double de l'effet d'un seul poids lourd. Ces configurations sont donc à éviter.
- Une interdistance minimale comprise entre 20 et 40 mètres doit être imposée.

2.2.1.2 Études du [SETRA, 2007]

Le SETRA a réalisé une série d'études suite à la demande de la Direction Générale des Routes⁴ en avril 2007. La commande portait sur les conséquences potentielles de la circulation d'EMS sur le réseau routier français. Deux études ont donc été diligentées séparément, l'une portant sur les chaussées et l'autre portant sur les ouvrages d'art. Les services du SETRA avaient déjà étudiés les impacts du passage de convois exceptionnels sur ouvrages d'art ; ces études avaient traité le passage des convois militaires, des grues ou encore du transport combiné et du transport de bois rond.

a. Méthodologie

Tout d'abord, les deux rapports tiennent à souligner que l'agressivité des véhicules envers les infrastructures, chaussées ou ouvrages d'art, ne dépend pas que du poids total du véhicule. En effet, trois paramètres ont des rôles importants. Ce sont :

- La charge à l'essieu (ou par groupe d'essieux),
- La masse totale,
- La répartition longitudinale de la charge (liée au nombre d'essieux et à leur disposition).

Les données de charge par essieu ont été empruntées à l'étude allemande du BAST (institut fédéral allemand de recherche routière), étude intitulée « Conséquences des nouveaux concepts de véhicules sur les infrastructures du réseau des routes fédérales allemandes », de novembre 2006.

Les auteurs de l'étude ont envisagé les quatre configurations d'EMS suivantes :

⁴ Ancien organe du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT), cette Direction porte désormais le nom de DIT, Direction des Infrastructures de Transport, appartenant à la DGITM, Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer, au sein du Ministère de l'Écologie de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM).





Description	Silhouette	Poids étudiés
porteur + dolly + semi-remorque		60 tonnes
porteur + remorque à essieux centraux + remorque à essieux centraux		59 et 60 tonnes selon le nombre d'essieux (2 ou 3) de la dernière remorque
tracteur + semi-remorque bi-train + semi-remorque standard		52 tonnes
tracteur + semi-remorque + remorque à essieux centraux		59 et 60 tonnes selon le nombre d'essieux (2 ou 3) de la dernière remorque

Tableau 3 : Silhouettes d'EMS choisies [SETRA, 2007]

Par la suite, la troisième silhouette (tracteur + semi-remorque bi-train + semi-remorque standard), limitée à 52 tonnes, a été abandonnée.

L'étude a ensuite eu trait à deux phénomènes de rupture des ouvrages d'art que sont :

- la capacité portante c'est-à-dire la résistance à un nombre limité de passages de camions très lourds,
- la fatigue caractérisant la résistance à des millions de passages de camions lourds.

Une différenciation a été faite entre :

- les effets locaux (pour lesquels on prend en considération chaque essieu ou chaque groupe d'essieux) et
- les effets généraux (pour lesquelles on considère les charges totales).

Les études ont été menées dans le cadre de ponts autoroutiers et il est rappelé qu'il est possible d'extrapoler les conclusions aux ponts du réseau routier national en bon état. Les ponts ont été modélisés par des poutres isostatiques de travée allant de 5 à 50 mètres avec un pas de 5 mètres. La simulation a fait intervenir deux configurations de trafic :

- Une configuration « embouteillages » où le trafic est congestionné. La vitesse est alors considérablement réduite et les véhicules sont proches les uns des autres. Le SETRA a ainsi émis l'hypothèse que 5 m séparent le dernier essieu du véhicule « leader » et le premier essieu du véhicule suiveur.
- Une seconde configuration où le trafic est fluide mais dense. L'interdistance entre deux essieux de véhicules différents est prise égale à 10 mètres. Les calculs prennent alors en compte un coefficient de majoration dynamique δ exprimé tel que :

$$\delta = 1 + \frac{0,7}{1+0,2*L} \text{ avec } L \text{ la longueur de la travée.}$$

Dans le cas de l'introduction d'EMS, l'étude révèle que la fatigue serait accentuée pour les ouvrages métalliques de portée supérieure à 20 mètres. Aucun problème particulier n'est relevé dans les autres cas avec l'hypothèse que la répartition des charges serait homogène entre chaque partie du véhicule. À ce propos, nous consignons les recommandations du SETRA concernant les limitations de poids par essieu :





Silhouettes	Limitation de poids (par groupe d'essieux)			
	1	2	3	4
	26 tonnes		34 tonnes	
	26 tonnes	19 tonnes	19 tonnes	
	40 tonnes			
		22 tonnes	22 tonnes	
	40 tonnes			19 tonnes

Tableau 4 : Recommandations de limitations de poids [SETRA, 2007]

La limitation à 19 tonnes est valable pour les remorques avec 2 essieux centraux. Actuellement, le Code de la Route n'impose pas de restriction particulière sur le poids maximal des essieux tridem ; seuls les essieux tandem sont donc limités à 19 tonnes. Le SETRA fixe cette limite à 22,5 tonnes. Cette valeur est basée sur la réglementation australienne. D'autre part, le Code de la Route stipule que le poids des véhicules tractés ne doit pas excéder 1,5 fois le poids du véhicule tracteur ; il est important de veiller à ce que cette valeur soit respectée.

b. Résultats

Les simulations pour les chaussées ont mis en évidence que deux EMS de 60 tonnes seraient plus agressifs que ne le seraient trois poids lourds de 40 tonnes. Notons que la comparaison a donc été faite à charge transportée égale (soit un total de 120 tonnes).

La réponse du SETRA à la commande de la DGR quant à l'étude de l'impact sur les ouvrages d'art des ensembles modulaires européens (EMS), propose les conclusions et les recommandations suivantes :

- Les configurations « embouteillage » sont généralement plus agressives pour les grandes portées que pour les plus petites portées, en capacité portante.
- Les EMS ne se révèlent être plus agressives qu'à partir de certaines longueurs de travée (30 à 40 m, selon le cas de la configuration) en capacité portante.
- La configuration « 40 tonnes suivi d'un 60 tonnes » est peu différente de la configuration « 60 tonnes suivi d'un 60 tonnes » en capacité portante.
- La silhouette « 44 tonnes » serait plus agressive que les silhouettes d'EMS (60 tonnes ou 25,25m) en capacité portante.
- Avec un trafic moyen de 10 à 20% d'EMS, la réduction de la durée de vie des ouvrages serait de l'ordre de 40 à 60%. Le SETRA n'avance que des ordres de grandeur, cela nécessitant une étude plus approfondie, portant notamment sur l'influence qu'aurait l'autorisation d'EMS sur la composition du trafic. IL serait intéressant de connaître ainsi quelle serait l'évolution du fret routier étant donnée son attractivité par rapport au rail et au fluvial.
- Il n'y aurait pas d'aggravation des effets locaux car les limitations de charge par essieu restent inchangées. En effet, les essieux pris individuellement, ne sont pas plus agressifs entre un 60 tonnes et un 40 tonnes. Ce ne serait pas le cas avec le passage à 44 tonnes.

Etant donné que les silhouettes de poids lourds actuels sont conservées, l'augmentation de la charge totale entraîne une augmentation de la charge par essieu.

2.2.1.3 Étude européenne [DE CEUSTER, 2008]

Cette étude a été commandée par la DG/TREN en 2007 et elle a été menée par un consortium européen dont faisaient partie le SETRA et le LCPC, entre 2007 et 2008. Le but était de connaître les conséquences qu'aurait une modification de la directive européenne 96/53/EC. Celle-ci régit depuis juillet 1996, la circulation des poids lourds sur le territoire intra-communautaire. L'Union Européenne peut établir des limites des poids et tailles des camions sur l'ensemble du réseau routier européen. Cependant les États membres sont libres d'imposer des limites différentes sur leur propre réseau national. L'actuelle législation en vigueur dans l'Union européenne, autorise des poids lourds d'au plus 16,5 m de long (avec un seul point d'articulation) ou 18,75 m (s'il y a un ou deux points d'articulation). 40 tonnes est le poids maximal autorisé pour pouvoir traverser librement les frontières au sein de l'espace de l'Union Européenne. A noter que le trafic intermodal a la particularité d'être limité à 44 tonnes.

a. Méthodologie




La Commission Européenne souhaitait évaluer différents scénarii correspondant à diverses autorisations des systèmes modulaires européens (EMS). Quatre scénarii ont ainsi été étudiés :

- Scénario de référence, dit « au fil de l'eau » : on suppose une hausse du transport de fret avec les configurations de PL actuelles.
- Scénario 2 : les EMS sont autorisés dans toute l'UE.
- Scénario 3 : les EMS ne sont autorisés que sur des grands axes européens par les Etats alors que la Commission européenne n'autoriserait que des poids lourds d'au plus 40 tonnes et de 18,75 m de long.
- Scénario 4 est un scénario intermédiaire entre le second et le troisième scénario, puisqu'il suppose que la Commission européenne n'ait autorisé que des PL de 44 tonnes et de 20,75 m de long dans toute l'Union européenne.

Les avis exprimés en comparant les différents scénarii sont les suivants :

- Le scénario (3) est peu différent du (2) car l'attractivité des corridors entraînerait une augmentation du trafic sur ces axes et une diminution du trafic PL sur les autres axes, c'est-à-dire ceux qui ne seraient pas concernés par l'autorisation des EMS.
- Le scénario (4) présente peu d'intérêt car le passage aux 44 tonnes engendrerait une augmentation de la pollution et des coûts d'infrastructures, sans permettre pour autant une augmentation significative de la capacité de transport (en tonnes.km).

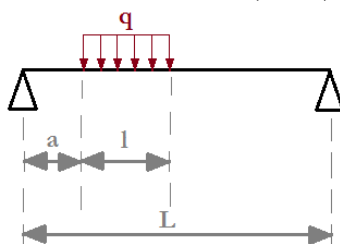
En dehors des hypothèses macro-économiques, différentes silhouettes de PL ont été comparées.

Code de la silhouette	Silhouette	Poids étudiés
A		40, 44 et 48 tonnes
B		40, 44 et 48 tonnes
C		40, 44 et 48 tonnes

D		46 tonnes
E		50 et 60 tonnes
F		50 et 60 tonnes
G		50 et 60 tonnes

Tableau 5 : Silhouettes d'EMS choisies [DG/TREN, 2008]

La modélisation adoptée pour représenter un poids lourd passant sur un ouvrage d'art est la suivante : le PL est considéré comme une charge uniformément répartie q (en N/m) sur une longueur l correspondant à la longueur du PL, passant sur un pont de longueur totale L (l et L sont en mètres). Alors le moment à mi-travée vaut : $M = \frac{q \cdot l}{4} * \left(L - \frac{l}{2} \right)$.



Modélisation de la charge d'un poids lourd sur ouvrage d'art

Figure 2.2 : Schéma de la charge d'un poids lourd sur un ouvrage d'art

Grâce à cette modélisation, les équipes d'étude ont pu comparer différentes silhouettes de poids lourds en calculant le ratio du moment maximal à mi-travée pour deux PL. Le poids lourd de référence était bien entendu, le 40 tonnes sur 5 essieux, de 16,5 m de long. Le but étant d'arriver à comparer l'effet d'un trafic conforme à l'actuelle directive 96/53/EC et l'effet d'un trafic dont les caractéristiques seraient différentes.

Voici la classification des ponts prise en compte dans l'étude :

- Les ponts courts sont ceux dont la plus longue travée n'excède pas 10 à 20 mètres ;
- Les ponts moyens ont leur plus grande travée mesurant entre 20 et 60 mètres de long ;
- Les ponts longs dont la travée moyenne mesure plus de 60 à 90 mètres.

b. Résultats

Un récapitulatif des conclusions sur les effets des poids lourds sur les ouvrages d'art est donné dans le tableau ci-dessous. Des données plus précises sont fournies en annexe A (page 84), concernant l'étude des effets locaux et généraux en fatigue et en charges extrêmes de chacune des configurations de poids lourds.





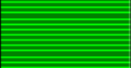
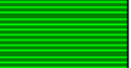








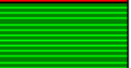






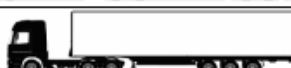
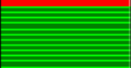
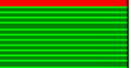
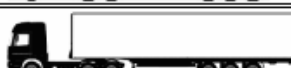


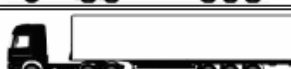


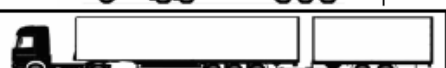
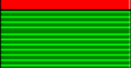
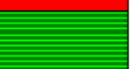
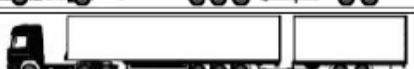

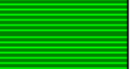
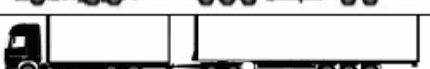

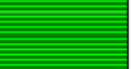







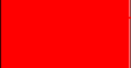
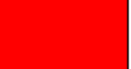
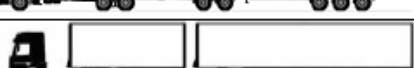


			 No consequences	 Moderate consequences	 Important consequences
Code	Shape		Pavement	Bridges	
				Extreme loads	Fatigue
A40 (current vehicles)			1		
A44			2.39		
A48			>2.39		
B40			1.22		
B44			1.92		
B48			>1.92		
C40			1.02		
C44			1.42		
C48			1.85		
D46			1.04		
E50			0.55		
F50			0.53		
G50			0.42		
E60			2.05		
F60			2.07		
G60			1.46		

Figure 2.3 : Récapitulatif des effets des PL sur les infrastructures (étude DG/TREN)

Source : FINAL REPORT: Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC, Commission Européenne, novembre 2008

Le rapport final du DG/TREN souligne que dans plusieurs pays comme la France et l'Allemagne, l'introduction de poids lourds allant jusqu'à 60 tonnes serait plus dommageable que cela a été le cas dans les pays où les EMS ont été autorisés il y a une dizaine d'années (à savoir la Suède et la Finlande). À cela plusieurs raisons :

- d'une part, les pays comme la France et l'Allemagne sont des pays étendus et relativement denses. Ils possèdent donc proportionnellement plus d'ouvrages d'art et plus de linéaire routier que d'autres pays comme les pays nordiques ;
- d'autre part, la France et l'Allemagne sont des pays où transitent énormément de PL venant de toute l'Europe, à la différence des pays scandinaves.

En résumé, voici les conclusions et les recommandations du rapport DG/TREN⁵ :

- Il est nécessaire d'augmenter la longueur et le nombre d'essieux des véhicules s'il y a une augmentation de la charge totale ;
- Le rapport avance un avis favorable aux 50 tonnes sur 7 essieux ou plus ;
- De même, les auteurs se montrent favorables aux 44 t sur 6 essieux au minimum ;
- Cependant, ils s'opposent aux 48 tonnes même sur 6 essieux ;
- Il est proposé d'instaurer un suivi des poids en marche par des mesures directes en circulation comme le système WIM (de l'anglais « Weight In Motion ») afin d'empêcher les surcharges des poids lourds ;
- Il serait opportun d'imposer une interdistance minimale sur les ponts à longue portée (longueur supérieure à 50 - 80m) ;
- Une longueur minimale de PL en fonction du poids maximal autorisé devrait être définie, afin que la charge linéique soit la plus faible possible ;
- Les dépassements de PL devraient être réglementés sur les ponts à capacité portante réduite, c'est-à-dire les ponts anciens ou endommagés.

2.2.1.4 Étude de l'OCDE⁶ [JTRC, 2010]

L'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) a lancé une étude portant sur l'ensemble des pays membres afin d'améliorer le fret routier. Pour cela, elle s'est appuyée sur le Centre Conjoint de Recherche sur les Transports (« Joint Transport Research Centre », JTRC, en anglais), qui est un organe scientifique et technique de l'OCDE, également associé au Forum International des Transports⁷. Cette étude a été mandatée en 2009 afin de faire le point des connaissances et des méthodes existantes. Le rapport final publié en mars 2010 se

⁵ Issu de la présentation de M. JACOB Bernard (LCPC), lors des Journées Techniques Routes de 2009, disponible à l'adresse suivante : http://media.lcpc.fr/ext/pdf/sem/2009_jtr/jtr2009_jacob_poids_lourds.pdf

⁶ L'OCDE a remplacé en 1961 l'Organisation européenne de coopération économique (OECE), créée en 1947 afin d'administrer l'aide américaine et canadienne dans le cadre du Plan Marshall pour la reconstruction de l'Europe après la seconde guerre mondiale. Son siège a été établi à Paris, en 1949. Depuis 1961, l'OCDE a pour mission d'aider les gouvernements à réaliser une croissance durable de l'économie et de l'emploi et de favoriser la progression du niveau de vie dans les 30 pays membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à favoriser ainsi le développement de l'économie mondiale.

⁷ Issu de la transformation en 2004 de la Conférence Européenne des Ministres des Transports, le Forum International des Transports est une institution intergouvernementale appartenant à la « famille » de l'OCDE. Ses membres fondateurs sont tous les pays de l'OCDE, ainsi que de nombreux pays d'Europe centrale et orientale. La Chine, l'Inde et le Brésil ont également été invités à participer à ce Forum. L'objectif de celui-ci est de favoriser une prise de conscience du rôle essentiel des transports en associant de nombreux Ministres des Transports. Les transports, la logistique et la mobilité sont des facteurs clés du développement économique et de la croissance ; ils contribuent autant à l'emploi qu'à la cohésion sociale. De plus, tous les éléments constructifs d'un développement durable sont fortement affectés par les activités de transport.

propose de collecter les conclusions des travaux précédents sur les impacts qu'auraient des véhicules de transport de fret, plus longs et/ou plus lourds. Ces impacts sont évalués sur les infrastructures, que ce soit les chaussées ou les ponts.

a. Méthodologie

L'étude de l'OCDE offre une comparaison de 39 différentes silhouettes de poids lourds, selon leur pays de provenance. Elle les classe selon 3 catégories que nous détaillons ci-dessous :

- Les véhicules les plus communs, appelés « workhorses », de poids inférieur à 50 tonnes et moins de 22 m de long ;
- Les véhicules avec une grande capacité (« high capacity ») couvrant les PL roulant sous des conditions exceptionnelles, et donc les caractéristiques vont jusqu'à 70 tonnes et 30 mètres de long ;
- Les PL avec une très grande capacité (« very high capacity ») d'au moins 52 tonnes et d'au moins 30 m de long. Aucun véhicule européen n'est concerné par cette catégorie.

L'étude en lien avec l'impact de ces poids lourds sur les ponts a utilisé la notion de ligne d'influence. La ligne d'influence (ou surface d'influence si la charge est en 2D) est une fonction de transfert permettant de calculer les effets de charges, c'est-à-dire les déformations et les contraintes appliquées au pont sous la charge de trafic. Pour n'importe quelle section de pont donnée et pour un effet de chargement, par exemple le moment fléchissant à mi-travée, la ligne d'influence est équivalente à cet effet induit par une charge unitaire appliquée à un point x sur la structure du pont. En considérant le comportement de la structure comme linéaire, pour un ensemble des charges F_i appliquées respectivement aux abscisses x_i , l'effet total des charges vaut : $S = \sum F_i * f(x_i)$.

Afin d'utiliser les lignes d'influence, il faut auparavant considérer que le comportement du pont demeure élastique (c'est-à-dire que les contraintes sont proportionnelles aux charges appliquées).

Les simulations ont été réalisées grâce notamment aux logiciels comme CASTOR ou POLLUX. Ces derniers permettent de calculer les effets des chargements dans des cas les plus compliqués d'un écoulement de trafic aléatoire. Les logiciels s'appuient alors sur l'historique des charges (données de pesage en marche) où les valeurs extrémales retranscrites sous forme de « rain-flow ».

Il est important de noter que les modèles de charges multiplient les chargements nominaux par :

- Des facteurs de sécurité (γ_s)
- Des facteurs d'amplification dynamique (DAF pour « Dynamics Amplification Factors » en anglais), dépendant de la longueur de travée et parfois, du type de pont.

Voici un schéma du fonctionnement de l'étude et de la simulation :

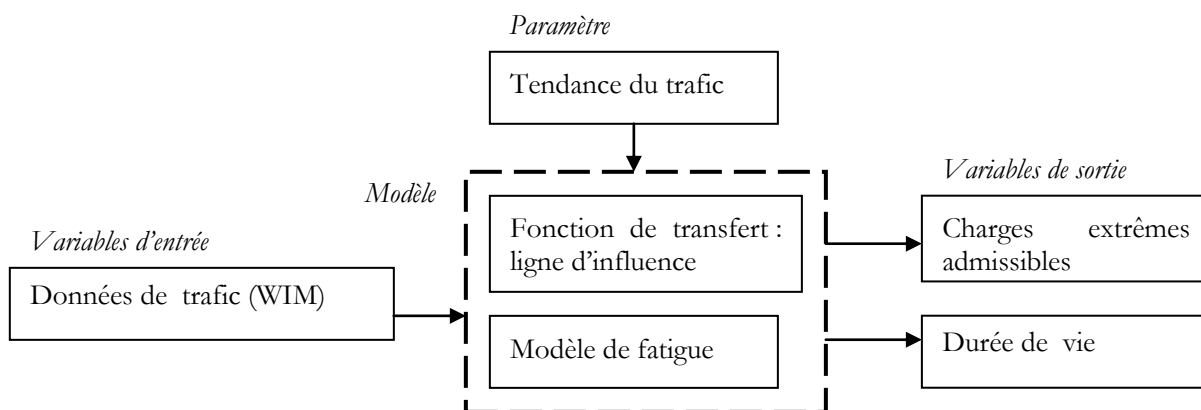


Schéma du principe de la modélisation

Figure 2.4 : Principe de la modélisation utilisée par l'étude OCDE

Afin de mener à bien cette étude et étant donné qu'il y a une infinité d'éléments dans les ponts qui sont sensibles à la charge due au trafic, différentes échelles ont été adoptées :

- L'échelle locale : la ligne d'influence est considérée sur 1 à 3 mètres, reprenant la charge d'un seul essieu ou d'un seul groupe d'essieu ;
- L'échelle semi-locale : la ligne d'influence est considérée sur quelques mètres (généralement de 2 à 10 mètres), relativement à ces charges sur des bogies (c'est-à-dire des groupes d'essieux) ou sur la masse totale d'un petit véhicule ;
- L'échelle globale : la ligne d'influence est prise sur plus de 10 mètres, en général on considère une travée entière ou l'ensemble du pont (dans le cas d'un pont à plusieurs travées).

Les effets locaux et semi-locaux sont gouvernés par les charges extrêmes des essieux. Ces charges ne correspondent pas uniquement aux charges maximales permises. Ils dépendent du nombre d'essieux par camion, du pourcentage de surcharge des PL et des cas exceptionnels de transport de charges indivisibles et très lourdes (par exemple le transport de bois rond).

Les effets généraux ne sont pas non plus gouvernés par un seul poids lourd mais par un ensemble de poids lourds se trouvant simultanément sur le pont. Dans le cas de pont de longueur supérieure à 30-40 mètres, le cas critique est le cas de congestion avec plusieurs PL statiques.

Dans un premier temps, les auteurs de l'étude se sont intéressés à l'étude des effets des charges extrêmes. Ils ont pour cela introduit la notion de charge équivalente uniformément répartie (EUDL pour « Equivalent Uniformly Distributed Load » en anglais) telle que :

- $$EUDL = \frac{\text{masse totale du PL}}{\text{longueur du PL}}$$

Afin de prendre aussi en compte la formule de pont américaine (« bridge formula »), le travail de l'OCDE propose un coefficient d'agressivité relative C_n tel que $C_n = \frac{c_n}{c_{réf}}$ où :

- $c_n = \frac{W_n}{W_{n,bf}}$ et $c_{réf} = \frac{W_{réf}}{W_{réf,bf}}$
- W_n et $W_{réf}$ représentent la masse totale d'un poids lourd n et celle du poids lourds de référence (40 tonnes sur 5 essieux et 16,5 m de long).
- $W_{n,bf}$ et $W_{réf,bf}$ représentent la masse maximale autorisée en utilisant la formule de pont américaine.

b. Résultats

En comparant les ratios des moments maximaux entre un véhicule donné et le véhicule de référence ainsi que le coefficient d'agressivité relative C_n , les résultats montrent que la formule de pont américaine a été calibrée par rapport au moment fléchissant d'un pont d'une travée de 20m (soit la longueur moyenne d'un poids lourd américain). La formule de pont ne permet pas de couvrir les ponts de plus longue travée ainsi que les cas où plusieurs PL se trouvent en même temps sur le pont. Voici les autres constats réalisés :

- Logiquement, les poids lourds ayant de très grande capacité sont plus dommageables pour les ponts.
- Certains véhicules de la catégorie « grande capacité » ont un très bon comportement : ce sont ceux qui ont une charge uniformément répartie plus faible que la silhouette de référence.
- Il existe une relation linéaire entre le coefficient d'agressivité C_n et l'EUDL de chaque véhicule, pour des longueurs de travées courtes et moyennes. Ainsi, en augmentant la masse d'un véhicule sans augmenter sa longueur, cela augmente linéairement son agressivité vis-à-vis des infrastructures.

- Les EMS de 60 tonnes et de 25,25 m de long (bien qu'ayant une charge répartie peu différente de celle du véhicule de référence) présenteraient une agressivité supérieure de 50% à celle du 40 tonnes sur 16,5 m de long. Pour que ces deux silhouettes aient des agressivités à peu près équivalentes, il serait nécessaire de limiter la masse de l'EMS à 50 ou 52 tonnes. Cela fait également partie des conclusions du rapport DG/TREN [DE CEUSTER, 2008].
- Le document de l'OCDE cite aussi le rapport hollandais [VROUWENVELDER, 2008] qui se montre moins pessimiste quant à l'impact des EMS sur les ponts néerlandais mais qui conseille malgré tout, une limite maximale de 60 tonnes.
- Les études existantes basées sur la charge répartie, les formules de pont ou l'étude des moments maximaux, n'ont pas pris en compte des configurations de plusieurs poids lourds sur la même voie ou celle de véhicules se dépassant ou se croisant en un point ou la ligne d'influence présente un pic (pour lesquels cas, il serait nécessaire d'établir les probabilités d'occurrence grâce aux données de pesage en marche).

Dans un second temps, l'étude porte sur l'aspect fatigue des ouvrages. La fatigue correspond au passage répété de charges induisant des cycles de variation de contraintes. Les données de pesage sont utilisées afin de déterminer avec la loi de Miner⁸, la résistance des ouvrages à la fatigue. Cela pose comme hypothèses que les dommages sont proportionnels aux charges élevées à la puissance 3 ou 5 et que chaque essieu ou chaque poids lourd représente un cycle de fatigue.

Une comparaison de l'agressivité relative en fatigue d'un seul poids lourd vis-à-vis du PL de référence, pour des contraintes induites par les moments fléchissants a également été réalisée. Nous retranscrivons ci-dessous les constats qui en ont été tirés :

- La formule de pont est cohérente pour des longueurs de 20 m (à mi-travée) et de 10 m (sur pile)
- Pour les courtes travées, les véhicules de plus grande capacité se révèlent être moins agressifs que le PL de référence (surtout si le poids par essieu est réduit). Les véhicules courts et lourds ou avec des charges à l'essieu importantes sont particulièrement agressifs.
- Pour des travées plus longues (40 m ou même 20 m en considérant les moments fléchissants sur appui), les véhicules plus longs et plus lourds sont 3 à 4 fois plus agressifs. Les EMS de 60 tonnes sont 3 fois plus agressifs que le poids lourd de référence pour les effets sur les appuis et 2,5 fois plus agressifs pour les effets à mi-travée, sur les ponts de portée moyenne à longue (plus de 50 m).
- Il n'y a pas de relation linéaire entre les dommages dus à la fatigue et la valeur de la charge ou l'amplitude de la déformation.

Voici donc en résumé, les recommandations du rapport de l'OCDE :

- Il se montre favorable au développement d'une approche basée sur les performances (comme c'est déjà le cas en Australie, en Afrique du Sud et au Canada) qui permet de fixer les objectifs de sécurité et environnementaux sans limiter les moyens pour y parvenir.
- Il faut permettre le guidage des véhicules plus longs et/ou plus lourds sur le réseau afin de leur éviter d'emprunter les ponts les plus critiques.
- Les poids lourds et les infrastructures doivent être développés conjointement ; pour cela, chaque état devrait se munir d'une formule de pont adaptée aux types de ses ponts et de poids lourds rencontrés sur son réseau routier.

⁸ La loi de Miner et Palmgreen est basée sur l'hypothèse de linéarité des dommages et pose que s'il y a k différentes magnitudes dans le spectre des contraintes S_i avec i variant de 1 à k, alors en notant n_i le nombre réel de cycles d'amplitude S_i et N_i le nombre de cycle de la même amplitude menant à la rupture de l'ouvrage alors la rupture se produit lorsque $\sum n_i / N_i = C$ (C varie généralement de 0,7 à 2,2 mais C est pris égal à 1).

-
- Il est nécessaire d'optimiser la configuration des véhicules afin d'améliorer à la fois la productivité mais aussi de réduire l'impact sur les infrastructures.
 - On doit augmenter proportionnellement la longueur et le nombre d'essieux lorsqu'on souhaite augmenter la masse, car :
 - L'agressivité d'un PL pris seul, augmente linéairement avec sa masse totale pour les charges extrêmes.
 - L'agressivité d'un PL augmente selon les puissances 3 ou 5 en ce qui concerne la fatigue.
 - A masse constante, l'agressivité va être diminuée si la longueur de répartition de la charge augmente.

2.3 Conclusion de l'état de l'art

2.3.1 Synthèse des recommandations

Les avis ressortant de ces différents rapports d'études sont relativement unanimes quant à l'effet qu'aurait l'introduction des EMS. De ces quelques constats, il en découle que certaines configurations de poids lourds se montreraient très agressives pour les ouvrages d'art. Ce serait notamment le cas des poids lourds de 44 tonnes sur 5 essieux. Cela est d'autant plus valable pour le 48 tonnes sur 5 essieux. En revanche, les EMS de 50 à 60 tonnes sur 7 à 8 essieux, ne se révéleraient pas être particulièrement plus agressifs que les poids lourds actuels. En effet, la charge uniformément répartie resterait globalement inchangée.

Le cas français est à regarder plus en détail. Il est vrai que la France compte un ensemble d'ouvrages d'art relativement important. Ainsi on décompte quelques 12 000 ponts sur l'ensemble du réseau routier national non concédé ; cela s'explique par le fait que la France est le pays de l'Union Européenne qui possède la plus grande superficie. D'autre part, le trafic poids lourds y est élevé. Etant donné que la France se trouve au sein de l'Union Européenne et qu'elle permet le lien entre les pays du Sud (Espagne, Portugal), du Nord (Royaume-Uni et Irlande) et ceux de l'Est (Allemagne, Belgique, Luxembourg, Suisse et Italie), il s'agit d'un important pays de transit.

Nous réalisons un résumé global des conclusions prises dans les différents rapports internationaux, européens ou français :

- La formule de pont américaine n'est pas adaptée au contexte européen ;
- La charge à l'essieu est un critère plus important que la charge totale ;
- La charge uniformément répartie doit rester inférieure ou égale aux valeurs actuelles ;
- Une augmentation de tonnage doit être accompagnée d'une augmentation de la longueur des véhicules ainsi que d'une augmentation du nombre d'essieux ;
- Il est important d'imposer une interdistance minimale sur des ponts à longue portée (travée supérieure à 50 mètres) ;
- Les dépassements de poids lourds doivent être réglementés sur les ponts dont la capacité portante est limitée (ponts anciens et/ou endommagés) ;
- Les EMS sont plus agressifs en capacité portante et en fatigue sur les ponts de portée supérieure à 30-40 mètres.

2.3.2 Limites des études

Comme nous l'avons vu, la question de l'impact des EMS sur les infrastructures et plus particulièrement sur les ponts, a déjà été abordée par diverses études. Néanmoins, certaines limites sont apparues.

Certes, toutes les études présentées ont évaluées l'impact des poids lourds sur les infrastructures. Cependant, elles ne se sont attachées qu'à comparer l'effet des EMS envisagés face aux poids lourds du trafic. Aucune ne s'est attachée à dire si telle ou telle configuration de poids lourd est réellement acceptable ou non du point de vue des ouvrages. En effet aucune étude ne conclue explicitement si la hausse de l'agressivité d'un PL reste acceptable ou non pour les ouvrages d'art. Il n'est pas impossible d'aller jusqu'à préciser quels seraient les ouvrages concernés et ainsi mettre en avant la norme de dimensionnement correspondante. Il serait ainsi possible de conclure quant à l'introduction d'EMS sur l'ensemble du réseau ou sur certaines portions de ce réseau.

En outre, peu d'études se sont également intéressées à « traduire » la formule de pont américaine au cas européen. Bien que certaines aient tenté d'utiliser les limitations découlant de la formule, aucune ne propose une équivalence applicable aux poids lourds et aux ponts d'Europe. Les travaux se sont limités à comparer les effets dus aux « futurs » poids lourds et les effets qu'auraient ces mêmes configurations si elles respectaient la formule de pont. Il serait intéressant de réaliser une formule de pont européenne car cela permettrait de limiter le poids total en charge d'un PL en fonction de sa longueur et de son nombre d'essieux. Actuellement, la limitation est générique quelle que soit la forme du poids lourds. Une formule de pont engloberait la diversité des poids lourds européens et généraliserait la réglementation sur l'ensemble des axes routiers de l'espace communautaire. Elle permettrait en outre d'éviter des cas de charges concentrées.

3 HYPOTHESES

3.1 Poids lourds étudiés

3.1.1 Présentation

Il est essentiel de travailler avec des silhouettes reflétant le trafic réel sur le réseau routier français. De nombreuses silhouettes de poids lourds existent. Dans un premier temps, il est important de pouvoir se limiter à des configurations types qui sont représentatives du trafic poids lourds. A partir de ces silhouettes les plus courantes, de nouvelles combinaisons seront étudiées. Toutefois, les EMS se doivent de respecter plusieurs hypothèses :

- Les combinaisons sont celles de trois PL de 40 tonnes pour former deux EMS de 60 tonnes. Il y doit y avoir équivalence dans la charge transportée. Par exemple, nous ne considérerons pas la recombinaison de deux PL de 40 tonnes (soit 80 tonnes transportées) en un seul EMS de 60 tonnes, car un autre PL serait à nouveau nécessaire pour transporter les 20 tonnes restantes.
- Les EMS ont une longueur maximale de 25,25 mètres ;
- Les EMS ont un tonnage maximal de 60 tonnes.

3.1.2 Données de trafic

Afin de mener à bien notre sélection de silhouettes de poids lourds existants, nous nous sommes appuyés sur des données de trafic. Ces données proviennent de l'étude menée par le SETRA sur le trafic entre 2004 et 2005 [SETRA, 2009]. Une synthèse globale des données de trafic plus récentes n'est malheureusement pas disponible. Nous nous appuyerons donc sur les résultats de 2005 et tâcherons de les comparer avec des données ponctuelles de 2010, issues de plusieurs stations de mesure.

La composition du trafic global a été observée grâce à différents systèmes de comptages :

- Des systèmes de comptage automatiques de type SIREDO (Système Informatisé de Recueil de Données) : ce sont des stations de mesure dont les capteurs sont directement implantés dans la chaussée.
- Des comptages manuels. Bien que moins nombreux, ces derniers ont permis d'affiner les données. Ils ont ainsi permis de relever les pays d'appartenance des PL.

Les routes concernées sont les routes nationales et les autoroutes françaises. Les mesures ont été réalisées avant la décentralisation du 1^{er} janvier 2006, date du passage de nombreuses routes nationales sous le contrôle des Conseils Généraux⁹.

La répartition du trafic observé et les évolutions entre 1996-1997 et 2004-2005, sont résumées dans le tableau ci-dessous. Chaque silhouette correspond à un code utilisé par les stations d'acquisition de données. Ces codes seront conservés par la suite.

⁹ Au 1^{er} janvier 2006, 14 500 kilomètres de routes nationales sur les 23 500 kilomètres que comportait le réseau routier national (hors agglomérations de plus de 5 000 habitants), ont été transférés sous l'égide des Conseils Généraux. L'Etat n'a donc conservé que 40 % du linéaire mais celui-ci correspond à près de 60% du trafic lourd. Cela s'explique par le fait que le réseau non transféré se compose de routes nationales structurantes du type des rocadés urbaines.







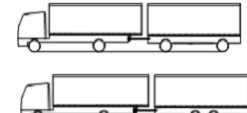

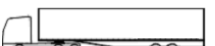




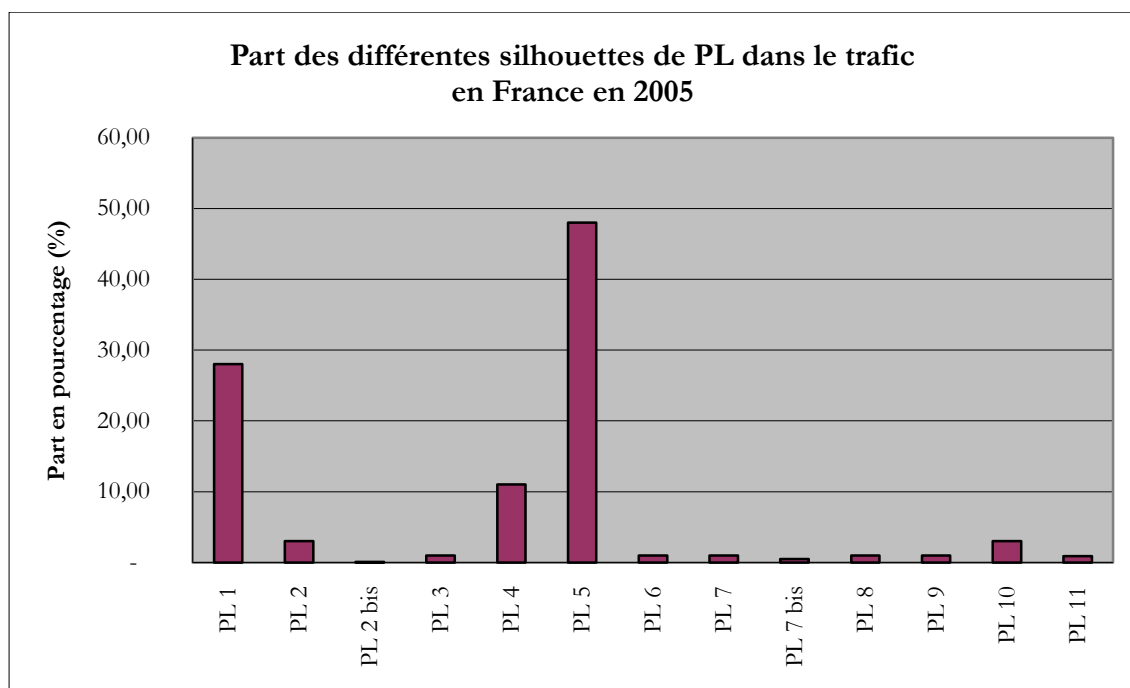
Type de PL	PTRA ¹⁰ (tonnes)	Code	Silhouette(s)	PTAC ¹¹ (tonnes)	Part dans le trafic de PL en 2004-2005	Part totale par type	Évolution de la part dans le trafic PL entre 1996-97 et 2004-05
PL à 2 essieux	19 tonnes	PL 1		7,5	17 %	28,3 %	+ 25,7 %
		PL 1		12	6 %		
		PL 1		19	5,3 %		
PL à 3 essieux	26 tonnes	PL 2		26	2,7 %	4 %	+ 5,1 %
		PL 3		26	1,3 %		
PL à 4 essieux	38 tonnes	PL 4		38	11,2 %	12,5 %	- 32,5 %
		PL 7		19/19	1,3 %		
PL à 5 essieux et plus	40 tonnes	PL 5		40	48,3 %	55 %	+ 74,9 %
		PL 6		40	1,2 %		
		PL 8		19/26	1 %		
		PL 9		26/19	0,6 %		
		PL 10		26/26	3,1 %		
		PL 11		40	> 1 %		

Tableau 6 : Analyse statistique du trafic PL de 2005

¹⁰ PTRA : Poids Total Roulant Autorisé, désigne la masse maximale autorisée pour un ensemble de véhicules.

¹¹ PTAC : Poids Total Autorisé en Charge, désigne dans le Code de la route, la masse maximale autorisée pour un seul véhicule routier. Elle comprend la charge maximale de marchandises (charge utile) ainsi que le poids maximal du chauffeur et de tous les passagers.



Part de chaque silhouette de PL dans le trafic poids lourds total en 2005

Figure 3.1 : Analyse statistique du trafic PL en 2005

Des données de trafic, il apparaît que certaines silhouettes de poids lourds sont particulièrement fréquentes :

- Les configurations des PL 1 et PL 2 (camions à deux ou trois essieux) sont très courantes. Cependant, cela correspond à du transport sur courtes à moyennes distances. De plus, les tonnages maximaux autorisés pour ces silhouettes (respectivement 19 et 26 tonnes) ne permettent pas de considérer une recombinaison vers des EMS. Ces types de poids lourds ne seront donc pas pris en compte dans la suite de l'étude.
- Le PL 4 (tracteur 2 essieux et semi-remorque 2 essieux) est relativement fréquent. Cependant, sa part entre 1996 et 2005 a été réduite. Depuis, elle continue à décroître. Plusieurs configurations tendent à être de moins en moins fréquentes bien qu'elles aient une part plutôt élevée. A propos du PL4, il s'agit bien souvent d'un T2S3 dont on a relevé un essieu arrière car la charge transportée ne nécessitait pas l'ensemble des 5 essieux (poids inférieur à 38 tonnes). Cela permet l'économie de l'usure d'un pneumatique.
- Au contraire, d'autres se généralisent depuis 2005 et atteignent des parts plus significatives en 2010. Parmi les poids lourds à quatre essieux, le PL 7 (porteur 2 essieux et remorque à 2 essieux) devient la forme la plus fréquente.
- Le PL 5 (ou T2S3 : tracteur deux essieux suivi d'une semi-remorque à trois essieux) est le plus courant. Cela couvre près d'un véhicule lourd sur deux.
- Le PL 10 (camion à trois essieux et remorque à trois essieux) occupe une part modérée mais tend à se généraliser.

Il nous paraît intéressant d'inclure également le PL 9 (camions trois essieux et remorque deux essieux) et le PL 11 (tracteur 3 essieux et semi-remorque à 3 essieux) parce que leurs parts dans le trafic lourd sont en croissance notable depuis 2005.

Les poids lourds du trafic retenus pour l'étude sont donc :




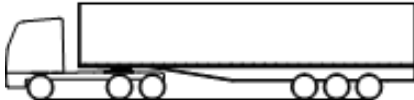
Code	Silhouette	Justification
PL 5		Poids lourd le plus utilisé avec 48,3% de part dans le trafic lourd.
PL 9		Silhouette se généralisant.
PL 10		Silhouette représentant plus de 3% du trafic lourd mais qui tend à se généraliser.
PL 11		Silhouette se généralisant.

Tableau 7 : Poids lourds du trafic retenus

3.1.3 Silhouettes d'EMS envisagées

Les études antérieures [SETRA, 2007], [DE CEUSTER, 2008], [TA, 2009] ou encore [JTRC, 2010] (présentées dans la section 2.2) avaient retenues quelques silhouettes de poids lourds. Elles sont reprises ici et d'autres silhouettes constituées d'éléments de PL du trafic y sont ajoutées. Celles-ci ont été obtenues en combinant des unités de PL et elles doivent respecter la longueur maximale de 25,25 mètres. Cela exclut donc les trains doubles avec deux semi-remorques par exemple.

Les compositions probables d'EMS sont données dans le tableau ci-dessous :

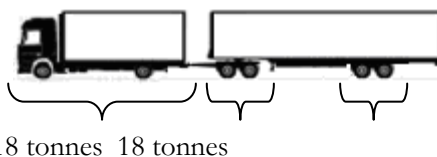
Numéro	Nombre d'essieux	Silhouette
1	6 essieux	
2	7 essieux	
3	7 essieux	
4	8 essieux	
5	6 essieux	
6	8 essieux	
7	7 essieux	
8	7 essieux	
9	8 essieux	
10	8 essieux	
11	9 essieux	
12	7 essieux	
13	9 essieux	
14	8 essieux	

15	7 essieux	
16	6 essieux	
17	7 essieux	
18	7 essieux	
19	8 essieux	
20	7 essieux	
21	8 essieux	
22	8 essieux	
23	9 essieux	
24	9 essieux	

Tableau 8 : Silhouettes d'EMS envisagées

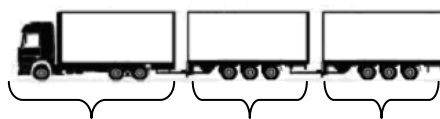
Certaines de ces configurations ne sont pas réalisables. En effet, les poids lourds sont soumis à des règles émanant du Code de la Route dans le cadre français et de la directive 96/53/CE dans le cadre européen. Elles concernent essentiellement les poids par essieu. Ces limites de charges sont explicitées dans la suite (voir section 3.2).

Quelques configurations ne permettent pas de tracter 60 tonnes. Prenons le cas de l'EMS numéro 1 :



Le véhicule moteur à deux essieux est limité à 18 tonnes. De même, chaque essieu tandem ne peut supporter qu'au maximum 18 tonnes. Cette silhouette d'EMS ne peut donc transporter légalement que $3 \times 18 = 54$ tonnes.

D'autres silhouettes permettent de transporter bien plus que 60 tonnes. Il n'est pas utile de surdimensionner les véhicules. Citons le cas de l'EMS numéro 13 :



25 tonnes 24 tonnes 24 tonnes

Le véhicule moteur à trois essieux est limité à 25 tonnes (voire 26 si l'essieu moteur est composé de roues jumelées et d'une suspension pneumatique ou équivalente). Chaque remorque avec un essieu tridem peut supporter 24 tonnes. Ainsi, l'EMS 13 pourrait transporter $25+24+24 = 73$ tonnes. La configuration est surdimensionnée au vue du tonnage maximal que l'on s'est donné (60 tonnes).

De plus, les hypothèses que nous avons posées concernant la longueur maximale et le poids maximal, permettent d'abandonner plusieurs silhouettes. Par exemple, une configuration de train double composé d'un tracteur et deux semi-remorques, n'a pas été examinée car elle dépasserait les 25,25 mètres en longueur.

Enfin, par hypothèse, seules les configurations d'EMS issues d'éléments déjà existants, ont été retenues. Cela exclut les EMS numéro 15 et 24 qui induiraient de nouveaux matériels.

3.1.4 Silhouettes choisies

Nous présentons dans le tableau qui suit, les configurations de poids lourds que nous avons décidé de conserver. Le choix de chacune d'elle est également justifié.

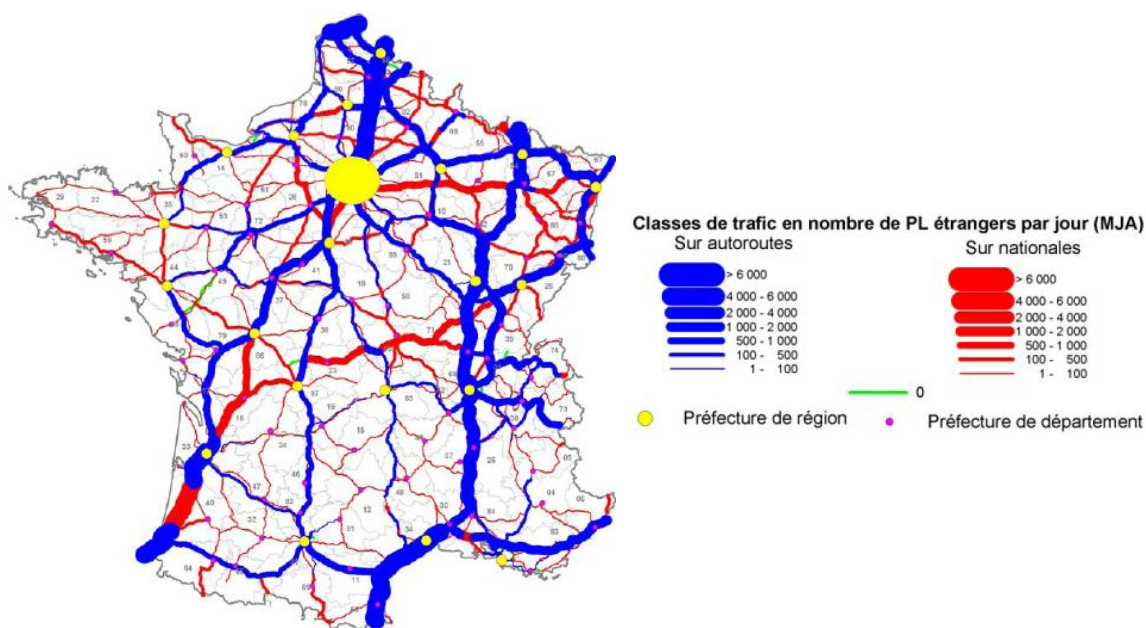
Code	Silhouette	Justification
EMS 1 (PL 5 + PL 9)		Cette configuration est actuellement autorisée en Allemagne et aux Pays-Bas.
EMS 2 (PL 5 + PL 10)		Configuration tout à fait probable.
EMS 3 (PL 11 + PL 9)		La présente forme circule librement en Belgique et aux Pays-Bas.
EMS 4 (PL 11 + PL 10)		Configuration tout à fait probable.
EMS 5 (PL 10 + PL 5 ou PL 11)		Les Pays-Bas et le Danemark ont déjà homologué cette composition de poids lourd.
EMS 6 (PL 9 + PL 9)		La silhouette est présente aux Pays-Bas.

Tableau 9 : Silhouettes d'EMS choisies pour la présente étude

Il est important de noter qu'en France, près d'un tiers du trafic poids lourds est dû au trafic étranger. Etant donné que la part du trafic étranger ne cesse d'augmenter, les silhouettes de poids lourds autorisés dans les pays voisins ne sont donc pas négligeables. En huit ans, cette hausse atteignait près de 70 %. Si les EMS venaient à être autorisés en France, il est intéressant de connaître qu'elles seraient les silhouettes étrangères probables sur le réseau national. Les silhouettes d'EMS ont aussi été choisies en fonction des PL acceptés dans les autres pays européens. Et notamment au sein des pays européens dont la part de véhicules roulant sur le réseau routier français est conséquente.

Les statistiques sur les nationalités des transporteurs dans le trafic lourd en France proviennent du sondage de circulation de 2004-2005. Sur la période d'étude, les 5 principales origines des poids lourds étrangers étaient :

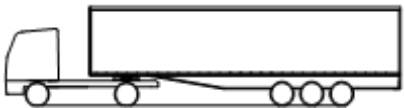
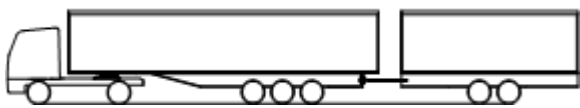
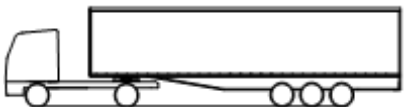



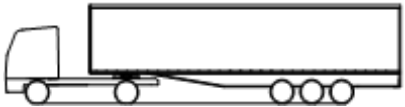
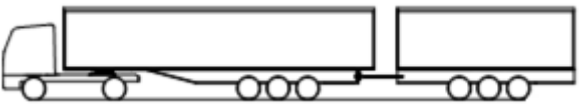
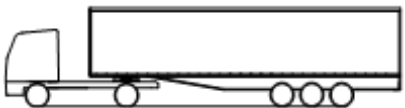



- La péninsule ibérique (34 % dont 27 % pour l'Espagne et l'Andorre et 7 % pour le Portugal)
- Le BENELUX (25 % dont 15 % pour la Belgique et le Luxembourg et 10 % pour les Pays-Bas)
- L'Allemagne (14 %)
- L'Europe centrale et orientale (13 % dont 10 % pour la Pologne, la République Tchèque, la Hongrie et la Slovaquie)
- L'Italie et Monaco (9 %)



Axes majeurs de la circulation des PL étrangers en France, en 2005
 Figure 3.2 : Carte des itinéraires des PL étrangers sur le réseau routier français en 2005

Source : Sondage de circulation 2004-2005, SETRA, juillet 2009

Nous récapitulons dans le tableau qui suit, les cas de recombinaisons de trois PL du trafic de 40 tonnes en deux EMS de 60 tonnes :

Numéro de cas	PL combinés et EMS obtenus	Silhouette des PL	Silhouette des EMS	Observations
1	PL 5 + PL 5 + PL 9 → EMS 1 + EMS 5			1 tracteur enlevé 1 dolly ajouté
				
				
2	PL 5 + PL 5 + PL 10 → EMS 2 + EMS 5			1 tracteur enlevé 1 dolly ajouté
				
				

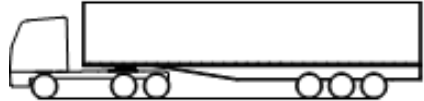

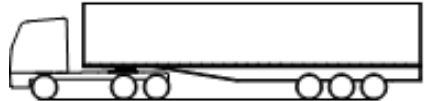


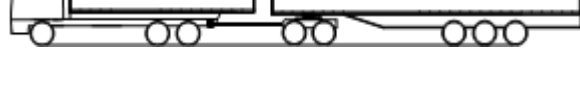
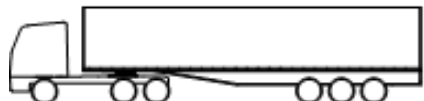

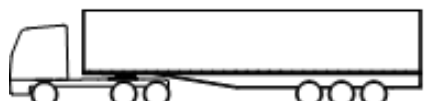


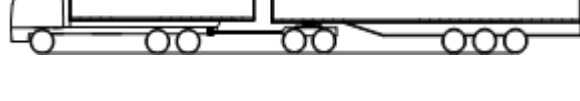





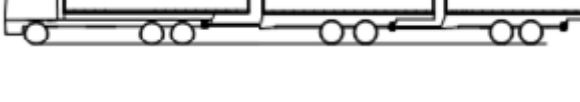
3	PL 11 + PL 11 + PL 9 → EMS 3 + EMS 5			1 tracteur enlevé 1 dolly ajouté
				
				
4	PL 11 + PL 11 + PL 10 → EMS 4 + EMS 5			1 tracteur enlevé 1 dolly ajouté
				
				
5	PL 9 + PL 9 + PL 9 → EMS 6 + EMS 6			1 camion enlevé 1 remorque à essieux centraux ajoutée (transfert de marchandises)
				
				

Tableau 10 : Combinaisons des PL de trafic en EMS retenus

3.2 Charges

3.2.1 Réglementations

Dans le cadre du travail sur les silhouettes, il est nécessaire de connaître la répartition des charges. Pour cela, on parle de charge par essieu ou de charge à l'essieu pour définir la masse maximale admise sur chaque essieu du véhicule. Ces limitations sont définies par les textes réglementaires. Pour les véhicules qui circulent en France, les prescriptions sont issues du chapitre II « Poids et dimensions » du Code de la Route. Dans le cas des véhicules qui circulent à l'intérieur de l'Europe, ceux-ci sont soumis à la directive européenne 96/53/CE du Conseil Européen. La directive européenne a été rédigée afin d'uniformiser les réglementations nationales qui existent au sein de l'Union Européenne.

Le tableau qui suit permet de récapituler les valeurs maximales admises dans les deux cas. Les réglementations font intervenir la distance entre essieux notée d .

Limitations	Code de la Route	Directive européenne
Essieu non moteur simple	13 tonnes	10 tonnes
Essieu moteur simple	13 tonnes	11,5 tonnes
Essieu tandem : <ul style="list-style-type: none"> • $0,90 \leq d < 1,35$ m (Fr) • $1 \leq d < 1,30$ m (EU) 	7,35 tonnes majorées de 0,35 tonnes par tranche de 5 cm supérieure à 0,90 m	16 tonnes
Essieu tandem : <ul style="list-style-type: none"> • $1,35 \leq d < 1,80$ m (Fr) • $1,30 \leq d < 1,80$ m (EU) 	10,5 tonnes majorées de 0,65 tonnes par tranche de 5 cm supérieure à 0,90 m <i>19 tonnes si essieu moteur</i>	18 tonnes <i>19 tonnes si essieu moteur équipé d'une suspension pneumatique ou équivalente et de roues jumelées</i>
Essieu tridem : $1,30 < d \leq 1,40$ m (EU)		24 tonnes
Véhicule moteur à deux essieux ou véhicule remorqué à deux essieux	19 tonnes	18 tonnes
Véhicule remorqué à trois essieux et plus	26 tonnes	24 tonnes
Véhicule moteur à trois essieux	26 tonnes	25 tonnes <i>26 tonnes si suspension pneumatique ou équivalente et roues jumelées sur essieu moteur</i>
Véhicule moteur à quatre essieux et plus	32 tonnes	32 tonnes <i>si suspension pneumatique ou équivalente et roues jumelées sur essieu moteur</i>
Ensemble articulé de moins de quatre essieux	38 tonnes	36 tonnes
Ensemble articulé de cinq essieux et plus	40 tonnes <i>44 tonnes si transport combiné</i>	40 tonnes <i>44 tonnes si transport combiné</i>

Tableau 11 : Récapitulatif des limitations de charge à l'essieu

A noter l'absence de législation en France sur le poids autorisé pour un essieu tridem.

A ces prescriptions s'ajoutent d'autres règles que voici :

- Dans le Code de la Route, le poids réel d'un véhicule remorqué ne doit pas être supérieur à 1,3 fois le poids du véhicule tracteur. Si le poids total réel de l'ensemble est supérieur à 32 tonnes, le coefficient 1,3 est majoré de 80% du rapport entre le poids excédant 32 tonnes et 32 tonnes, sans pouvoir être supérieur à 1,5 (atteint pour 40 tonnes).
- Dans la directive européenne, le poids supporté par le(s) essieu(x) moteur ne doit pas être inférieur à 25% du poids total en charge du véhicule.

Pour la suite de notre étude, nous choisirons de respecter les règles les plus restrictives entre le Code de la Route français et la directive européenne. Cela nous permettra de considérer des véhicules pouvant circuler sur le réseau français mais aussi sur le réseau européen. Cependant, nous faisons l'hypothèse que les véhicules de 60 tonnes sur plus de 7 essieux sont autorisés.

La vérification de chaque charge se fait en deux étapes :

- Tout d'abord, il faut vérifier que chaque charge par essieu ou par groupe d'essieux n'excède pas la charge maximale autorisée ;
- Ensuite, pour chaque unité, la charge totale ne doit pas dépasser les valeurs prescrites.

3.2.2 Cas de charges

Les EMS n'auraient d'intérêt que dans une recombinaison de trois poids lourds du trafic de 40 tonnes en deux EMS de 60 tonnes. De plus, l'étude concernant les impacts sur les infrastructures n'est pertinente que pour des charges maximales. Cependant, les PL qui circulent sur le réseau routier français ne sont pas tous chargés au maximum de leur capacité. Pour l'étude, deux cas de charges devraient donc être examinés avec une première configuration d'EMS chargés à 60 tonnes et dans une seconde configuration des EMS chargés à 55 tonnes. Dans le présent document, seules les configurations chargées à 60 tonnes ont été prises en compte.

Les caractéristiques de poids par essieu sont données dans la partie suivante, pour le cas d'une charge uniformément répartie, c'est-à-dire que chaque remorque ou semi-remorque est chargée uniformément. La charge totale vaut 40 tonnes dans le cas des PL du trafic et 60 tonnes pour les EMS. Les valeurs sont issues des études précédentes, et principalement de l'étude comparative menée par l'OCDE. Certaines silhouettes d'EMS sont déjà autorisées donc les valeurs de charges à l'essieu courantes ont été reprises. Dans le cas où aucune information n'était disponible, nous avons travaillé avec de simples équations de la statique, en supposant que la charge était uniformément répartie sur chaque appui du véhicule. Si un des appuis est un essieu tandem ou tridem, il suffisait ensuite de diviser la charge par le nombre d'essieux pour obtenir la charge sur chaque essieu. Nous avons veillé à respecter les valeurs maximales autorisées.

Un tableau des caractéristiques est également fourni en annexe B (page 88) dans le cas d'une charge uniformément répartie pour les EMS de 55 tonnes.

3.2.3 Caractéristiques des EMS retenus

Afin d'étudier l'impact des EMS, il est nécessaire de spécifier les caractéristiques de ces véhicules. Outre les longueurs entre essieux, ce sont aussi les charges sur chaque essieu qui doivent être précisées. Ces informations sont données pour chaque configuration dans les tableaux qui suivent.

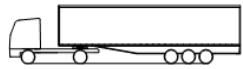

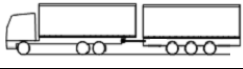
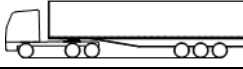
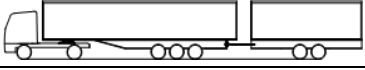
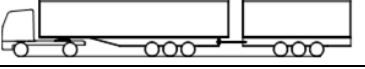
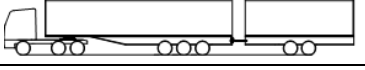
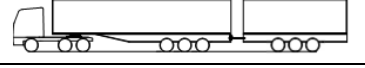
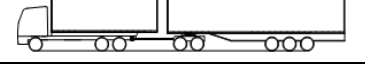
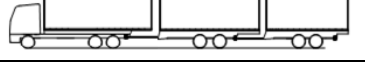
Code	Silhouette	Poids total	Charges par essieu (en tonnes)									Distance entre essieux (en mètres)							
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
PL 5		40 tonnes	6,5	11,5	7,3	7,4	7,3					3,75	5,7	1,31	1,31				
PL 9		40 tonnes	7	9	9	7,5	7,5					4,8	1,36	6,6	1,4				
PL 10		40 tonnes	7	7,5	7,5	6	6	6				4,8	1,36	5,75	1,36	1,36			
PL 11		40 tonnes	6,5	7	7	6,5	6,5	6,5				2,9	1,36	6,3	1,31	1,31			
EMS 1		60 tonnes	6,5	11,5	8	8	8	9	9			3,75	5,7	1,31	1,31	5,8	1,4		
EMS 2		60 tonnes	6,5	11,5	7,3	7,4	7,3	6,7	6,7	6,6		3,75	5,7	1,31	1,31	4,62	1,36	1,36	
EMS 3		60 tonnes	6,5	8	8,5	7	7	7	8	8		2,9	1,36	6,3	1,31	1,31	6,14	1,4	
EMS 4		60 tonnes	6,5	7	7	6,5	6,5	6,5	6,7	6,7	6,6	2,9	1,36	6,3	1,31	1,31	5,64	1,36	1,36
EMS 5		60 tonnes	7	11,5	6,5	7	7	7	7	7		4,8	1,36	4,45	1,31	6,1	1,31	1,31	
EMS 6		60 tonnes	7	9	9	8,5	8,5	9	9			4,8	1,36	6,6	1,4	5,61	1,4		

Tableau 12 : Caractéristiques des PL du trafic et des EMS retenus

3.3 Ponts étudiés

3.3.1 Modélisations retenues

Les ponts étudiés sont des modélisations simplifiées des cas réels. En effet, les ponts sont représentés par des poutres reposant sur des appuis simples. Ce choix des ponts est motivé par :

- Les études précédentes [SETRA, 2007], [TA, 2009] ;
- Les campagnes de qualité IQOA menées chaque année par le SETRA sur un tiers du réseau routier national non concédé.

Les résultats de la campagne d'auscultation des ponts du réseau routier national non concédé (RRNNC) de 2008 [SETRA, 2009] sont présentés ci-dessous. Les ponts du RRNNC forment un ensemble de 12 000 ponts. Ils ont été caractérisés selon leur classe de longueur :

Longueur totale	Nombre d'ouvrages	Pourcentage	Pourcentage cumulé
De 2 à 5 m	2 569	21,4 %	21,4 %
De 5 à 10 m	2 965	24,7 %	46,1 %
De 10 à 50 m	4 530	37,8 %	83,9 %
De 50 à 100 m	1 262	10,5 %	94,4 %
Plus de 100 m	674	5,6 %	100 %

Tableau 13 : Analyse statistique de la « population » des ponts en France en 2008

Cela permet de souligner qu'une très grande majorité de ponts a une longueur inférieure à 50 mètres ; en effet, cela représente près de 84 % des cas de la « population » des ponts sur le RRNNC. Dans le temps imparti pour l'étude, il n'est pas forcément utile de prendre des longueurs d'études supérieures à 100 mètres, étant donné que peu d'ouvrages sont concernés.

A partir de données statistiques sur les configurations de travées des ponts du RRNNC en France, les configurations de pont isostatique, ainsi que de pont à deux et trois travées ont été conservées. Ces données sont disponibles en annexe C (page 89).

Il ne semble pas pertinent d'étudier les ponts dont le nombre de travées est supérieur à trois car les effets (moment fléchissant ou effort tranchant) sont négligeables au-delà de trois travées. L'analyse a été faite pour les ponts de travée de 10 mètres ; elle est présentée en annexe D (page 91).

Ainsi, nous avons décidé de conserver les configurations suivantes :

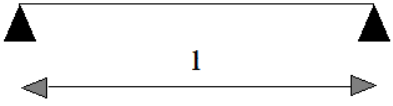
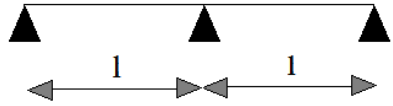
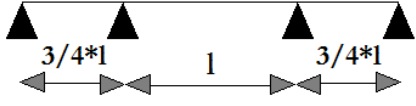
Configuration	Longueur des travées étudiées	Justification
Pont isostatique d'une seule travée 	5, 10, 15, 20, 30 et 50 m	Les ponts de longueur inférieure à 50 mètres représentent une majorité des cas. De plus, 50 m semble représentait une limite acceptable pour des ponts à une seule travée. Les pas de mesure sont volontairement pris plus faibles pour les petites longueurs afin de pouvoir appréhender au mieux les effets locaux des charges d'essieu.
Pont de deux travées égales 	10, 20, 30, 40 et 50 m	L'étude portera ainsi sur des ponts d'une longueur totale allant jusqu'à 100 mètres.
Pont avec trois travées 	10, 20, 30, 40 et 50 m	Les justifications vues dans le cas précédent demeurent utilisables. Il ne semble pas pertinent de commencer avec des longueurs plus faibles. En prenant une longueur maximale de travée égale à 50 mètres, la longueur totale maximale du pont est de 125 mètres.

Tableau 14 : Configurations de ponts retenues pour la présente étude

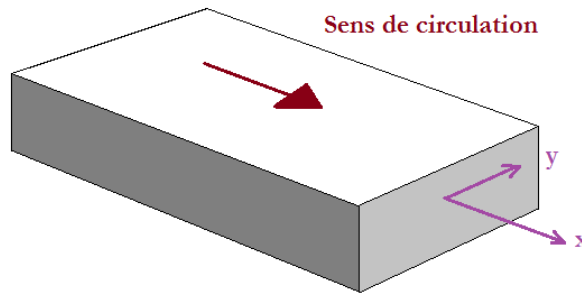
Pour les ponts continus à trois travées, il s'est posé la question de savoir quel doit être le balancement, c'est-à-dire le rapport entre la longueur de la travée de rive et la travée centrale. Il s'agit du coefficient multiplicatif de la longueur l (longueur de la travée principale). Des études antérieures utilisaient un balancement de $3/4$ [TA, 2009] tandis que d'autres préconisaient un coefficient $2/3$ [TRC, 2010]. Néanmoins, après consultation de responsables ayant eu trait à ces études, il semblerait que cela ait peu d'importance lorsqu'il s'agit de comparer les effets entre différentes silhouettes de poids lourds. D'autant plus que le balancement dépend du type d'ouvrage considéré (à savoir béton, métallique ou mixte) et du mode de construction. Ce rapport varie classiquement entre 0,6 et 0,9.

Pour les besoins de l'étude, il nous a semblé plus judicieux de considérer une configuration de type $\frac{3}{4}l, l, \frac{3}{4}l$ comme cela a été présenté ci-dessus. Le balancement vaut alors 0,75 valeur médiane des balancements courants. Le coefficient $3/4$ a été préféré à $2/3$ car les efforts extrêmes calculés seront plus importants étant donné que les longueurs totales des ponts seront plus grandes. Cela nous permet de prendre un certain facteur de sécurité en prenant en compte un des cas les plus défavorables.

3.3.2 Lignes d'influence

La ligne d'influence est une fonction de transfert qui représente un effet (c'est-à-dire une force ou un déplacement) précis de la structure lorsqu'une action unitaire est déplacée le long d'une ligne ou sur une surface de la structure étudiée. Il est donc possible d'obtenir une ligne d'influence vis-à-vis des moments fléchissants mais aussi par rapport aux efforts tranchants.

Posons $f(x, y)$ l'effet f engendré lorsqu'un effort unitaire est appliqué aux coordonnées (x, y) . Généralement, l'effet f s'exprime comme suit : $f(x, y) = f(x) \cdot g(y)$ où $f(x)$ est la valeur de la ligne d'influence longitudinale en x et $g(y)$ représente la valeur de la ligne d'influence transversale en y . Lorsque le tablier du pont est homogène, alors $g(y) = 1$, pour toute valeur de y . On ne se préoccupe alors que de la ligne d'influence longitudinale.

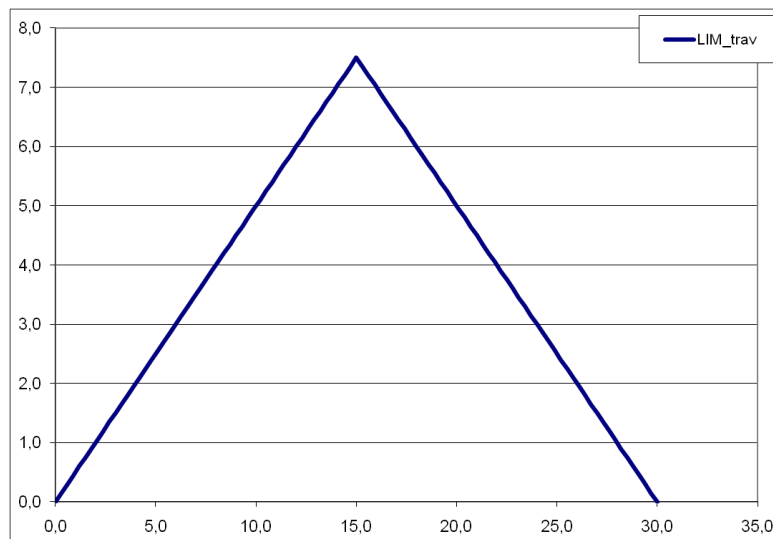


Représentation schématique du pont

Figure 3.3 : Schéma tridimensionnel d'un élément de pont

Les lignes d'influence correspondantes aux configurations de ponts présentées ci-dessus ont été déterminées grâce au logiciel SP1 du SETRA, exécutable sous forme de macro sur Excel.

Voici l'exemple de la ligne d'influence des moments fléchissants pour un pont isostatique d'une longueur de 30 mètres :



Ligne d'influence pour un pont isostatique d'une longueur de 30 mètres

Figure 3.4 : Exemple d'une ligne d'influence théorique

Si l'on souhaite calculer l'effet d'une charge ponctuelle de valeur $P=10$ kN placée en $x=5$ m, alors le moment fléchissant induit vaut $M = f(x=15) \cdot P = 7,5 \cdot 10 = 75$ kN/m. Il est alors possible de vérifier ce résultat. A mi-travée, pour une poutre isostatique de longueur l et soumise à une force ponctuelle de valeur P , le moment fléchissant vaut $M = P \cdot l / 4$ soit ici, $M = 10 \cdot 30 / 4 = 75$ kN/m.

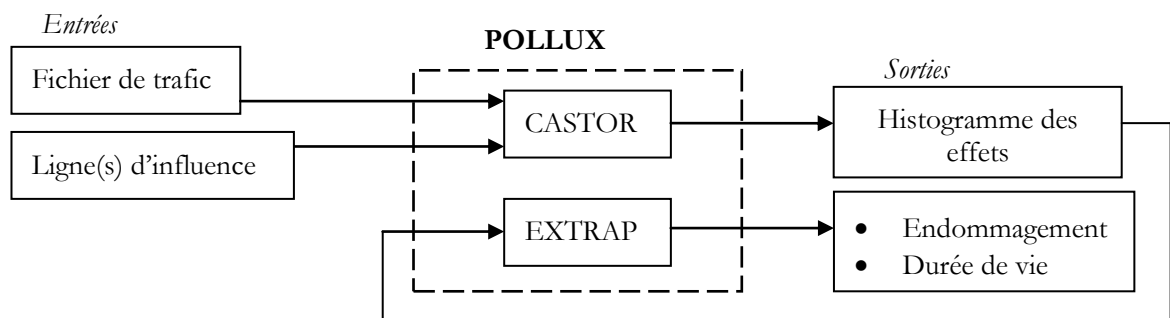
4 SIMULATIONS

4.1 Présentation du logiciel

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel POLLUX – LCPC.

4.1.1 Présentation

Le logiciel POLLUX a été développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Il permet de regrouper au sein d'une seule base logicielle, les modules CASTOR (Calcul des Actions de Sollicitations du Trafic sur Ouvrages Routiers) et EXTRAP. Ces deux derniers ont été créés respectivement pour déterminer des histogrammes d'efforts sur les ponts et pour extrapoler les valeurs maximales afin de déterminer le comportement en fatigue du pont.



Modèle de calcul de POLLUX

Figure 4.1 : Principe de fonctionnement du logiciel POLLUX

Le modèle de POLLUX nécessite donc comme entrées, des fichiers de trafic et des fichiers représentant les lignes d'influence (figure 4.1). La forme et le principe de construction de ces deux types de fichiers sont plus longuement explicités en annexe E (page 93).

Les paramètres du modèle sont :

- Le pas de l'histogramme, le nombre de valeurs extrêmes, la valeur minimale et la valeur maximale pour le module CASTOR ;
- Les périodes de retour¹² des effets ainsi que les seuils de Kolmogorov¹³ pour le module EXTRAP.

Tout d'abord, le sous-programme CASTOR permet de calculer des histogrammes des effets. Les effets comprennent les moments fléchissants à mi-travée ou sur appui et les efforts tranchants engendrés par les charges des essieux sur le pont. Les histogrammes se présentent sous la forme d'un tableau à deux colonnes listant les valeurs des cycles d'efforts et le nombre de cycles correspondant.

¹² La période de retour d'un effet aléatoire correspond à sa probabilité d'apparition sur une durée de temps donnée. Par exemple, un phénomène centennal correspond à un effet de période de retour égale à 100 ans, soit un phénomène qui a une probabilité de 10% de se réaliser en 100 ans.

¹³ Dans le cadre de calculs probabilistes sur la redondance d'effet, les seuils de Kolmogorov sont utilisés afin de déterminer si la loi suivie par l'effet est statistiquement identique à la loi donnée par sa fonction de répartition continue. Il s'agit du test de Kolmogorov-Smirnov. La valeur de seuil classiquement usitée est de 5%, soit 0,05.

Voici un exemple :

Valeur des cycles (en unité de l'effort considéré)	Nombre de cycles
0	55
500	180
1000	2500
2000	570
3500	450

Cela signifie que pour cet enregistrement du trafic et en fonction de la ligne d'influence prise, il y a eu 180 cycles de l'effet d'une valeur de 500 unités (kN ou kN.m), 2500 cycles à 1000 unités, 570 cycles à 2000 unités et 450 cycles à 3500 unités. Ces histogrammes permettent de connaître la valeur de l'effet maximal. Ils permettent aussi de travailler sur les effets en fatigue par une méthode de « rain-flow » (présentée dans la section 2.2.1.1).

4.1.2 Interface

L'interface du logiciel est également présentée en annexe E (page 93) du document.

4.1.3 « Prétraitements »

Les fichiers du trafic utilisables sous POLLUX ont une structure particulière. En pratique, il n'est pas possible de transcrire sous forme d'un seul véhicule, un poids lourds ayant plus de 8 essieux. De même, si le poids lourds a au moins une interdistance entre essieux supérieure à 9,9 mètres, il n'est pas possible de former un fichier de trafic. Il est donc obligatoire de considérer ces cas à part.

La solution proposée consiste à « découper » le véhicule qui présente ce genre d'« anomalies ». Cependant les effets produits par un véhicule « entier » et ceux produits par ce même véhicule « découpé » se doivent d'être identiques. L'essai a été mené sous POLLUX avec un semi-remorque de type T2S3 (tracteur avec deux essieux et semi-remorque à essieu tridem), car il était possible de connaître les effets dans les deux cas (poids-lourds « entier » puis poids-lourds « découpé » en deux unités).

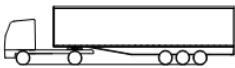
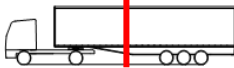
Cas 1 : PL entier	Cas 2 : PL scindé
	
0005920000100510180000002000400120506537115570731307413073	0005920000100510180000002000180037206537115 000602000010051018000047200022002630731307413073

Tableau 15 : Illustration du prétraitement sous POLLUX

Les charges et distances entre essieux restent strictement identiques. Il est cependant nécessaire de paramétrer le temps de passage de la seconde unité du PL scindé afin que cela respecte la distance réelle entre les deux essieux virtuellement séparés (ici distance entre le second essieu du tracteur et le premier essieu de la semi-remorque).

Les effets extrêmes (moments fléchissants ou efforts tranchants) sont statistiquement égaux. Les petites différences que l'on relève (et qui n'excèdent pas 1% de la valeur de l'effet) sont dues au paramétrage du temps de passage de la seconde unité. Dans l'exemple, l'écart de temps de passage vaut : $\frac{\text{Longueur totale de la première unité} + \text{distance entre essieux "séparés"}}{\text{Vitesse de circulation du véhicule}}$

Soit $t = \frac{3,7+5,7}{20} = 0,47 \text{ secondes}$. Mais il se peut que l'écart de temps de passage ne donne pas des centièmes entiers (par exemple $t=0,476s$) et dans ce cas, cela induit un arrondi et donc des différences dans le calcul des effets.

4.2 Etude de cas simples

4.2.1 Véhicules individuels

Dans un premier temps, les effets extrêmes de chaque silhouette de poids lourd (prises individuellement) sur les configurations et les longueurs de travées retenues ont été calculés. Nous présentons les interprétations obtenues à partir des résultats sous POLLUX et disponibles en annexe F (page 98). Y sont jointes des analyses des corrélations entre facteurs obtenues grâce à des Analyses en Composantes Principales (ACP).

L'ACP permet d'analyser un nombre initial N de données quantitatives et de les représenter par un nombre réduit n de variables au moyen d'une projection. Les variables descriptives sont appelées « composantes principales ». La projection entraîne une perte d'information. Afin de déterminer la force de liaison entre les variables, il convient de réaliser une matrice de corrélation composée des coefficients de corrélation linéaire de Pearson. Ces coefficients sont les coefficients classiquement utilisés pour ce type de calculs. Le coefficient de Pearson de deux variables s'obtient en réalisant le rapport entre la covariance et le produit des variances de chaque variable.

$$r = \frac{cov(X, Y)}{var(X) \cdot var(Y)} \quad \text{où} \quad \left\{ \begin{array}{l} var(X) = \frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{X})^2, \text{ la variance de } X \\ cov(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{X}) \cdot (y_i - \bar{Y}) \end{array} \right.$$

x_i étant la $i^{\text{ème}}$ valeur de la variable X et $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i x_i$, la moyenne de la variable X

Le coefficient r appartient à l'intervalle $[-1 ; 1]$. Plus sa valeur absolue est proche de 1 et plus la relation entre les deux variables étudiées peut être qualifiée de forte. Si sa valeur est positive, les variables évoluent dans le même sens tandis que si le coefficient est négatif, les deux variables ont un sens d'évolution opposé.

Les effets maximaux ont été étudiés selon une série de huit paramètres qui sont :

- La longueur totale du PL,
- Le poids total du véhicule,
- Sa charge linéique ou sa masse uniformément répartie, c'est-à-dire le rapport entre le poids total sur la longueur totale,
- Le poids du groupe d'essieux le plus chargé,
- Le nombre de groupes d'essieux,
- Le nombre d'essieux,
- La charge moyenne par essieu, à savoir le rapport entre la masse totale par le nombre d'essieux,
- Et la charge moyenne par groupe d'essieux c'est-à-dire le rapport de la masse totale par le nombre de groupes d'essieux.

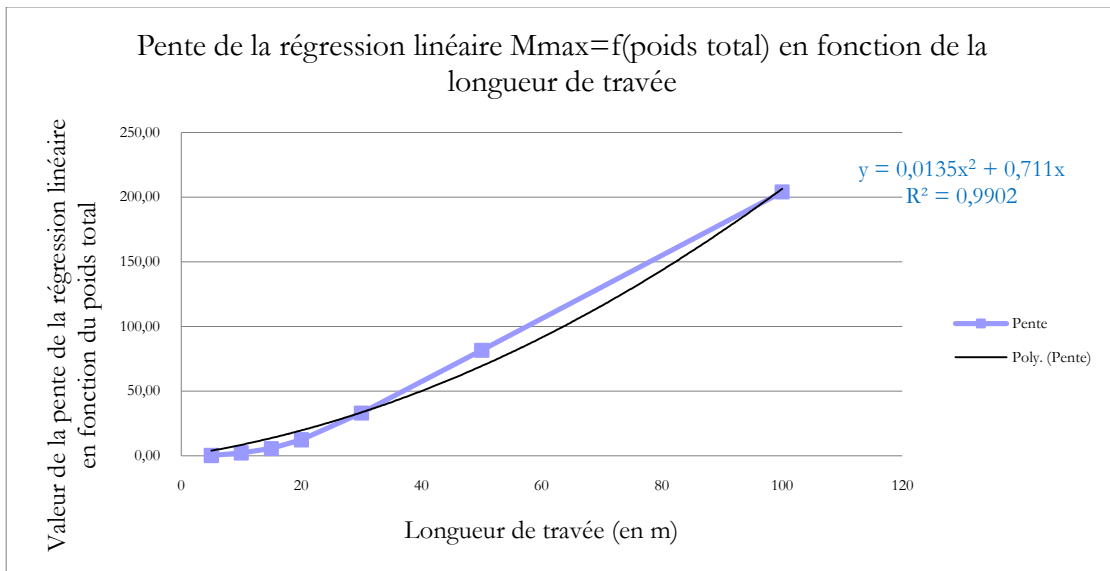
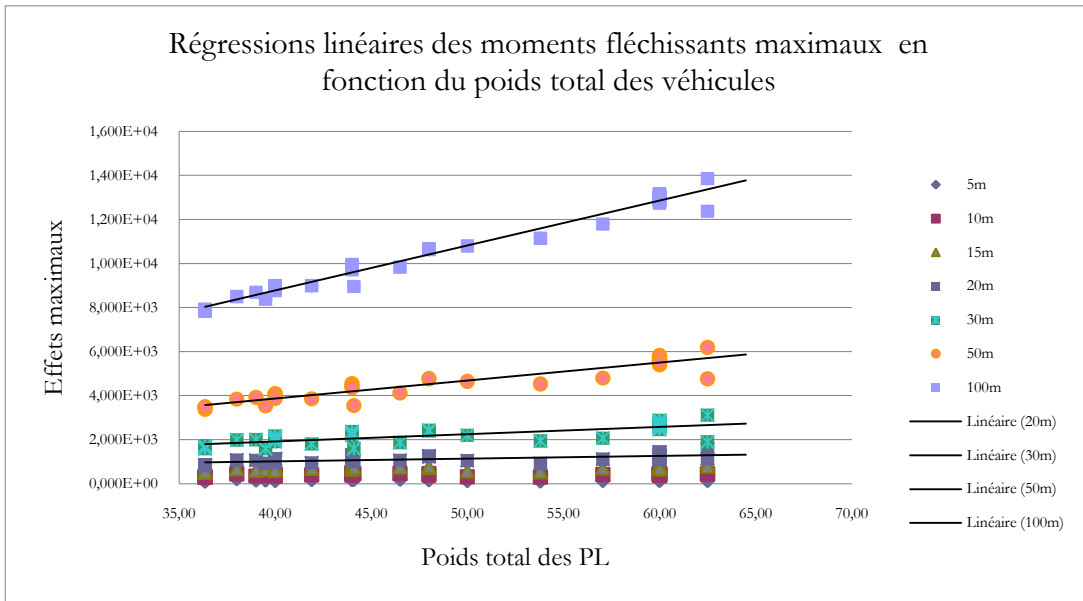
Un groupe d'essieux est un ensemble d'essieux pour lesquels les distances entre essieux n'excèdent pas 1,80 m. Ainsi, cela comprend les essieux isolés, les essieux tandem et tridem.

Pour les moments fléchissants maximaux à mi-travée :

- Les moments fléchissants maximaux sont croissants avec la longueur L de la travée. La relation est de type polynomial d'ordre 2 soit $M_{\max} = \alpha \cdot L^2 + \beta \cdot L$ avec pour ordre de grandeur, $\beta \approx \alpha \cdot 10^2$ (où les coefficients α et $\beta > 0$).
- Les effets maximaux sont fortement corrélés (positivement) au poids total des poids lourds pour les ponts de très grandes travées (longueur supérieure à 50 mètres) : de ce fait, les silhouettes les plus agressives pour les grandes travées ($L \geq 50\text{m}$) sont les silhouettes les plus chargées. D'où $\alpha = f$ (poids total). En revanche, il n'y a pas de relation linéaire entre les effets maximaux et le poids total dans le cas de ponts à courtes et moyennes travées.
- Les effets maximaux sont corrélés (positivement) au nombre d'essieux des poids lourds pour les ponts de très grandes travées ($L \geq 50\text{m}$). Ainsi, tout paramètre égal par ailleurs, un véhicule sera plus agressif qu'un autre qui possède moins d'essieux. En le rapprochant du constat précédent et en se remémorant les limitations de charge, il est logique qu'un véhicule possédant un plus grand nombre d'essieux transporte un plus fort tonnage.
- Les effets maximaux ne sont pas corrélés linéairement ni à la longueur totale ni au nombre de groupes d'essieux, quelle que soit la longueur de travée envisagée.
- Les effets maximaux sont essentiellement corrélés au poids du groupe d'essieux le plus chargé pour les ponts de courtes travées (longueur inférieure à 10 mètres) ; cela s'explique par le fait que tous les essieux ne peuvent pas être simultanément sur le pont et que le groupe d'essieux le plus lourd engendre l'effet maximal.

		Longueurs des travées (en mètres)						
		5	10	15	20	30	50	100
Variables	Longueur totale PL	-0,401	-0,064	0,026	0,026	0,094	0,382	0,547
	Poids total	0,085	0,376	0,552	0,685	0,773	0,935	0,988
	Charge linéique	0,593	0,565	0,644	0,771	0,735	0,560	0,422
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	0,734	0,805	0,705	0,614	0,511	0,396	0,315
	Nombre de groupes d'essieux	-0,545	-0,242	-0,042	0,126	0,270	0,461	0,552
	Nombre d'essieux	-0,092	0,228	0,412	0,472	0,569	0,773	0,861
	Charge moyenne par essieux	0,393	0,224	0,116	0,242	0,172	0,029	-0,061
	Charge moyenne par groupe d'essieux	0,661	0,718	0,708	0,681	0,626	0,631	0,608

Tableau 16 : Matrice de corrélation entre les variables (Moments fléchissants maximaux pour ponts isostatiques)



Pour les efforts tranchants minimaux pour les ponts isostatiques :

- Les efforts tranchants minimaux sont relativement constants en fonction de la longueur de la travée. Les variations observées sont des décroissances (i.e. les effets augmentent en valeur absolue avec la longueur de la travée).
- Les effets maximaux sont fortement corrélés (linéairement) au poids total des poids lourds, pour les longueurs de travée supérieures à 30 mètres. Cela correspond aux cas où tous les essieux du PL sont simultanément sur le pont.
- De même, il existe une relation linéaire entre les effets extrêmes et le nombre d'essieux pour les travées supérieures à 50 mètres.
- Les PL les plus agressifs en termes d'efforts tranchants sont identiques aux PL les plus agressifs pour les moments fléchissants.

		Longueurs des travées (en mètres)						
		5	10	15	20	30	50	100
Variables	Longueur totale PL	-0,162	-0,166	-0,216	-0,241	-0,304	-0,456	-0,564
	Poids total	-0,721	-0,730	-0,788	-0,810	-0,860	-0,947	-0,988
	Charge linéique	-0,569	-0,572	-0,569	-0,562	-0,538	-0,465	-0,392
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	-0,352	-0,349	-0,368	-0,386	-0,398	-0,351	-0,301
	Nombre de groupes d'essieux	-0,391	-0,392	-0,396	-0,394	-0,412	-0,504	-0,561
	Nombre d'essieux	-0,531	-0,547	-0,603	-0,623	-0,679	-0,793	-0,860
	Charge moyenne par essieux	-0,138	-0,122	-0,102	-0,096	-0,066	0,010	0,069
	Charge moyenne par groupe d'essieux	-0,441	-0,448	-0,512	-0,542	-0,586	-0,603	-0,597

Tableau 17 : Matrice de corrélation entre les variables (Efforts tranchants minimaux pour ponts isostatiques)

Moments fléchissants (appui à mi-travée) pour ponts à deux travées :

- Les effets extrêmes (maximaux ou minimaux) sont croissants en valeur absolue en fonction de la longueur de la travée.
- Les effets extrêmes (maximaux ou minimaux) sont fortement corrélés (linéairement) au poids total et au nombre d'essieux des véhicules pour les travées supérieures à 40 m.
- Pour les travées inférieures à 30 mètres, les effets extrêmes sont fortement corrélés à la charge moyenne par groupes d'essieux et au poids du groupe d'essieux le plus chargé (pour 10 et 20 m).
- Les effets extrêmes (maximaux ou minimaux) ne sont pas dépendants de la longueur totale ou du nombre de groupes d'essieux (pour les travées inférieures à 30 m) et de la charge moyenne par essieu (pour les travées de plus de 40 m).

		Longueurs des travées (en mètres)					
		10	20	30	40	50	100
Variables	Longueur totale PL	0,120	-0,165	0,063	0,238	0,353	0,532
	Poids total	0,480	0,546	0,750	0,861	0,919	0,985
	Charge linéique	0,436	0,821	0,747	0,651	0,575	0,436
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	0,574	0,637	0,546	0,451	0,396	0,329
	Nombre de groupes d'essieux	-0,166	-0,035	0,200	0,347	0,431	0,533
	Nombre d'essieux	0,370	0,306	0,536	0,671	0,748	0,852
	Charge moyenne par essieux	0,121	0,327	0,200	0,113	0,052	-0,050
	Charge moyenne par groupe d'essieux	0,758	0,663	0,667	0,653	0,640	0,622

Tableau 18 : Matrice de corrélation entre variables (Moments fléchissants maximaux avec appui à mi-travée, ponts à 2 travées)

Moments fléchissants (appui sur pile) pour ponts à deux travées :

- Les moments maximaux (appui sur pile) pour les ponts à deux travées sont nuls, quelle que soit la longueur de la travée.
- Les effets minimaux sont croissants en valeur absolue en fonction de la longueur de la travée.
- Les moments fléchissants avec appui sur pile évoluent linéairement avec la longueur du pont : $M_{\min} = \alpha * L$ où α dépend linéairement du poids total P du véhicule et du nombre N d'essieux : $\alpha = -P/2 - 5 * N/2 - 4,8$ (pour les longueurs de travées supérieures ou égales à 30 mètres)
- Les effets maximaux sont fortement corrélés (linéairement) au poids total et au nombre d'essieux des véhicules, pour les travées supérieures à 20 mètres.
- Pour les travées de 10 mètres, il y a une relation linéaire entre l'effet maximal et la charge uniformément répartie ainsi qu'avec la charge moyenne par groupe d'essieux (i.e. le nombre d'essieux isolés/tandem/tridem).

		Longueurs des travées (en mètres)					
		10	20	30	40	50	100
Variables	Longueur totale PL	0,230	-0,651	-0,547	-0,447	-0,469	-0,614
	Poids total	-0,458	-0,948	-0,952	-0,960	-0,968	-0,998
	Charge linéique	-0,806	-0,222	-0,428	-0,516	-0,482	-0,350
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	-0,635	-0,294	-0,343	-0,377	-0,368	-0,274
	Nombre de groupes d'essieux	0,129	-0,496	-0,504	-0,463	-0,485	-0,581
	Nombre d'essieux	-0,283	-0,893	-0,838	-0,807	-0,825	-0,888
	Charge moyenne par essieux	-0,262	0,220	0,055	0,000	0,027	0,102
	Charge moyenne par groupe d'essieux	-0,674	-0,627	-0,629	-0,659	-0,649	-0,593

Tableau 19 : Matrice de corrélation entre variables (Moments fléchissants minimaux avec appui sur pile, ponts à 2 travées)

Efforts tranchants pour les ponts à deux travées :

- Les effets extrêmes sont croissants en fonction de la longueur de la travée. On observe un phénomène de saturation (évolution plus faible) pour les travées supérieures à 40 mètres.
- Les effets extrêmes sont fortement corrélés au poids total et au nombre d'essieux pour les travées supérieures à 40 mètres.
- Pour les travées plus courtes, les effets extrêmes sont corrélés à la charge uniformément répartie, à la charge moyenne par groupe d'essieux et au poids du groupe d'essieux le plus chargé (travées de moins de 20 mètres).

		Longueurs des travées (en mètres)					
		10	20	30	40	50	100
Variables	Longueur totale PL	-0,200	-0,141	0,084	0,220	0,305	0,514
	Poids total	0,210	0,576	0,765	0,860	0,905	0,982
	Charge linéique	0,519	0,854	0,756	0,679	0,619	0,451
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	0,509	0,751	0,663	0,582	0,527	0,367
	Nombre de groupes d'essieux	-0,356	-0,080	0,089	0,216	0,303	0,498
	Nombre d'essieux	0,077	0,368	0,561	0,675	0,728	0,847
	Charge moyenne par essieux	0,298	0,252	0,176	0,102	0,064	-0,043
	Charge moyenne par groupe d'essieux	0,605	0,767	0,814	0,796	0,762	0,657

Tableau 20 : Matrice de corrélation entre variables (Efforts tranchants maximaux, ponts à 2 travées)

Moments fléchissants (appui à mi-travée de la travée de **rive**) pour ponts à trois travées :

- Les effets extrêmes sont croissants en valeur absolue en fonction de la longueur de la travée.
- Les corrélations sont similaires entre les effets maximaux et minimaux :
- Pour les travées inférieures à 20 mètres (compris), la charge moyenne par groupe d'essieux, la charge uniformément répartie et le poids du groupe d'essieux le plus chargé sont prépondérants
- Pour les travées de 30 et 40 mètres, les paramètres qui jouent un rôle important sont la charge uniformément répartie et le poids total
- Pour les travées de 50 et 100 mètres, ce sont le poids total et le nombre d'essieux qui influent sur la valeur de l'effet extrême.

		Longueurs des travées (en mètres)					
		10	20	30	40	50	100
Variables	Longueur totale PL	0,007	-0,229	-0,111	0,042	0,207	0,474
	Poids total	0,195	0,445	0,603	0,737	0,847	0,969
	Charge linéique	0,233	0,789	0,820	0,760	0,675	0,488
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	0,482	0,722	0,588	0,529	0,458	0,351
	Nombre de groupes d'essieux	-0,340	-0,185	0,085	0,226	0,350	0,513
	Nombre d'essieux	0,168	0,225	0,370	0,529	0,655	0,824
	Charge moyenne par essieux	0,002	0,305	0,293	0,193	0,122	-0,020
	Charge moyenne par groupe d'essieux	0,603	0,704	0,611	0,625	0,633	0,622

Tableau 21 : Matrice de corrélation (Moments fléchissants maximaux avec appui à mi-travée de rive, ponts à 3 travées)

Moments fléchissants (appui à mi-travée de la travée **centrale**) pour ponts à trois travées :

- Les effets extrêmes sont croissants en valeur absolue en fonction de la longueur de la travée.
- Les corrélations sont similaires entre les effets maximaux et minimaux :
- Pour les travées inférieures à 20 mètres (compris), la charge moyenne par groupe d'essieux et le poids du groupe d'essieux le plus chargé sont prépondérants.
- Pour les travées de 30 et 40 mètres, le paramètre qui joue un rôle important est la charge uniformément répartie.

- Pour les travées de 50 et 100 mètres, ce sont le poids total et le nombre d'essieux qui influent sur la valeur de l'effet extrême.

		Longueurs des travées (en mètres)					
		10	20	30	40	50	100
Variables	Longueur totale PL	-0,178	-0,178	0,024	-0,016	0,313	0,505
	Poids total	0,049	0,048	0,730	0,675	0,905	0,978
	Charge linéique	0,334	0,334	0,781	0,745	0,614	0,462
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	0,630	0,630	0,576	0,525	0,435	0,338
	Nombre de groupes d'essieux	-0,473	-0,473	0,188	0,176	0,411	0,529
	Nombre d'essieux	-0,018	-0,018	0,517	0,454	0,727	0,840
	Charge moyenne par essieux	0,169	0,169	0,207	0,226	0,075	-0,036
	Charge moyenne par groupe d'essieux	0,567	0,567	0,660	0,596	0,644	0,617

Tableau 22 : Matrice de corrélation (Moments fléchissants maximaux avec appui à mi-travée centrale, ponts à 3 travées)

Moments fléchissants (appui sur pile) pour ponts à trois travées :

- L'évolution des effets extrêmes est linéaire en fonction de la longueur de la travée :
- Les moments fléchissants maximaux avec appui sur pile évoluent linéairement avec la longueur du pont : $M_{\max} = \alpha * L$ où α dépend linéairement du poids total P du véhicule et du nombre N d'essieux : $\alpha = 0,08 * P + 0,48 * N + 1,4$
- Les moments fléchissants minimaux avec appui sur pile évoluent linéairement avec la longueur du pont : $M_{\min} = \alpha * L$ où α dépend linéairement du poids total P du véhicule et du nombre N d'essieux : $\alpha = -2 * P / 5 - 5 * N / 2 - 5,1$
- Les différences s'accroissent pour les ponts de travée supérieure à 30 mètres.
- Les moments fléchissants (maximaux ou minimaux) sont fortement corrélés linéairement avec :
 - Le poids du groupe d'essieux le plus chargé et la charge moyenne par groupe d'essieux pour les travées de 10 et 20 mètres.
 - La charge uniformément répartie pour les travées de 30 et 40 mètres.
 - Le poids total et avec le nombre d'essieux pour les longueurs de travée supérieures à 40 mètres (compris).
- Les moments fléchissants minimaux (appui sur pile) sont fortement corrélés linéairement avec le poids total et le nombre d'essieux dès 20 mètres.

		Longueurs des travées (en mètres)					
		10	20	30	40	50	100
Variables	Longueur totale PL	-0,356	-0,332	-0,179	0,084	0,273	0,580
	Poids total	0,105	0,378	0,561	0,782	0,888	0,994
	Charge linéique	0,595	0,842	0,858	0,745	0,625	0,386
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	0,744	0,730	0,596	0,537	0,470	0,300
	Nombre de groupes d'essieux	-0,610	-0,211	0,050	0,227	0,359	0,561
	Nombre d'essieux	-0,022	0,165	0,355	0,587	0,713	0,876
	Charge moyenne par essieux	0,271	0,339	0,265	0,144	0,062	-0,085
	Charge moyenne par groupe d'essieux	0,763	0,669	0,608	0,681	0,679	0,608

Tableau 23 : Matrice de corrélation (Moments fléchissants maximaux avec appui sur pile, ponts à 3 travées)

Efforts tranchants pour les ponts à trois travées :

- Les effets extrêmes sont croissants en fonction de la longueur de la travée. On observe un phénomène de saturation (évolution plus faible) pour les travées supérieures à 40 mètres.
- Les effets extrêmes sont fortement corrélés au poids total et au nombre d'essieux pour les travées supérieures à 40 mètres (compris).
- Pour les travées plus courtes, les effets extrêmes sont corrélés à la charge uniformément répartie, à la charge moyenne par groupe d'essieux et au poids du groupe d'essieux le plus chargé (travées de moins de 30 mètres).



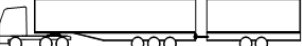

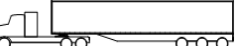



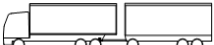
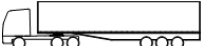






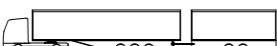
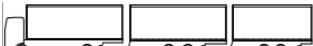
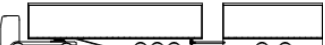

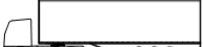
		Longueurs des travées (en mètres)					
		10	20	30	40	50	100
Variables	Longueur totale PL	-0,243	-0,236	-0,086	0,088	0,195	0,441
	Poids total	0,038	0,435	0,629	0,768	0,844	0,960
	Charge linéique	0,358	0,826	0,836	0,754	0,695	0,516
	Poids du groupe d'essieux le plus chargé	0,503	0,774	0,728	0,660	0,597	0,429
	Nombre de groupes d'essieux	-0,487	-0,217	-0,034	0,094	0,190	0,435
	Nombre d'essieux	-0,059	0,228	0,421	0,565	0,656	0,803
	Charge moyenne par essieux	0,285	0,285	0,234	0,174	0,116	0,007
	Charge moyenne par groupe d'essieux	0,532	0,743	0,782	0,814	0,804	0,696

Tableau 24 : Matrice de corrélation entre les variables (Efforts tranchants maximaux pour ponts à trois travées)

Il n'y a pas de relation linéaire entre les effets maximaux (efforts tranchants et moments fléchissants) et la longueur totale des véhicules. Cependant la longueur totale des PL entre en compte étant donné que la charge uniformément répartie des PL joue un rôle linéaire assez fort, notamment pour les ponts de courte et moyenne longueur (travées inférieures à 30 mètres). Pour les grandes travées (longueur ≥ 50 m), les effets sont très souvent corrélés au poids total et logiquement au nombre d'essieux. Cela souligne un certain intérêt de mettre au point une *Bridge Formula* en Europe (voir pour cela, la section 5).

Voici un tableau récapitulatif des « agressivités » relatives moyennes de chaque silhouette de l'étude en fonction de la longueur des travées :

- Les courtes travées sont les travées de longueur inférieure ou égale à 10 mètres ;
- Les travées moyennes sont celles comprises entre 10 et 50 mètres ;
- Les grandes travées sont les travées de longueur supérieure à 50 mètres.

PL	Silhouette	Effets extrêmes relatifs		
		Courtes travées	Travées moyennes	Grandes travées
PL référence UE		1,000	1,000	1,000
Belgium 1		0,907	0,943	0,966
Belgium 2		1,006	1,262	1,413
Canada 1		0,913	0,820	0,927
Canada 2		1,052	0,950	1,083
Canada 3		1,164	1,431	1,516
Canada 4		0,975	0,936	1,259
Denmark 1		1,154	1,106	1,103
Denmark 2		0,958	1,118	1,172
Denmark 3		1,117	1,164	1,188
Denmark 4		1,070	1,261	1,412
Denmark 5		1,023	1,178	1,380
Europe 1		1,010	0,941	0,947
Europe 2		0,990	0,980	0,992
Europe 3		0,859	0,946	0,982
Europe 4		0,828	0,952	0,981
Germany 1		0,842	0,909	0,966
Netherlands 1		0,859	1,048	1,178
Netherlands 2		1,050	1,276	1,422
Netherlands 3		1,140	1,265	1,417
United Kingdom 1		1,085	1,087	1,095

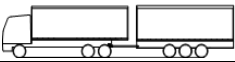
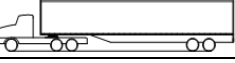
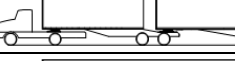
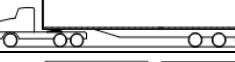

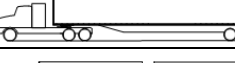
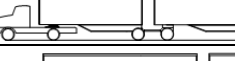

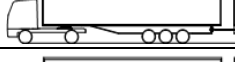


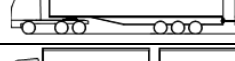
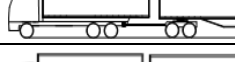

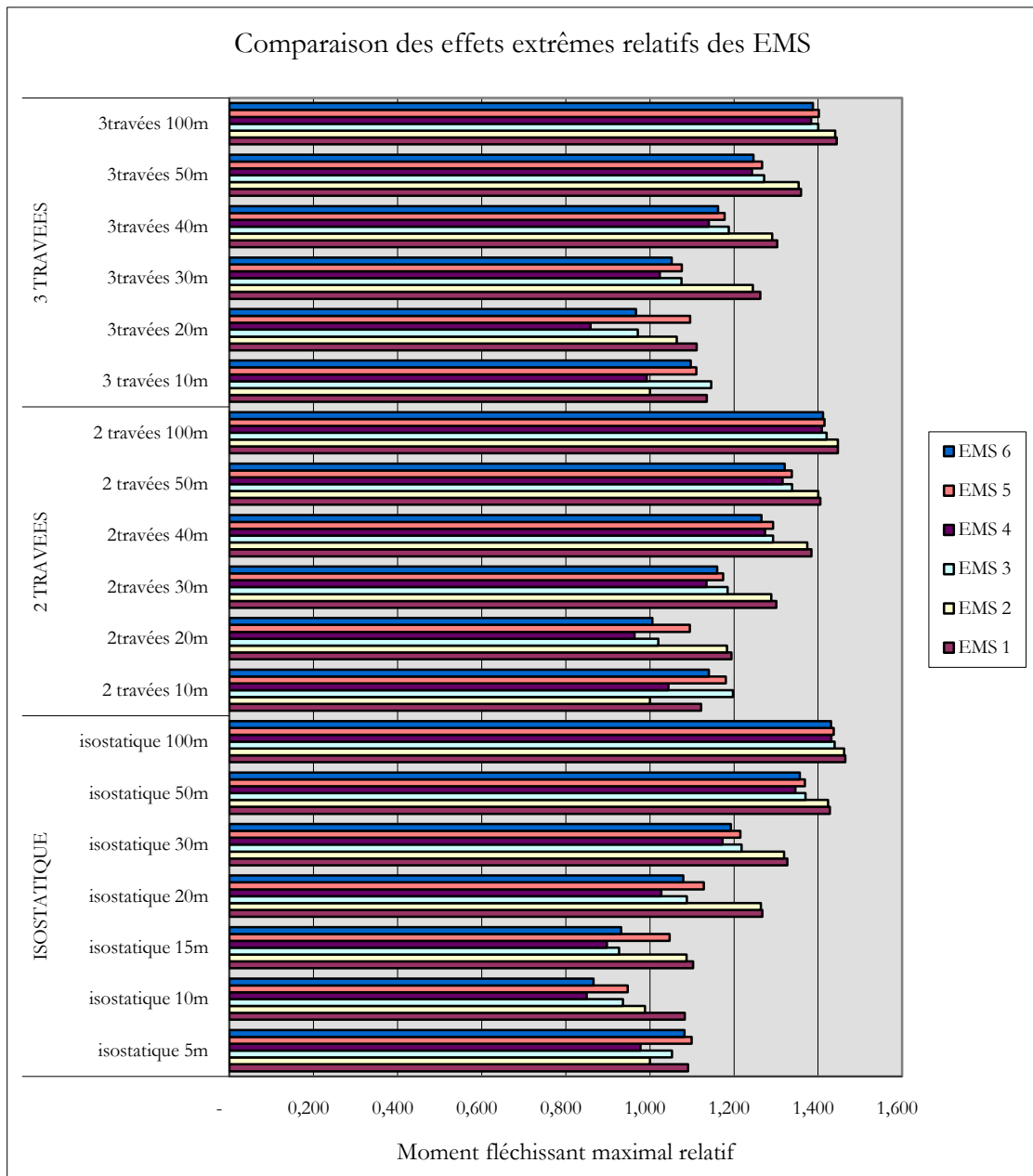
United Kingdom 2		0,950	1,022	1,074
United States 1		0,802	0,769	0,860
United States 2		0,650	0,789	0,862
United States 3		0,948	0,921	0,999
United States 4		0,648	0,787	0,862
United States 5		1,020	0,814	0,974
United States 6		0,721	0,953	1,190
United States 7		0,922	0,995	1,246
EMS 1		1,077	1,340	1,443
EMS 2		1,088	1,339	1,442
EMS 3		1,011	1,246	1,408
EMS 4		0,994	1,208	1,397
EMS 5		1,077	1,255	1,412
EMS 6		1,033	1,247	1,408

Tableau 25 : Agressivité relative des PL de l'étude

Afin de pouvoir évaluer l'impact de l'introduction des EMS dans le trafic, les différentes silhouettes ont été classées selon leur « agressivité ». Ce classement s'est notamment appuyé sur une comparaison des effets extrêmes relatifs (par rapport au poids lourd de référence) :



Comparaison des moments fléchissants maximaux relatifs des EMS (1 pour PL de référence)

Figure 4.2 : Histogramme des moments fléchissants maximaux relatifs à mi-travée

Il est notable que plus les longueurs de travées sont importantes et plus les silhouettes de poids lourds se différencient. Cette simple comparaison étayée par les résultats similaires pour les efforts tranchants, offre le classement suivant (du plus agressif au moins agressif) :

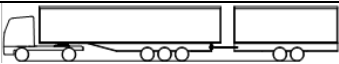
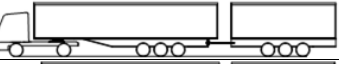
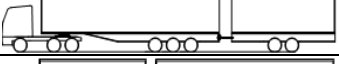
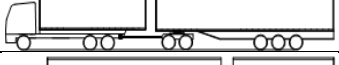

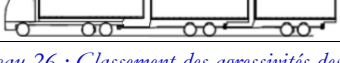
	Silhouette	Classement
EMS 1		1
EMS 2		2
EMS 3		4
EMS 4		6
EMS 5		3
EMS 6		5

Tableau 26 : Classement des agressivités des EMS de l'étude

Les silhouettes d'EMS les plus « agressives » sont celles avec un nombre plus faible d'essieux. La silhouette la moins « aggressive » étant celle avec 9 essieux. Etant donné que les silhouettes d'EMS possèdent le même PTRR de 60 tonnes, il est intéressant de voir là le rôle du nombre d'essieux.

4.2.1.1 Recommandations

Les analyses des corrélations tendent à montrer que pour les ponts de courtes travées, ce sont les poids par essieu qui sont primordiaux et notamment le poids du groupe d'essieux le plus chargé. Ceci est cohérent avec le fait que l'ensemble des essieux du véhicule ne peuvent pas être simultanément sur le pont pour de courtes longueurs. Les EMS sont soumis aux mêmes réglementations que les PL en termes de charges maximales à l'essieu. De ce constat, il résulte qu'il n'est pas nécessaire de restreindre davantage ces charges admissibles. D'autre part, pour les travées moyennes à longues, le poids total et le nombre d'essieux (lui-même relié au poids total comme nous l'avons vu) sont les principaux facteurs qui influencent la valeur des effets extrêmes. L'augmentation du poids total du véhicule doit nécessairement être accompagnée par une augmentation du nombre d'essieux. En reprenant les limites de charges à l'essieu, comme la charge maximale admissible pour un essieu est d'au plus 10 tonnes (en occultant le cas particulier de l'essieu isolé moteur), un poids lourd de 40 tonnes doit nécessairement avoir au moins 4 essieux. De même, un EMS de 60 tonnes doit posséder au minimum 6 essieux.

Alors que les EMS génèrent des effets extrêmes 10% supérieurs en moyenne au poids lourd de référence pour les ponts à courtes travées, les effets engendrés sont de 40 à 45% supérieurs en moyenne pour les ponts à longues travées. Il serait intéressant de savoir l'importance des effets extrêmes dus au passage de convois exceptionnels (grumiers, grues ou porte-engins blindés par exemple) afin de déterminer dans quelle mesure les EMS se montrent particulièrement agressifs.

Il est intéressant de se pencher désormais sur une comparaison entre groupes de PL du trafic et les groupes d'EMS correspondants à la combinaison des PL du trafic.

4.2.2 Groupes de véhicules

4.2.2.1 Présentation

Des comparaisons entre les groupes de poids lourds et les groupes d'EMS ont été réalisées. Les groupes étudiés correspondent aux groupes présentés précédemment (voir section 3.1.4). Les calculs ont été menés pour différentes interdistances c'est-à-dire pour différentes longueurs intervéhiculaires. Il s'agit de la distance entre le dernier essieu du véhicule meneur et le premier essieu du véhicule suiveur. Les interdistances retenues sont :

- Interdistance de 5 mètres, correspondant à un trafic congestionné ;
- Interdistance de 20 mètres afin d'obtenir un cas « intermédiaire » ;
- Interdistance de 50 mètres, correspondant au contraire à un trafic fluide. Il s'agit en effet de la distance de sécurité pour une circulation à 90 km/h (soit la vitesse maximale autorisée pour les poids lourds).

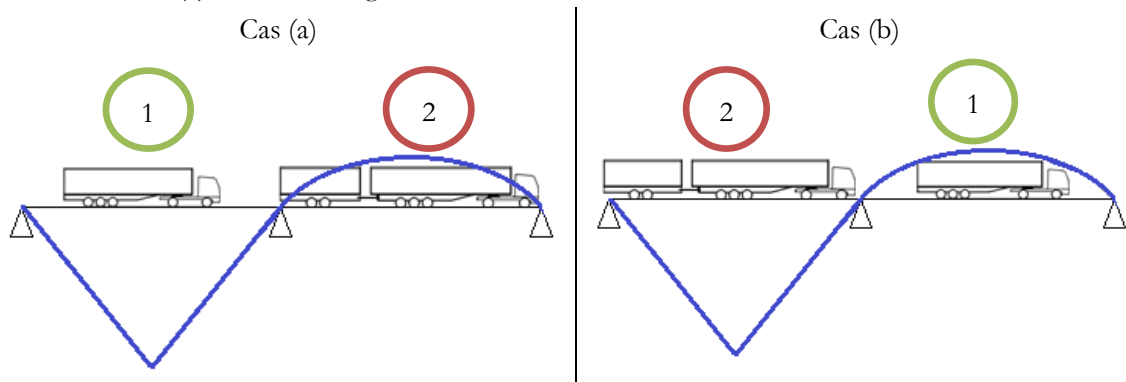
La distance de sécurité d_s correspond à la distance parcourue (en mètres) par le véhicule en 2 secondes à la vitesse V (en km/h). Cette distance d_s est égale à : $d_s = 2 \cdot V / 3,6 = 0,56 \cdot V$.

Vitesse	20 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h
Distance de sécurité	12 mètres	28 mètres	40 mètres	50,4 mètres

Tableau 27 : Valeurs de quelques distances de sécurité en fonction de la vitesse

Il a été nécessaire de choisir l'ordre de succession des véhicules sur les ponts car cela a son importance sur la valeur de l'effet extrême. Etant donné le temps imparti pour l'étude, tous les cas de figure ne pouvaient être examinés. Seules les combinaisons susceptibles d'être les plus « agressives » ont été conservées.

Prenons l'exemple suivant de deux poids lourds avec (1) un poids lourd classique de type T2S3 de 40 tonnes et (2) un EMS chargé à 60 tonnes :



Comparaison de deux cas de charge selon l'ordre de passage des véhicules

Figure 4.3 : Illustration des moments fléchissants maximaux relatifs à mi-travée

En choisissant la ligne d'influence du moment fléchissant à mi-travée d'un pont à 2 travées, il apparaît que l'ordre de passage des poids lourds peut influencer la valeur extrême de l'effet. Sur cet exemple, l'effet extrême le plus intéressant (c'est-à-dire le moment fléchissant minimal) sera engendré dans le cas (b) où le véhicule le plus lourd (2) est situé sur le « pic » de la ligne d'influence. Le fichier de trafic POLLUX sera donc organisé de telle sorte que le véhicule (2) précède le véhicule (1).

L'étude a été menée avec POLLUX pour les configurations de pont retenues et selon les différentes longueurs de travées. Dans un premier temps, il était intéressant de comparer les effets extrêmes entre eux, en prenant un groupe de référence. Voici les groupes étudiés :

- « workhorses 1 » composé de deux poids lourds T2S3 et d'un T3R2 ;
- « workhorses 2 » composé de deux poids lourds T2S3 et d'un T3R3 ;
- « workhorses 3 » composé de deux poids lourds T3S3 et d'un T3R2 ;
- « workhorses 4 » composé de deux poids lourds T3S3 et d'un T3R3 ;
- « workhorses 5 » composé de trois poids lourds T3R2 ;
- Les groupes d'EMS sont identifiés : « EMS 1 et 5 », « EMS 2 et 5 » etc.

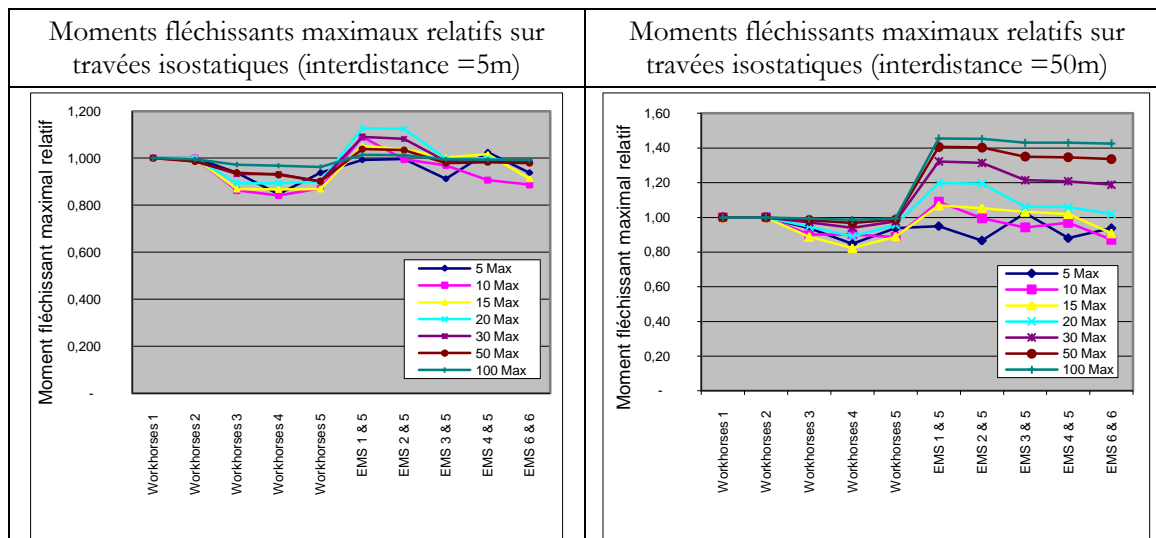
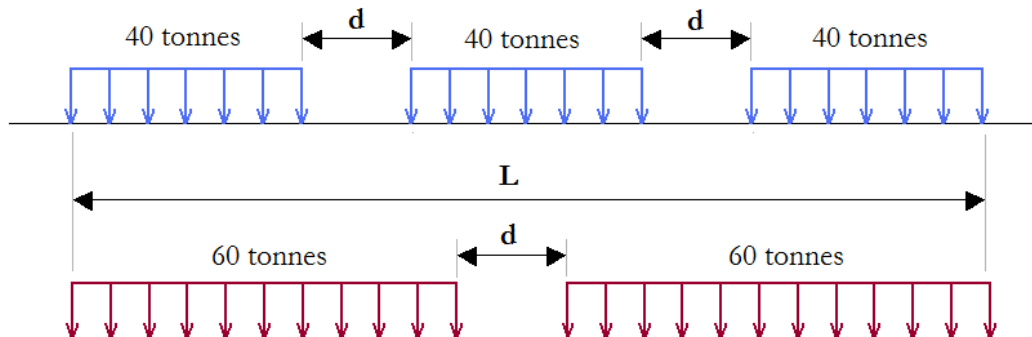


Tableau 28 : Comparaison des effets extrêmes des groupes de PL du trafic et des groupes d'EMS

De ces résultats, deux choses sont à retenir tout particulièrement :

- D'une part, les écarts relatifs entre les différents pelotons de poids lourds et d'EMS sont plus importants lorsque l'interdistance est plus grande. Autrement dit, les effets extrêmes sont plus homogènes (entre pelotons de poids lourds) en configuration congestionnée qu'en configuration fluide. Cela s'explique par le fait que la charge imposée au pont est globalement identique du moment que les charges uniformément réparties des pelotons de poids lourds sont très proches. Sur l'illustration suivante, en supposant une même charge totale transportée, il est intéressant de déterminer l'interdistance d (en mètres) entre véhicules pour que la charge uniformément répartie soit égale entre les deux pelotons de véhicules. Les poids lourds du trafic chargés à 40 tonnes ont une longueur maximale entre essieux de 13 mètres. Pour les EMS chargés à 60 tonnes, cette distance est d'environ 21 mètres. D'où $d = 2*21 - 3*13 = 3$ m. Dans ce cas-là, la charge uniformément répartie des deux pelotons est égale : $q = P/L$ où $P = 120$ tonnes et $L = 2*21+d = 45$ m. Soit $q = 120/45 = 2,67$ tonnes/m. Pour une interdistance de 3 mètres, il est donc possible de considérer que les effets de chaque peloton sont identiques.



Comparaison de deux cas de charge selon les pelotons de poids lourds

Figure 4.4 : Schéma de la configuration de deux pelotons de poids lourds

- D'autre part, les groupes de PL du trafic (nommées « workhorses ») sont moins agressifs que les groupes d'EMS. Ainsi, à masse égale transportée (c'est-à-dire 120 tonnes), les groupes d'EMS génèrent des effets extrêmes plus importants que ceux engendrés par les groupes de PL du trafic. Cela est principalement vrai pour les ponts de moyenne et grande longueur (travée supérieure à 20 mètres), où les effets des pelotons d'EMS peuvent être jusqu'à 50 % supérieurs aux effets du peloton de PL correspondants.

Ces résultats s'avèrent pour les autres effets (moments fléchissants sur appui, efforts tranchants) et pour les autres configurations. Ceci nous permet de réaliser un classement des agressivités des pelotons de poids lourds, du plus agressif (1) au moins agressif (10) :

	Courtes travées (≤ 10 m)	Moyennes travées (entre 10 et 50 m)	Grandes travées (≥ 50 m)
« Workhorses » 1	6	6	6
EMS 1 & 5	1	2	1
« Workhorses » 2	7	7	7
EMS 2 & 5	2	1	2
« Workhorses » 3	8	8	8
EMS 3 & 5	3	3	3
« Workhorses » 4	9	9	9
EMS 4 & 5	4	4	5
« Workhorses » 5	10	10	10
EMS 6 & 6	5	5	4

Tableau 29 : Classement des différents groupes de « workhorses » et d'EMS

Il est tout aussi intéressant de pouvoir déterminer l'influence de l'interdistance sur les effets extrêmes, grâce à ces divers cas de trafic.

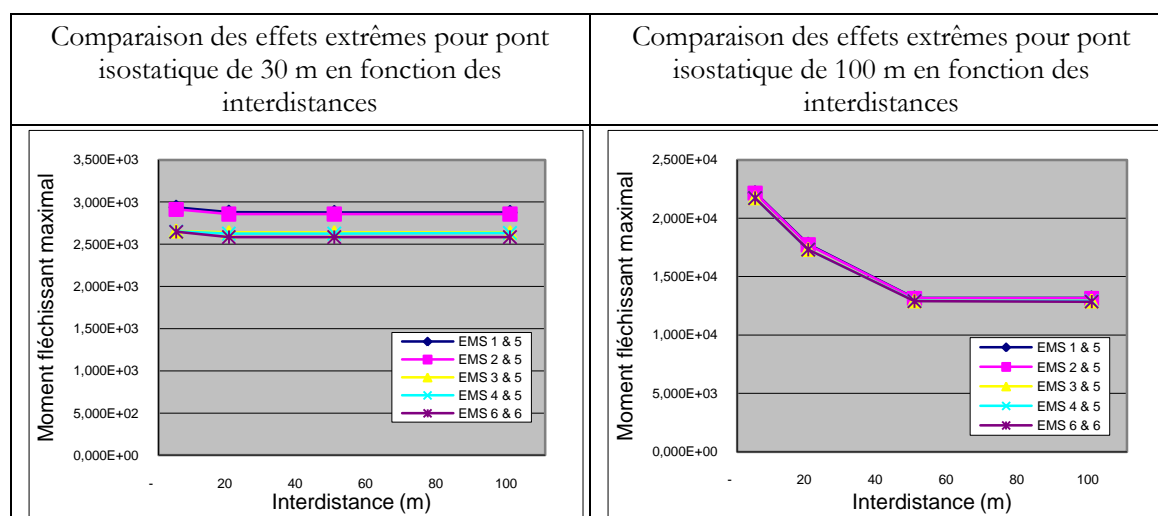


Tableau 30 : Comparaison des effets extrêmes des groupes d'EMS selon les interdistances

Pour les ponts isostatiques, il est clairement visible que l'interdistance ne joue un rôle qu'en deçà d'une certaine valeur. Cette distance correspond *grosso modo* à la longueur du pont.

Pour le premier cas du pont de 30 mètres, pour les interdistances inférieures à 30 mètres, les effets extrêmes décroissent en fonction de l'interdistance. Au-delà de cette valeur, l'effet maximal est constant selon l'interdistance. Cela correspond au cas où les poids lourds qui se suivent, ne peuvent pas être simultanément sur le pont. L'effet extrême du peloton est alors le maximum des effets extrêmes engendrés individuellement par chaque véhicule du peloton.

Cela est plus visible pour le second cas avec un pont isostatique de plus grande longueur. Les effets extrêmes décroissent pour les interdistances inférieures à 50 mètres, puis sont constantes. Dans le cadre de cet exemple, les deux poids lourds peuvent se trouver sur le pont en même temps.

Malgré tout, la forme de la ligne d'influence fait que l'effet maximal demeure l'effet maximal du poids lourds le plus agressif.

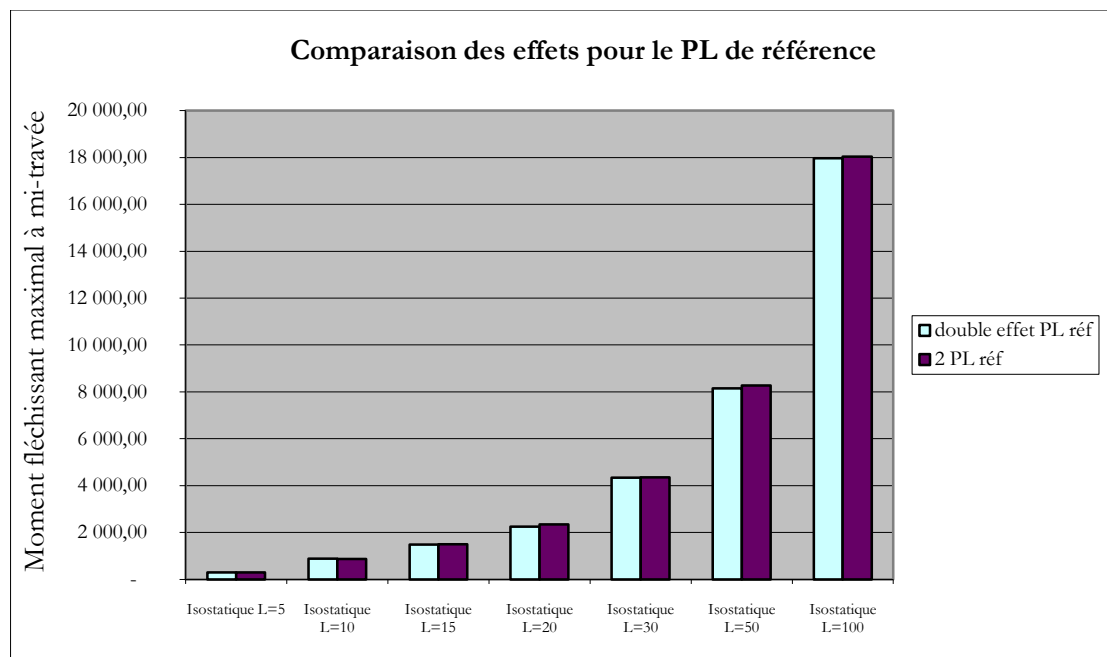
4.2.2.2 Recommandations

Les pelotons d'EMS sont globalement plus agressifs que les pelotons de PL du trafic qui leur correspondent. Le paramètre sur lequel il est possible d'influer afin de réduire l'agressivité des EMS vis-à-vis des PL du trafic, est l'interdistance. En effet, plus l'interdistance entre deux EMS va être importante et plus l'effet aura tendance à décroître en valeur absolue, jusqu'à atteindre une valeur seuil, c'est-à-dire le maximum des effets des véhicules individuels. L'interdistance minimale autorisée peut ainsi être comme un moyen de régulation du trafic sur les ouvrages d'art (voir section 4.4.4).

4.2.3 Cas particuliers : dépassement, croisement

4.2.3.1 Présentation

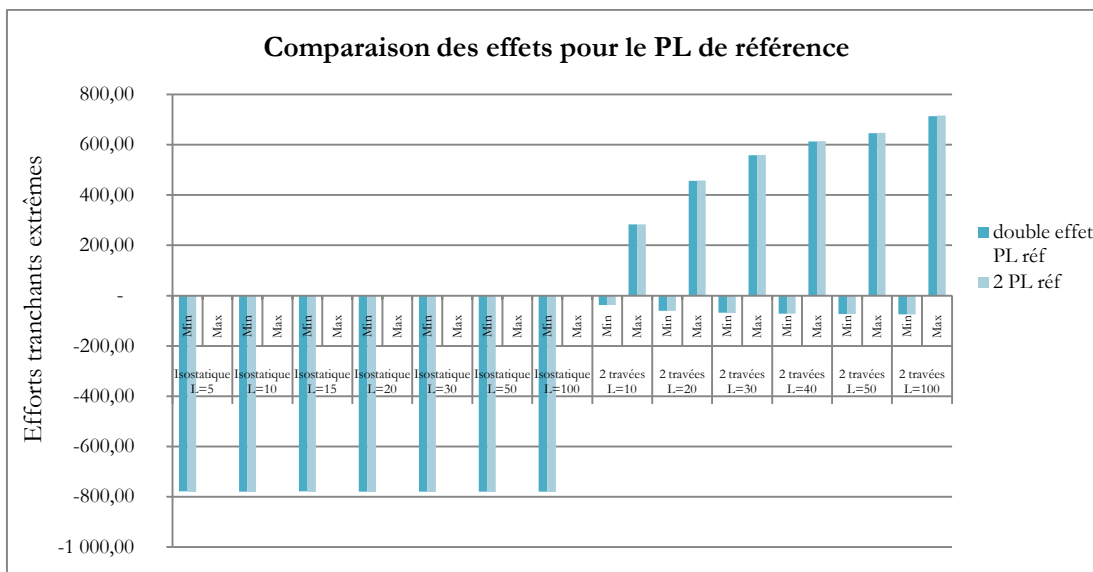
Une étude avait déjà été réalisée auparavant sur des cas particuliers de circulation [TA, 2009]. Elle portait sur la détermination des moments fléchissants extrêmes (moment fléchissant à mi-travée et sur appui) dans le cas du dépassement et du croisement de deux poids lourds. Il en avait été conclu que les effets extrêmes dus aux deux poids lourds équivalent à la somme des effets de chaque poids lourds.



Comparaison des moments fléchissants à mi-travée pour le cas de croisement de PL

Figure 4.5 : Histogramme des moments fléchissants à mi-travée pour ponts isostatiques

Le cas étudié ici porte sur les efforts tranchants causés pour des mêmes configurations de croisement et de dépassement. Le but étant de pouvoir évaluer si le passage de deux poids lourds (qui roulent en sens opposé et qui se croisent à la mi-travée ou qui se déplacent dans le même sens et qui se dépassent à la mi-travée). Cependant, à l'instar de la première étude, les effets dus au passage simultané de deux poids lourds en un point critique (sur appui ou à mi-travée) sont égaux à la somme de chaque effet individuel, pour quel effet que ce soit.

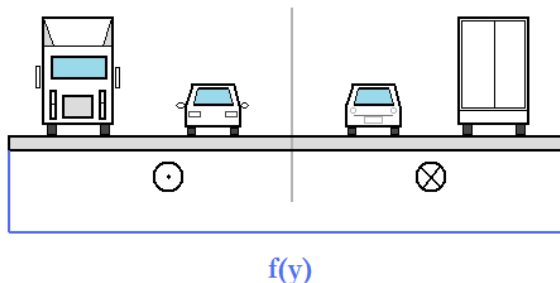


Comparaison des efforts tranchants de deux PL se croisant et du double du même PL

Figure 4.6 : Histogramme des efforts tranchants extrêmes pour ponts isostatiques et à 2 travées

4.2.3.2 Analyse

Les effets extrêmes s'additionnent dans chaque cas de figure : croisement et/ou dépassement. Cela s'explique par le fait que POLLUX considère des lignes d'influence transversales constantes et égales à 1. Il n'y a donc pas de différence entre l'effet d'un poids lourd sur une voie et l'effet d'un second poids lourd (identique au premier) sur une autre voie.



Ligne d'influence transversale $f(y)$ d'un pont à 2*2 voies

Figure 4.7 : Schéma de la ligne d'influence transversale d'un pont

4.2.3.3 Recommandations

Il est important de noter que la détermination des effets extrêmes est réalisée pour des ponts en très bon état de fonctionnement. Cela ne prend donc pas en compte la vétusté des ouvrages d'art. Or, les campagnes IQOA de qualité des ouvrages d'art menées par le SETRA, révèlent que nombre de ponts sont dans des états de services critiques.

Ainsi, selon la nature du pont traversé, son état de service et son ancienneté, il est possible d'introduire des limitations de dépassement de poids lourds afin d'éviter ces cas extrêmes. Le logiciel POLLUX ne permet pas d'obtenir de différenciation selon les caractéristiques des ponts. Cependant, force est de constater que les événements où les EMS se croiseraient en des points critiques du pont (comme au milieu pour un pont isostatique) auraient une probabilité d'apparition extrêmement faible.

4.3 Etude de trafics incluant les EMS

L'intérêt de l'étude réside dans son application au trafic réel. En effet, les cas où les poids lourds (ou EMS) seront seuls sur les ponts, n'ont qu'une valeur indicative. Il est important de pouvoir déterminer l'impact de l'introduction des EMS dans le trafic réel. Cela peut permettre d'évaluer l'importance de la majoration des efforts extrêmes imposés ou encore de la réduction de la durée de vie des ouvrages. Le rôle de l'interdistance sera également mesuré afin de pouvoir imaginer des stratégies de gestion du trafic poids lourds avec EMS.

4.3.1 Modification des fichiers de trafic

4.3.1.1 Introduction d'EMS

Nous disposons de fichiers de trafic réel. Ces fichiers sont issus des stations de pesage implantées sur le réseau routier français. En pratique, l'effet de l'autorisation des EMS dans le trafic doit être évalué. Il faut donc déterminer au sein du trafic donné quels sont les PL qui peuvent se combiner puis les remplacer en nombre suffisant par des EMS et calculer grâce à POLLUX, les efforts extrêmes de chaque trafic pour les comparer. Afin de simuler l'introduction d'EMS dans la circulation, plusieurs hypothèses doivent être prises. Cela concerne par exemple la part d'EMS dans le trafic poids lourds total. Nous avons choisi de paramétrer notre algorithme selon le pourcentage d'EMS réellement introduits dans le trafic par rapport au nombre total d'EMS qu'il serait possible d'engendrer. Il nous faut spécifier les caractéristiques des EMS mais il est important de préciser les caractéristiques des PL qui en sont à l'origine. C'est pourquoi l'étape précédente de sélection de poids lourds du trafic est une étape clé.

4.3.1.2 Principe de modification

En fonction de la part d'EMS que l'on souhaite introduire dans le trafic, plusieurs PL doivent être sélectionnés dans le trafic. Cette sélection s'opère selon :

- Le poids des véhicules : cette première condition permet de ne conserver que les véhicules dont le poids total est suffisamment élevé afin de pouvoir considérer une recombinaison sous forme d'EMS.
- Les catégories des poids lourds : cette seconde condition s'explique par le fait que les EMS proviennent de recombinaisons d'un nombre limité de silhouettes de poids lourds. Nous en avons conservé quatre dans le cas de l'étude.
- La voie de circulation : cette troisième condition est nécessaire afin de ne sélectionner que des véhicules qui sont dans la même voie de circulation. Ceci sera capital dans le processus de modification du fichier de trafic réel.
- Les écarts de temps de passage entre PL pouvant se combiner : cette dernière condition permet de respecter une certaine logique car seuls les poids lourds qui se suivent à une « faible » interdistance, seront recombinaisonnés. Dans le cas contraire, si cette condition n'était pas imposée, l'algorithme pourrait combiner des poids lourds circulant à plusieurs heures les uns des autres. Cela ne serait pas cohérent avec la logique d'exploitation des transporteurs routiers.

Il n'y a pas eu de pondération dans l'ordre de ces critères de sélection. Etant donné que la dernière condition (portant sur les écarts de temps de passage au sein d'un groupe de trois PL) s'effectue sur les groupes de PL qui peuvent se combiner, il est logique qu'elle intervienne en dernier lieu. Cependant, les trois premières (sélection du poids, sélection de la voie et sélection des catégories) peuvent être inter-changées.

Selon toute logique, l'ordre des sélections pourrait influencer sur le nombre final d'EMS introduits. Sur l'exemple du trafic du mois de mai 2010 à Loisy dont nous disposons, à tout autre paramètre égal par ailleurs, les six combinaisons possibles de sélection (selon l'ordre des critères dans le

processus de choix) ont fourni les mêmes résultats, à savoir 204 paires d'EMS qu'il serait possible d'introduire. Cela ne suffit cependant pas pour généraliser et l'ordre des sélections devrait être reconsidéré lors des études ultérieures.

4.3.1.3 Algorithme

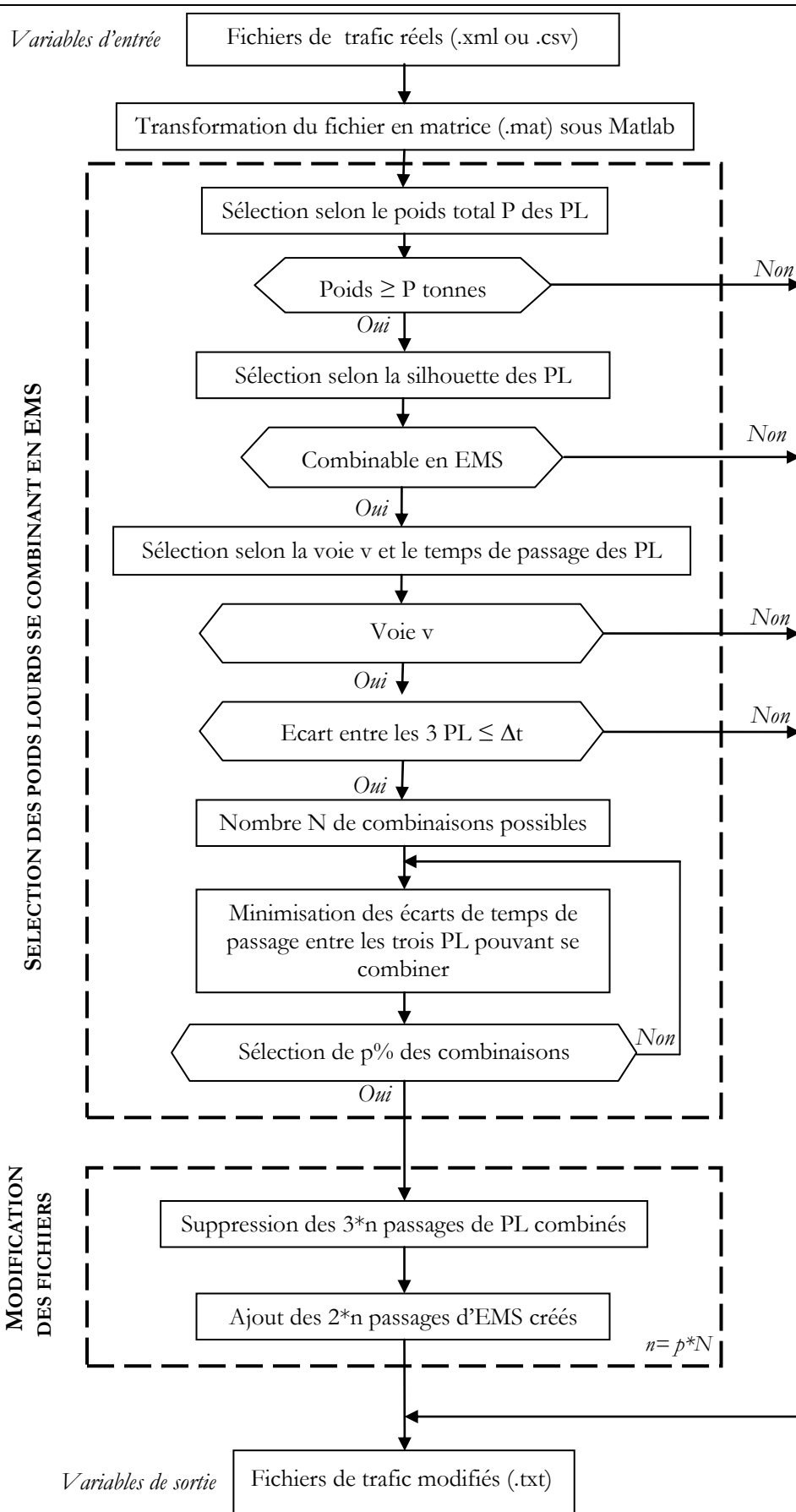
Le modèle repose sur le principe de modification présenté ci-dessus. Dans un premier temps, à partir du fichier de trafic, les poids lourds pouvant se recombinaer, sont sélectionnés. Cela implique les trois conditions vues précédemment :

- Une première sur les catégories des véhicules,
- Une seconde sur la voie de circulation,
- Et une dernière sur les temps d'enregistrement.

Une fois ces poids lourds sélectionnés, l'algorithme stocke le nombre de cas possibles, les poids lourds concernés (c'est-à-dire le numéro de passage) et les silhouettes d'EMS correspondantes. Selon la part d'EMS à introduire, un nombre fini des cas sera conservé.

L'étape suivante consiste à « effacer » du fichier de trafic le passage des PL se combinant. À leur place, sera créé le passage fictif des EMS constitués. Au final, le fichier de trafic modifié et comportant l'enregistrement d'EMS fictifs est obtenu.

Le fonctionnement de l'algorithme est schématisé sur la figure qui suit.



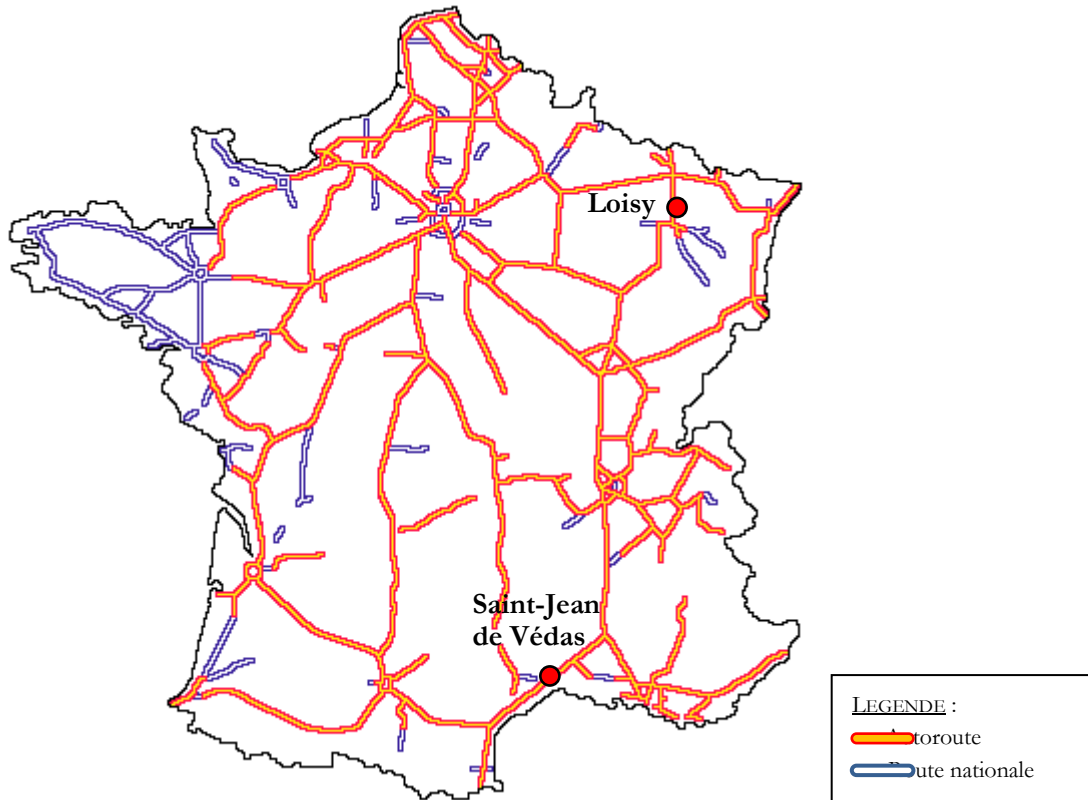
Algorithme de modification des fichiers de trafic

Figure 4.8 : Principe de modification des fichiers de trafic pour l'introduction d'EMS

4.3.2 Calculs sous POLLUX

4.3.2.1 Présentation

L'étude a pu porter sur des données issues des stations de mesures de Loisy (département de la Meurthe-et-Moselle, autoroute A31 Beaune/Luxembourg) et à Saint-Jean-de-Védas (département de l'Hérault, autoroute A9 Le Perthus/Orange). Ce sont des axes qui supportent un fort trafic poids lourds quotidien.

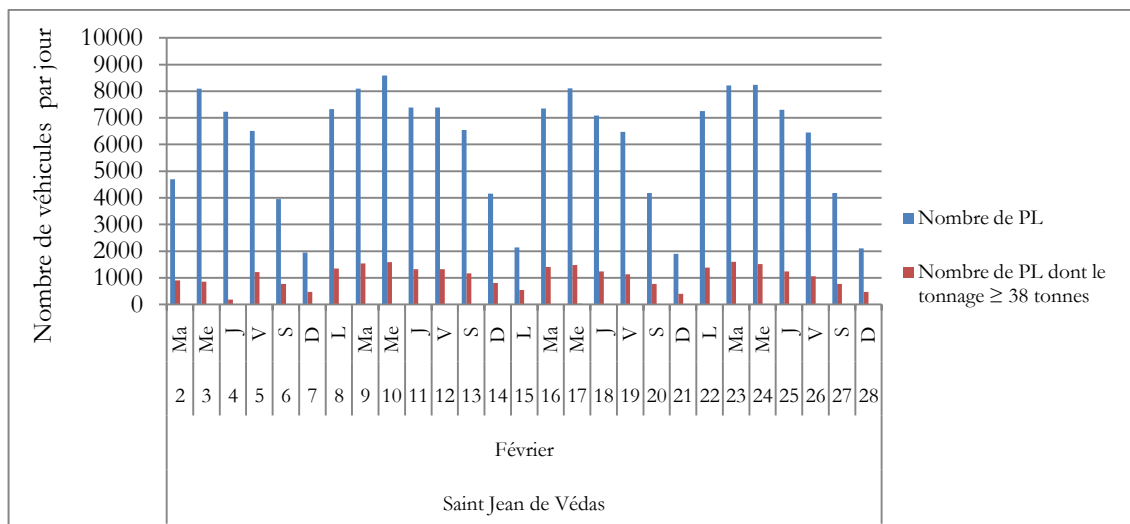


Emplacement des sites de mesures

Figure 4.9 : Carte de présentation des sites de mesure du trafic poids lourds

Pour la station de Loisy, les données de mesure provenaient des mois d'avril et mai 2010. Dans le cas de la station de mesure de Saint-Jean de Védas, nous disposons de mesures de trafics pour les mois de janvier à mai 2010.

Chaque mois de mesure a été analysé afin de déterminer le nombre de PL par jour ainsi que le nombre de PL dont le poids total dépasse 38 tonnes (valeur retenue dans l'algorithme pour l'introduction des EMS dans le trafic). Nous présentons un exemple avec les données issues du mois de février de la station de Saint-Jean de Védas. Pour ce mois-là, un nombre moyen de 6 000 PL par jour a été calculé dont plus de un PL sur six était chargé au-delà de 38 tonnes.



Trafic PL journalier pour le mois de février 2010

Figure 4.10 : Histogrammes du trafic poids lourds au mois de février 2010, station de Saint-Jean de Védas

Il est intéressant de constater la variabilité du trafic selon le jour du mois considéré. Ainsi, les « pics » de trafic se manifestent essentiellement en milieu de semaine, lors des journées du mardi et mercredi. Au contraire les fins de semaine, le trafic poids lourds est beaucoup moins important du fait bien souvent des restrictions de circulation sur les itinéraires autoroutiers.

Le but des calculs sur trafic réel et trafic modifié avec l'introduction d'EMS est de pouvoir déterminer les fluctuations des effets extrêmes dus au trafic selon le pourcentage d'EMS introduits. Pour cela, certains paramètres vont être utilisés afin de considérer différentes situations de trafic. Ces paramètres vont être la vitesse de circulation des véhicules ainsi que les interdistances entre poids lourds. L'étude porte sur les ponts de grande longueur (longueur totale supérieure ou égale à 50 mètres). Il est nécessaire de considérer des ponts de longueur suffisante afin de pouvoir travailler avec des cas où deux EMS peuvent se trouver simultanément sur le pont.

4.3.2.2 Attente théorique

En prenant en compte de simples considérations physiques, il est possible de tracer l'allure des courbes de variation des efforts extrêmes en fonction du pourcentage d'EMS introduits. En effet, le pourcentage d'EMS revient à déterminer le nombre d'application de forces sur le pont considéré.

En voici l'allure :

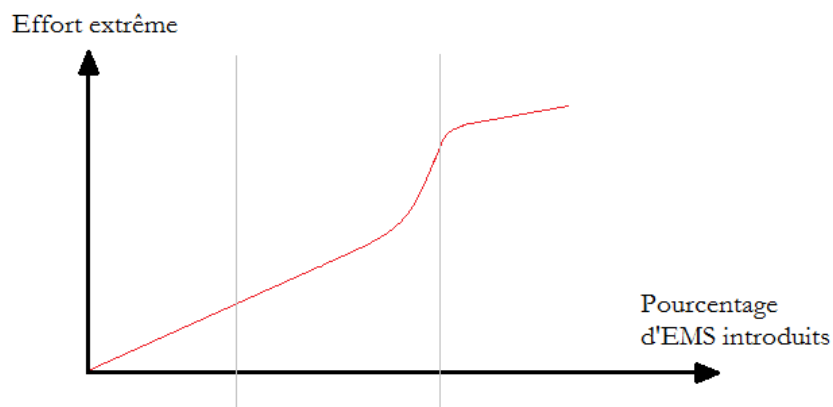


Figure 4.11 : Allure de l'évolution des efforts extrêmes en fonction du pourcentage d'EMS introduits dans le trafic

En-deçà d'un certain pourcentage d'EMS introduits dans le trafic, plus il y a d'EMS et plus les efforts maximaux sont importants. Ces cas de figure correspondent à un trafic fluide pour lequel les poids lourds sont distants l'un de l'autre d'au moins 50 mètres (dans le cas d'une vitesse de circulation limitée à 90 km/h). La relation n'est pas nécessairement linéaire.

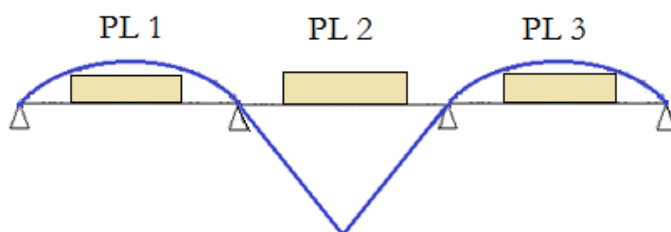
Au-delà, se produit un effet de « saturation » où l'introduction d'EMS n'a plus d'impact sur les effets extrêmes. Cela correspond logiquement au cas où la concentration des EMS sur le pont est maximale. Ce maximum global est obtenu pour des interdistances très faibles et/ou pour un trafic congestionné. Le cas critique serait des EMS statiques sur le pont avec des distances intervéhiculaires de l'ordre de 2 mètres. Cette valeur est déduite des précédents calculs (voir section 4.2.2.1) mais aussi d'observations empiriques ; il s'agit de la distance minimale que peuvent observer les conducteurs de PL lors d'un trafic congestionné ou roulant au pas. Dans ce cas, les forces appliquées au pont peuvent être modélisées par une force uniformément répartie.

Il est intéressant de pouvoir déterminer les effets lorsque les distances entre poids lourds sont intermédiaires c'est-à-dire qu'elles valent entre 15 et 50 mètres. Etant donné que le nombre de poids lourds ne cessent d'augmenter sur les routes, les situations où les distances de sécurité entre PL ne sont respectées, deviennent de plus en plus courantes.

4.3.2.3 Résultats obtenus

Les simulations réalisées n'ont pas toujours permis de trouver un tel résultat pour différentes raisons :

- Les effets extrêmes retournés par le logiciel pour une configuration de pont donnée étaient souvent identiques. En effet, cela correspondait à un seul et même poids lourd qui engendrait dans chaque cas cet effet extrême. En observant attentivement le fichier de trafic réel, il se trouve qu'une vingtaine de poids lourds ont été mesurés avec des poids totaux supérieurs à 60 tonnes. Il s'agit exclusivement de convois exceptionnels pouvant atteindre 90 tonnes sur plus de 8 essieux. Ce sont eux qui génèrent les effets extrêmes. Afin de pouvoir juger réellement l'impact de l'introduction des EMS dans le trafic, une sélection supplémentaire a été ajoutée afin de supprimer les passages de véhicules dont le poids total était supérieur à 50 tonnes.
- Les interdistances testées (30 et 50 mètres) ne permettent pas toujours d'avoir plusieurs EMS sur le pont en même temps. Ou alors les véhicules sont disposés de telle sorte que leurs effets se compensent. Voici une illustration :



Les actions des deux PL 1 et 3 s'opposent à l'action du PL 2. Dans ce cas, les effets extrêmes calculés ne seraient pas aussi importants que si le PL 2 était seul. De ce fait, le pourcentage d'EMS introduits n'importe plus sur la variation des efforts extrêmes engendrés.

Malgré tout, certains résultats approximent la courbe attendue. C'est le cas pour le pont de trois travées avec une longueur de travée principale de 100 mètres. Il semblerait que la saturation intervient au-delà de 50 % d'EMS introduits mais ce nombre paraît déjà être important. Dans le cas du trafic de mai 2010 à Loisy, il est possible d'introduire 204 paires d'EMS. En introduisant jusqu'à

50 % de ces paires, cela fait un total de 204 EMS circulant dans le mois, soit plus de 2 000 passages d'EMS dans l'année.

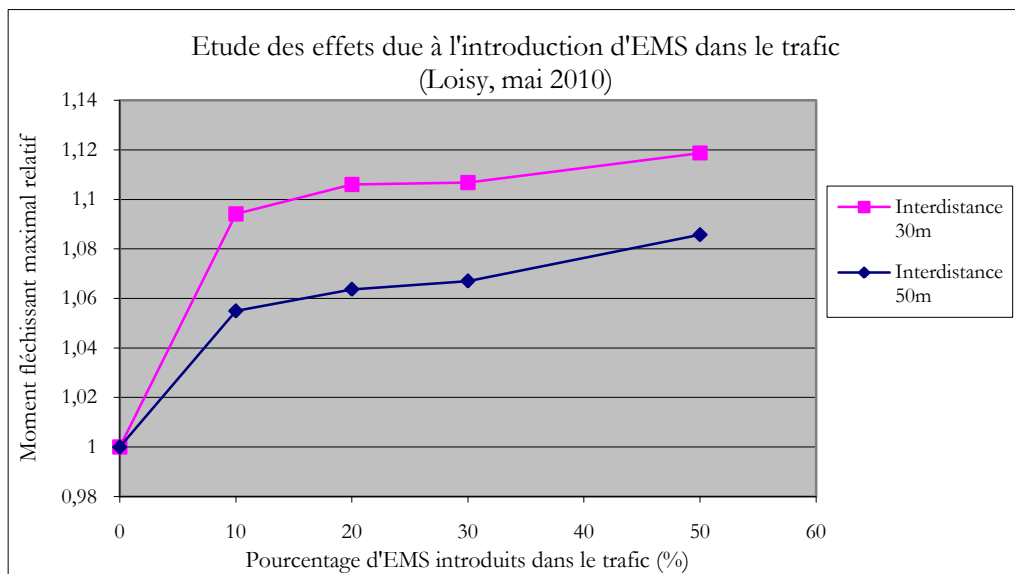


Figure 4.12 : Moment fléchissant maximal relatif en fonction du pourcentage d'EMS introduits

Il est remarquable que l'introduction de 50 % des paires d'EMS n'engendre pas une augmentation des efforts extrêmes de plus de 9 % (pour une interdistance de 50 mètres) et de 12 % (pour une interdistance de 30 mètres), dans le cas d'un pont à trois travées, dont la travée principale mesure 100 mètres.

Il est donc intéressant de retenir que les effets extrêmes ne sont pas nécessairement dus aux passages des EMS. Etant donné que des convois exceptionnels (comme des grues ou des engins militaires) sont amenés à circuler sur les mêmes axes routiers et autoroutiers que les EMS, ce sont eux qui vont engendrer les limites de charges de trafic.

En revanche, les phénomènes de fatigue seront davantage soumis au nombre de passages d'EMS car la fréquence d'apparition sera plus importante dans le trafic que ne le seraient les convois exceptionnels. Dans l'exemple du trafic à Loisy au mois de mai 2010, avec l'hypothèse que 10 % d'EMS sont introduits, on obtenait 20 paires d'EMS pour le mois. Cela fait donc 40 EMS, soit deux fois plus d'EMS que de convois exceptionnels puisque l'on comptait 20 autres véhicules dépassant les 60 tonnes sur ce trafic.

5 FORMULES DE PONT

5.1 Formules existantes

5.1.1 Historique

Les États-Unis ont très tôt développé des « formules de pont » afin de limiter les poids maximaux admissibles par camion. Ces formules ont été élaborées suite à la constatation de la nécessité d'homogénéiser les règles sur les réseaux routiers et autoroutiers, au début du vingtième siècle. En effet, le transport de marchandises connaissait un développement très fort et le nombre de poids lourds en circulation augmentait de façon importante. Cela entraînait une détérioration accrue des chaussées et également des ouvrages d'art. Les seules réglementations qui préexistaient, portaient sur un poids maximal du poids lourd. Une grande campagne d'essai a alors été lancée à la fin des années 1950, désormais connue sous le nom de « AASHO Road Test ». Ces essais menés par l'Association des Gestionnaires d'Autoroutes Nationales avaient pour but de déterminer de manière empirique l'impact des poids lourds sur les chaussées et sur les ponts. En 1964, l'AASHTO a émis des recommandations auprès du Congrès et a proposé qu'une formule de pont accompagnée de sa table de poids maximaux soit utilisée au lieu d'une simple limite de poids brut par camion. La formule de pont a été reconnue et est entrée dans la loi en 1974, avec un « plafond » de poids brut instauré à 80,000 livres (soit 36 000 kg). Cette formule est toujours usitée de nos jours.

5.1.2 Présentation synthétique

Différentes formules ont vu le jour également ; elles sont présentées dans le tableau qui suit. Y sont distinguées les expressions des formules selon les unités américaines (masse M en livres et longueur L en pied¹⁴) et selon les unités du système international (masse M en kilogramme et longueur L en mètre).

Dans le tableau, les formules expriment le poids maximal admissible pour une séquence de N essieux (certaines des formules ne prennent pas en compte ce nombre), comprise dans une longueur L.

¹⁴ Une livre (*pound* en anglais, symbole lb) est l'unité anglo-saxonne de mesure de masse et équivaut à environ 453,6 grammes. Le pied (*foot* au singulier ou *feet* au pluriel en anglais, symbole ft) est l'unité anglo-saxonne de mesure de longueur et représente 30,48 centimètres.

Nom de la formule	Année	Expression en unités US	Expression en unités SI
AASHO, formula A	1946	$M = 1,025 * (L + 24) - 3 * L^2$	$M = 0,46494 * \left(\frac{L}{0,3048} + 24\right) - 0,1465 * L^2$
AASHO, formula B Federal Bridge Gross weight formula	1964	$M = 500 * \left(L * \frac{N}{N-1} + 12 * N + 36\right)$	$M = 0,2268 * \left(3,281 * L * \frac{N}{N-1} + 12 * N + 36\right)$
Ontario Bridge Formula	1977	$M = 20 + 2,07 * B_m - 0,0071 * B_m^2$	$M = 10 + 3 * B_m - 0,0325 * B_m^2$ Où B_m est la longueur équivalente de charge.
TTI, Noel	1985	$M = 1000 * (L + 34)$ pour $L \leq 56$ pieds $M = 1000 * \left(\frac{L}{2} + 62\right)$ pour $L > 56$ <i>pieds</i>	$M = 0,4536 * (3,281 * L + 34)$ pour $L \leq 17$ m $M = 0,4536 * (1,64 * L + 62)$ pour $L > 17$ m
TTI, James	1986	$M = 1000 * (2 * L + 26)$ pour $L \leq 24$ pieds $M = 1000 * \left(\frac{L}{2} + 62\right)$ pour $L > 24$ pieds	$M = 0,4536 * (6,562 * L + 26)$ pour $L \leq 7,32$ m $M = 0,4536 * (1,64 * L + 62)$ pour $L > 7,32$ m
TTI modifiée, TRB n°225	1990	$M = 1000 * (2 * L + 26)$ pour $L \leq 24$ pieds $M = 1000 * \left(\frac{L}{2} + 62\right)$ pour $24 < L \leq 40$ pieds $M = 1000 * \left(9 * \frac{L}{16} + 72\right)$ pour $L > 40$ <i>pieds</i>	$M = 0,4536 * (6,562 * L + 26)$ pour $L \leq 7,32$ m $M = 0,4536 * (3,281 * L + 62)$ pour $7,32 < L \leq 12,2$ m $M = 0,4536 * (1,85 * L + 72)$ pour $L > 12,2$ m
TTI modifiée, Ghosn et Moses	2000	$M = 1000 * (1,64 * L + 30)$ pour $L \leq 50$ pieds $M = 1000 * (0,8 * L + 72)$ pour $L > 50$ pieds	$M = 0,4536 * (5,38 * L + 30)$ pour $L \leq 15,2$ m $M = 0,4536 * (2,62 * L + 72)$ pour $L > 15,2$ m
FBF modifiée, Kurt	2000	$M = 1000 * \left(0,5 * L * \frac{N}{N-1} + 3 * N + C4\right)$	$M = 0,4536 * \left(1,64 * L * \frac{N}{N-1} + 3 * N + C4\right)$ Où C_4 est une constante de surcharge.

Tableau 31 : Récapitulatif des formules de pont existantes

La constante C4 est déterminée afin de minimiser les cas de surcharge des ponts du réseau routier américain. Dans [KURT, 2000], il est proposé de choisir C4 égal à 33 afin de couvrir 95 % des ponts, équivalent à dire que 5 % des ponts peuvent être surchargés par les poids lourds.

La formule de pont développée par la province d'Ontario (Canada) fait intervenir une notion différente des autres formules présentées ci-dessus. En effet, elle introduit la longueur de base équivalente qui correspond en réalité à la longueur du chargement en prenant comme hypothèse que le poids lourd est modélisé en une charge uniformément répartie (et non pas par N efforts ponctuels correspondant à chacun des i essieux). Nous en donnons ici l'expression mathématique :

$$B_m = \frac{4}{W} * \sum_i (x_i * P_i) - 2 * \frac{N - 1}{N * b * W^2} * \left(\sum_i (x_i * P_i) \right)^2$$

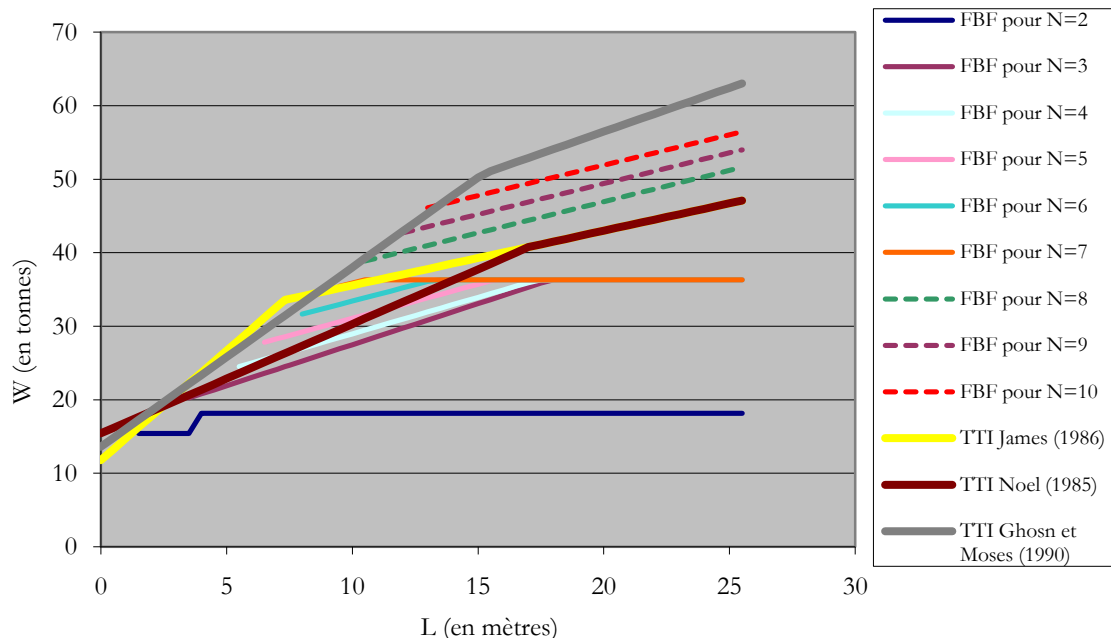
Où

- N = nombre d'essieux
- W = poids total (kN)
- b = longueur totale du camion
- x_i = distance entre essieu i et centre de gravité (m)
- P_i = charge sur l'essieu i (kN)

A l'image de la formule développée au Texas Transportation Institute (TTI), d'autres formules s'appuient simplement sur une relation linéaire entre la longueur L du véhicule (distance entre les deux essieux extrêmes) et le poids maximal autorisé. C'est par exemple le cas en Afrique du Sud où la limitation s'appuie sur la formule de pont suivante : $W = (21 * L) + 18$ où L est exprimée en mètres et W en tonnes.

Une simple comparaison graphique des valeurs limites données par les différentes « bridge formulas » a été réalisée.

Comparaison globale des différentes "bridge formulae"



Comparaison des poids maximaux donnés par différentes formules de ponts

Figure 5.1 : Graphique des valeurs de poids limites selon la longueur du véhicule

Cette comparaison permet de mettre en avant la grande rigidité de la FBF ou formula B avec un plafond à 36 tonnes. Ainsi, les poids lourds les plus répandus en France (c'est-à-dire les T2S3) de 5 essieux et de 12,5 mètres de long (distance entre les deux essieux extrêmes) seraient limités à 32

tonnes. Or ils sont actuellement autorisés de rouler avec un PTAC de 40 tonnes, soit 25% de charge en plus. Ce gain de productivité ne se fait pas au détriment de la durée de vie des ouvrages car ceux-ci prennent déjà en compte les PL de 40 tonnes.

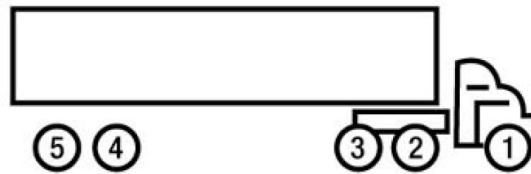
Concernant les EMS sur 8 ou 9 essieux, les différences entre formules sont très importantes. Les formules de NOEL et celle de JAMES dérivées de la formule du Texas Transportation Institute n'autoriseraient que 48 tonnes pour les EMS de 25,25 mètres de long. En supprimant la limite plafond de 36 tonnes, la Federal Bridge Formula permettrait aux EMS d'être chargés à 55 tonnes au maximum. Seule la formule de GHOSN et MOSES donne une valeur maximale supérieure à 60 tonnes.

5.1.3 Commentaires

Nous nous sommes particulièrement attachés à travailler autour de la formule fédérale qui est en vigueur aux États-Unis. Nous avons donc cherché à comprendre la conception même de la formule afin de pouvoir la transformer en une formule utilisable dans le cadre français voir européen. L'origine des coefficients de la formule fédérale n'est pas réellement explicite. Selon les écrits de [JAMES, 1986], il s'agirait de ratios de tolérance vis-à-vis des types de ponts utilisés aux États-Unis. Mais aucun écrit officiel du Ministère des Transports américain ne permet de l'attester.

5.2 Méthodologies

Nous présentons brièvement la méthode concernant l'utilisation de la « Federal Bridge Formula » ou « formula B ». Cette formule de pont fait loi dans de nombreux États anglo-saxons. Celle-ci s'appuie sur un modèle de poids lourd américain à 5 essieux présenté ci-dessous.



Modèle de poids lourd américain

Figure 5.2 : Schéma de poids lourd américain

Source : http://ops.fhwa.dot.gov/freight/publications/brdg_frm_wghts/bridge_formula_all.pdf

Il est alors nécessaire de vérifier si le poids total du véhicule ne dépasse pas la valeur maximale de 80,000 livres (=36,3 tonnes), si le poids total par essieu simple ne dépasse pas 20,000 livres (=9 tonnes) et par essieu tandem, s'il ne dépasse pas 34 000 livres (=15,4 tonnes).

Ensuite, vérifier si les configurations 1 à 3 (correspondant aux essieux sous le tracteur), 1 à 5 (véhicule entier) et 2 à 5 (correspondant aux essieux sous la semi-remorque) respectent les valeurs de la Federal Bridge Formula. Il s'agit alors de comparer le poids total sur ces séries d'essieux au poids maximal admis selon la formule :

$$M = 500 * (L * \frac{N}{N - 1} + 12 * N + 36)$$

On conclut quant à l'adéquation de la configuration du véhicule à la formule en étudiant les trois séquences respectent elles-mêmes la formule. En effet, si ces séquences sont approuvées, l'ensemble des combinaisons respecte les valeurs de la Federal Bridge Formula.

5.3 Remarques

Il est remarquable qu'aucune formule de pont n'ait été développée dans les pays européens. Cela peut s'expliquer en partie par les différences des silhouettes des poids lourds (les États-Unis ont autorisé très tôt des poids lourds plus longs et plus lourds que les habituels 40 tonnes qui circulent par exemple en Europe), par les différences dans le dimensionnement des chaussées et des ouvrages d'art et surtout des différences entre les types de ponts.

5.4 Propositions

Sans avoir de plus amples renseignements sur la méthode utilisée afin de parvenir aux calculs des différents coefficients de la formule de pont fédérale américaine, il n'est pas aisé de pouvoir retranscrire cette méthode sur les caractéristiques des poids lourds et des ponts en France. Malgré tout, parmi les diverses formules modifiant la formule de pont fédérale, la formule de pont proposée par certains chercheurs de l'Université du Texas a été basée sur les caractéristiques propres des ponts. En effet, en partant des méthodes de dimensionnement des ponts du réseau national américain, ils ont déterminé les charges uniformément réparties qu'il est nécessaire d'appliquer pour dépasser les normes de dimensionnement des ponts. Ces charges uniformément distribuées ont ainsi été tracées en fonction de la longueur des travées et du type de pont (ou plus exactement du type de dimensionnement). A partir de ces courbes, les scientifiques américains ont réalisé des portions linéaires permettant de « couvrir » les cas de surcharge ; les équations des segments de droite donnent alors lieu à l'expression de la formule de pont.

A l'instar de cette méthode, il serait possible d'établir une formule de pont construite autour des caractéristiques des ponts français. Il serait judicieux de chercher à minimiser les cas de surcharge de pont en déterminant les cas où les poids lourds dépassent les valeurs prescrites par les normes de dimensionnement pour différents ponts.

CONCLUSION

Le développement important que connaît le transport routier de marchandises est la source de nombreuses inquiétudes. Etant un vecteur de l'économie des pays, le transport de fret engendre un trafic lourd de plus en plus dense sur les axes routiers en Europe et il est devenu un véritable enjeu. La hausse des échanges par la route induit des niveaux de congestion de plus en plus élevés sur les infrastructures. De plus, l'accidentologie semble accrue. En outre, le transport routier est source de bruit, d'émissions polluantes dont les émissions de gaz à effet de serre, le transport étant actuellement la seconde principale source émettrice de CO₂. Afin de pallier à tous ces désagréments, certains pays européens ont développé un nouveau concept de poids lourd. Il s'agit de recombinaison d'unités de poids lourds conventionnels, formant ainsi un ensemble plus long et pouvant transporter plus de marchandises. Ces ensembles modulaires sont appelés EMS pour European Modular System. L'introduction de ces véhicules à travers toute l'Europe et notamment en France est le sujet de nombreux débats animés auxquels doivent répondre les politiques publiques. Pour cela, il est important de s'appuyer sur des dossiers techniques qui analysent les effets qu'auraient ces combinaisons sur les infrastructures routières. Ainsi, l'objet de cette étude était de déterminer l'impact des EMS sur les ouvrages d'art.

Plusieurs études antérieures avaient portées sur ce point-là. Il s'agissait donc d'analyser les résultats obtenus, de pouvoir les corrélérer avec d'autres simulations, puis de prolonger les calculs afin d'étudier l'influence des EMS lorsqu'ils sont introduits dans un trafic global. Avant cela, il a été nécessaire de choisir les silhouettes d'EMS qui seraient les plus probables sur le réseau français, si les EMS venaient à être autorisés. Ce choix s'est réalisé à partir des données de composition du trafic actuel car ce sont les PL actuels les plus fréquents qui doivent se combiner pour former les EMS. La répartition du chargement sur les essieux du véhicule a également été déterminée dans chaque cas afin de répondre aux normes en vigueur en France et en Europe. Afin de calculer les effets extrêmes des EMS sur les ouvrages d'art, il a été nécessaire de sélectionner des configurations simplifiées de ponts. Ces configurations diffèrent par le nombre d'appuis de la structure et par la longueur des travées. Par chaque cas et pour chaque véhicule, les efforts maximaux et minimaux ont été déterminés grâce au logiciel de calcul POLLUX-LCPC.

Il apparaît que certains paramètres jouent des rôles critiques sur les effets extrêmes. C'est notamment le cas du poids du groupe d'essieux le plus chargé qui semble diriger les effets extrêmes pour les ponts à courtes travées. Ensuite, la corrélation entre les effets et le poids total ainsi que le nombre d'essieux du véhicule est très forte pour les ponts de moyenne et grande travée. Dans le premier cas, étant donné que les EMS sont soumis aux mêmes limitations de charge que les PL lourds actuels, il ne semble pas nécessaire d'imposer de nouvelles restrictions. Dans le second cas, il est opportun de lier la hausse du poids total du véhicule avec l'augmentation du nombre d'essieux. Ainsi, pour les EMS de 60 tonnes, le nombre d'essieux doit être *a minima* de 7 essieux.

La comparaison des groupes de PL avec les groupes d'EMS qui y correspondent, a révélé que les groupes d'EMS sont globalement plus agressifs. Afin de limiter cette augmentation des effets extrêmes, l'interdistance entre les véhicules paraît être un excellent moyen de régulation. En effet, les effets diminuent lorsque l'interdistance augmente, avant d'atteindre un minima. Il est proposé d'imposer des interdistances au moins égales à la longueur de la travée principale du pont. Des études complémentaires doivent être réalisées en tenant compte de l'état des ponts ainsi que de leur vétusté.

L'introduction des EMS dans le trafic engendre une augmentation des effets extrêmes. Cependant, cette hausse reste limitée et ne s'applique que dans certains cas de ponts où la configuration et la longueur des travées permettent la présence simultanée de plusieurs EMS. Cela permet de souligner que l'interdistance demeure un important moyen de gestion du trafic poids lourds. En imposant une interdistance au moins égale à la longueur de la travée maximale du pont, il est vraisemblable que les effets extrêmes ne varieraient pas de plus de 5 %. Il est important que retenir que le passage des EMS ne se révèle pas être plus agressif que le passage des convois

exceptionnels pouvant atteindre plus de 80 tonnes. L'impact des EMS serait plus préjudiciable en termes de réduction de la durée de vie des ouvrages, étant donné que la fréquence d'apparition des EMS sur le pont serait plus élevée que celle des convois exceptionnels.

Il conviendrait pour la suite de cette étude de déterminer si les EMS répondent aux exigences de stabilité des ponts existants en France. Pour cela, il serait nécessaire de comparer les forces engendrées par les poids lourds et les EMS aux maxima qui seraient tolérés par les méthodes de dimensionnement des ouvrages d'art. Il serait donc utile de regrouper les normes de projet et les charges de trafic conventionnel qui ont été en vigueur lors de la construction des ponts du réseau français. Cette démarche a été employée en Belgique par le Centre de Recherches Routières (CRR) et a permis de mettre en avant pour chaque type d'EMS et chaque type de pont, les effets extrêmes critiques selon les normes de dimensionnement [VLL, 2007].

De même, l'analyse de l'impact des EMS dans le trafic devrait être étendue à d'autres fichiers de mesure de routes ou d'autoroutes équipées de stations de pesage. En effet, seules deux stations ont été ici étudiées. Cela ne suffit pas pour caractériser l'impact de la libre circulation des EMS pour l'ensemble du réseau routier.

En outre, il y a aussi un fort besoin de développer une formule de pont adaptée au contexte des poids lourds et des ponts français voire européens. L'étude des PL individuels montrent que les véhicules nord-américains ont un excellent comportement pour tout type de configuration de pont par rapport au T2S3 européen de référence. Cependant, une étude précédente [TA, 2009] a révélé que la *Bridge Formula* américaine était inadaptée au contexte français car elle est trop restrictive. En parallèle de l'étude vis-à-vis des normes de stabilité, il serait judicieux de mettre au point une telle formule, qui permettrait d'envelopper les poids lourds actuels et qui serait cohérente avec les nouveaux besoins en termes de PL dans le futur.

Enfin, il est important de rappeler que le présent document ne porte que sur un aspect infrastructurel du problème. Il est nécessaire de recouper les conclusions de ce domaine avec les propositions issues de l'étude sur les chaussées ainsi qu'avec les prérogatives obtenues dans les autres domaines que ce soit la socio-économique, la sécurité routière, le comportement sur route ou encore les enjeux environnementaux liés à ces véhicules.

DEFINITIONS

B-train : terme anglais pour train double et qui désigne l'assemblage de deux remorques tractées par un camion et mesurant plus de 26 m de long. Les deux remorques sont liées par un ensemble articulé porté par trois essieux. Ce type de camions est utilisé dans différents pays du monde, que ce soit l'Australie, le Canada, les États-Unis, le Mexique, l'Afrique du Sud, la Nouvelle Zélande ou certains pays européens comme la Suède ou les Pays-Bas.

Entraxe : distance séparant les axes de deux essieux

Empattement : distance séparant les axes des essieux avant et arrière du véhicule

Largeur de voie : distance entre les roues d'un même essieu

PTAC : poids total autorisé en charge, désigne dans le Code de la route, la masse maximale autorisée pour un véhicule routier. Elle comprend la charge maximale de marchandises (charge utile) ainsi que le poids maximal du chauffeur et de tous les passagers. Cette masse est définie par le constructeur ou l'importateur du véhicule, entre autres caractéristiques présentées lors de l'homologation du véhicule par les autorités compétentes, nécessaire pour que ce véhicule obtienne l'autorisation de circuler sur le réseau routier du pays considéré.

PTC : poids total en charge, désigne la masse effective, soit du véhicule tracteur, soit de la remorque

PTRA : poids total roulant autorisé, désigne la masse maximale autorisée pour un ensemble de véhicules (tracteur + remorques)

Train routier : ensemble routier constitué d'un véhicule tracteur suivi de plusieurs véhicules remorqués se déplaçant sur le sol sans l'aide de rails. Dans le cas de deux véhicules remorqués il est parfois appelé train double ou « B-train ».

GLOSSAIRE

AASHO = American Association of State Highway Officials (Association Américaine des Gestionnaires d'Autoroutes Nationales)

DG/TREN = General Directorate for Transports and Energy (Direction Générale des Transports et de l'Énergie)

EMS = European Modular System (Système Modulaire Européen)

FBF = Federal Bridge Formula (formule fédérale de pont)

GCW = Gross Combination Weight

HCV = Heavy Commercial Vehicle (PTC <70t, L<30m)

IAP = Intelligent Access Program

IQOA = Indice de Qualité des Ouvrages d'Art

LCPC = Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LHV = Longer and/or Heavier Vehicle

LRPC = Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées

PL = Poids Lourd (PTAC>3,5t)

PTC = Poids Total en Charge

PTRA = Poids Total Roulant Autorisé

PTAC = Poids Total Autorisé à Charge

SATL = Système d'Analyse du Trafic Lourd

SETRA = Service d'études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements

TRB = Transportation Research Board

TTI = Texas Transportation Institute

VHCV = Very Heavy Commercial Vehicle (PTC>52 t, L>30m)

UDL = Uniform Distributed Load (charge uniformément répartie)

ANNEXES

Annexe A : Résultats de l'étude DG/TREN [DE CEUSTER, 2008]

Annexe B : Caractéristiques des PL et des EMS pour une charge répartie de 55 tonnes

Annexe C : Données statistiques sur les ponts du réseau routier national non concédé en France, en 2010

Annexe D : Comparaison des lignes d'influence pour différentes configurations de travées

Annexe E : Présentation du logiciel POLLUX

Annexe F : Résultats pour les PL individuels sous POLLUX

ANNEXE A : RESULTATS DE L'ETUDE DG/TREN [DE CEUSTER, 2008]

Source : FINAL REPORT: Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within Directive 96/53/EC, European Commission, 6 November 2008

Caption:




- C = Reinforced and prestressed concrete bridges
- S = Steel and steel-concrete composite bridges
-  = No effect
-  = Moderate effect
-  = Important effect, need of studies on this topic

Table 29: Impact on bridges of 44 tonnes – 5 axles vehicles (16.50 m or 18.75 m)



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C				
	S				
Medium	C				
	S				
Long	C				
	S				

- Configuration possible, but more aggressive than the current configurations and can cause additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening specific to each country.
- Time required to identify the bridges with problems and to take appropriate measures (tonnage limitations, strengthening, etc.).

Table 30: Impact on bridges of 48 tonnes – 5 axles vehicles (16.50 m or 18.75 m)



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C				
	S				
Medium	C				
	S				
Long	C				
	S				

- Configuration to avoid as very aggressive and causing significant additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening specific to each country.
- Requires increasing axle load limits.

Table 31: Impact on bridges of 44 tonnes – 6 axles vehicles (16.50 m)



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C	Green	Yellow	Green	Green
	S	Green	Yellow	Green	Yellow
Medium	C	Green	Yellow	Green	Green
	S	Green	Yellow	Green	Yellow
Long	C	Green	Yellow	Green	Green
	S	Green	Yellow	Green	Green

- Configuration possible, but more aggressive than the current configurations and can cause additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening specific to each country.
- Time necessary to identify bridges with problems and take appropriate measures (tonnage limitations, strengthening, etc.).

Table 32: Impact on bridges of 48 tonnes – 6 axles vehicles (16.50 m)



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C	Green	Red	Green	Green
	S	Green	Red	Yellow	Red
Medium	C	Green	Red	Green	Green
	S	Green	Red	Yellow	Red
Long	C	Green	Red	Green	Green
	S	Green	Red	Yellow	Yellow

- Configuration very aggressive and thus causing additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening specific to each country.
- Important preliminary studies are indispensable before considering an authorization.


Table 33: Impact on bridges of 46 tonnes – 25.25 m vehicles (2-axle tractor)



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C	Green	Green	Green	Green
	S	Green	Green	Green	Green
Medium	C	Green	Green	Green	Green
	S	Green	Green	Green	Green
Long	C	Green	Green	Green	Green
	S	Green	Green	Green	Green

- Configuration bit aggressive and not causing additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening.
- Compliance with the requirement of Article 4.1 of Annex I to Directive 96/53/EC.


Table 34: Impact on bridges of 50 tonnes – (24 m ≤ L ≤ 25.25 m) vehicles – without counter measures



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C	Green	Green	Green	Green
	S	Green	Green	Green	Green
Medium	C	Green	Yellow	Green	Green
	S	Green	Yellow	Green	Green
Long	C	Green	Green	Green	Green
	S	Green	Green	Green	Green

- Configuration bit aggressive and causing few additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening specific to each country.
- Compliance with the requirement of Article 4.1 of Annex I to Directive 96/53/EC
- Minimal spacing between 2 LHV
- Minimal length to impose about 24 meters overall, or minimal wheelbase of about 20 meters

Table 35: Impact on bridges of 60 tonnes – (24 m ≤ L ≤ 25.25 m) vehicles – without counter measures



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C	Green	Yellow	Green	Green
	S	Green	Yellow	Green	Yellow
Medium	C	Green	Red	Green	Green
	S	Green	Red	Green	Red
Long	C	Green	Yellow	Green	Green
	S	Green	Yellow	Green	Yellow

- Aggressive Configuration and causing additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening specific to each country.
- Authorizations limited to specific routes
- Compliance with the requirement of Article 4.1 of Annex I to Directive 96/53/EC
- Minimal length to impose about 24 meters overall, or minimal wheelbase of about 20 meters
- Time necessary to define the routes, to identify the bridges with problems and take appropriate measures (tonnage limitations, strengthening, etc.)
- Respect of the limits on the constituent elements



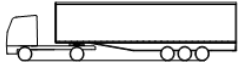



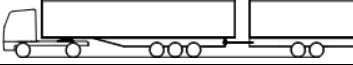


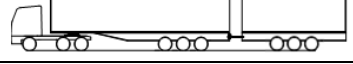
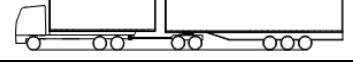

Table 36: Impact on bridges of 60 tonnes – (24 m ≤ L ≤ 25.25 m) vehicles – with counter measures



Spans		Extreme loads		Fatigue	
		Local effects	General effects	Local effects	General effects
Short	C	Green	Green	Green	Green
	S	Green	Green	Green	Green
Medium	C	Green	Yellow	Green	Green
	S	Green	Yellow	Green	Yellow
Long	C	Green	Green	Green	Green
	S	Green	Green	Green	Green

- Configuration moderately aggressive and can cause additional costs of monitoring, of maintenance and preventive strengthening specific to each country
- Accompanying measures effective in limiting the aggressiveness of vehicles (minimal spacing between 2 LHV, no overtaking, on-board load measuring systems, authorizations limited to specific routes, etc.)
- Compliance with the requirement of Article 4.1 of Annex I to Directive 96/53/EC
- Minimal length to impose about 24 meters overall, or minimal wheelbase of about 20 meters
- Respect of limits on the constituent elements
- Time necessary to define the routes, to identify bridges with problems and take appropriate measures (tonnage limitations, strengthening, etc.).

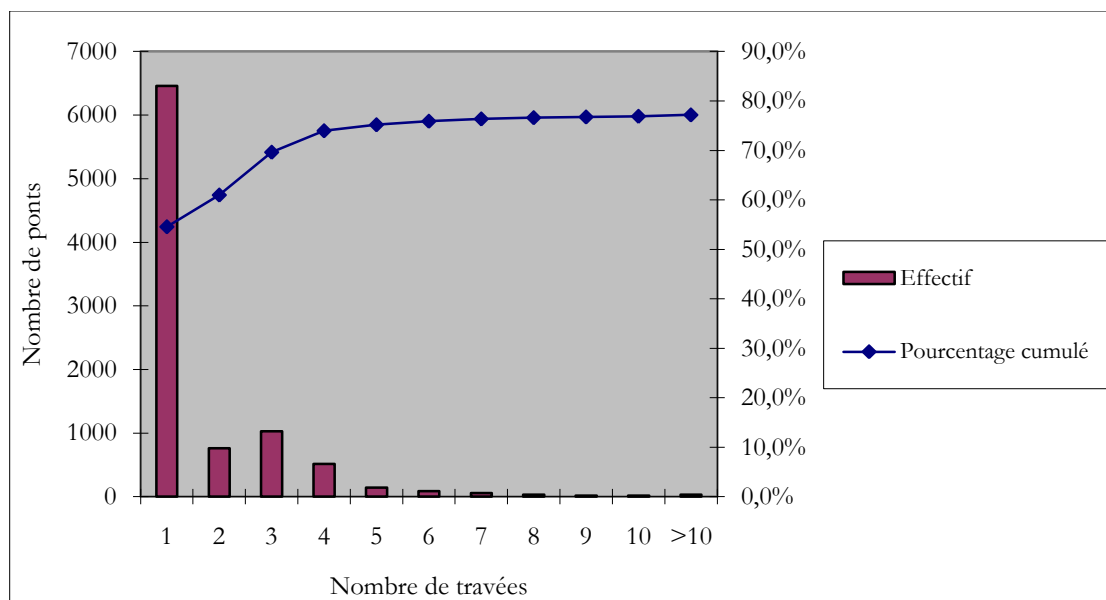
ANNEXE B : CARACTERISTIQUES DES PL ET DES EMS POUR UNE CHARGE REPARTIE DE 55 TONNES

Code	Silhouette	Poids total	Charges par essieu (en tonnes)									Distance entre essieux (en mètres)							
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
PL 5		40 tonnes	6,5	11,5	7,3	7,4	7,3					3,75	5,7	1,31	1,31				
PL 9		40 tonnes	7	9	9	7,5	7,5					4,8	1,36	6,6	1,4				
PL 10		40 tonnes	7	7,5	7,5	6	6	6				4,8	1,36	5,75	1,36	1,36			
PL 11		40 tonnes	7	10	6	7	7	7				2,9	1,36	6,3	1,31	1,31			
EMS 1		55 tonnes	6,5	11,5	7,3	7,4	7,3	7,5	7,5			3,75	5,7	1,31	1,31	5,8	1,4		
EMS 2		55 tonnes	6,5	11,5	7,3	7,4	7,3	5	5	5		3,75	5,7	1,31	1,31	4,62	1,36	1,36	
EMS 3		55 tonnes	6	6,5	6,5	7	7	7	7,5	7,5		2,9	1,36	6,3	1,31	1,31	6,14	1,4	
EMS 4		55 tonnes	6	6,5	6,5	7	7	7	5	5	5	2,9	1,36	6,3	1,31	1,31	5,64	1,36	1,36
EMS 5		55 tonnes	6	11,5	6,5	6	6	7	7	7		4,8	1,36	4,45	1,31	6,1	1,31	1,31	
EMS 6		55 tonnes	7	9	9	7,5	7,5	7,5	7,5			4,8	1,36	6,6	1,4	5,61	1,4		

ANNEXE C : DONNEES STATISTIQUES SUR LES PONTS DU RESEAU ROUTIER NATIONAL NON CONCEDE EN FRANCE, EN 2010

Voici les données statistiques concernant les ponts français du RRNNC. Elles ont été fournies par les services du SETRA en charge du logiciel LAGORA, qui regroupe les données issues de chacune des Directions Interdépartementales des Routes. Ainsi, 11 845 ponts appartiennent au réseau concerné. Cependant, la base de données est incomplète et seuls 9 144 ponts ont été entièrement décrits selon leur nombre de travées et la longueur de leur travée principale.

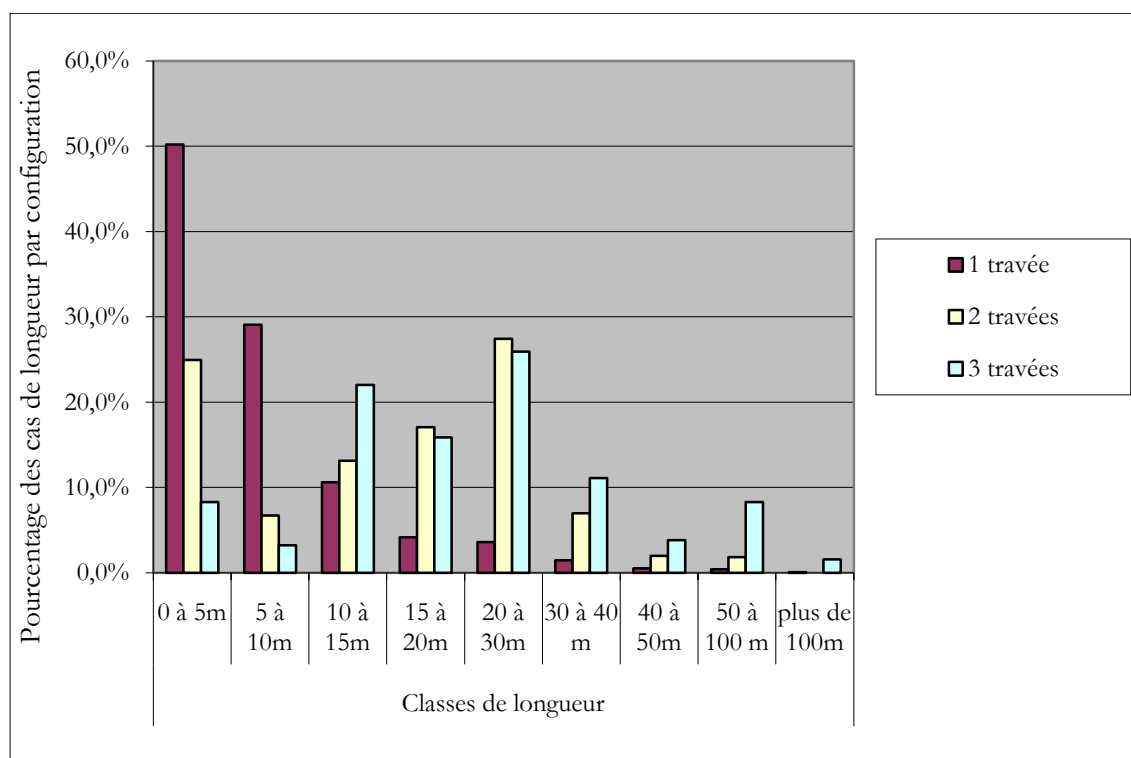
Nombre de travées	1	2	3	4	5	Plus de 5	Non renseigné
Effectif	6460	762	1027	515	144	236	2701
Pourcentage	54,5%	6,4%	8,7%	4,3%	1,2%	2%	22,8%
Pourcentage cumulé	54,5%	61,0%	69,6%	74,0%	75,2%	77,2%	100,0%



En ne conservant que les ponts à 1, 2 et 3 travées, seuls 70% des ponts du RRNNC semblent concernés. Malgré tout, près de 23% de ces ponts n'ont pas été pris en compte. Il est possible qu'ils rentrent également dans ces configurations. En outre, en ne prenant que la totalité des 9441 ponts correctement décrits, les configurations conservées concernent plus de 84% des ponts.

Afin de mener des calculs sur des configurations représentatives, il était nécessaire de sélectionner des longueurs de travées cohérentes. Comme ci-dessus, les ponts du RRNNC ont été analysés selon la longueur de leur travée principale.

		Nombre de travées		
		1 travée	2 travées	3 travées
Effectifs par classe	0 à 5m	3 242	190	85
	5 à 10m	1 879	51	33
	10 à 15m	685	100	226
	15 à 20m	267	130	163
	20 à 30m	232	209	266
	30 à 40 m	93	53	114
	40 à 50m	33	15	39
	50 à 100 m	26	14	85
	plus de 100m	3	0	16

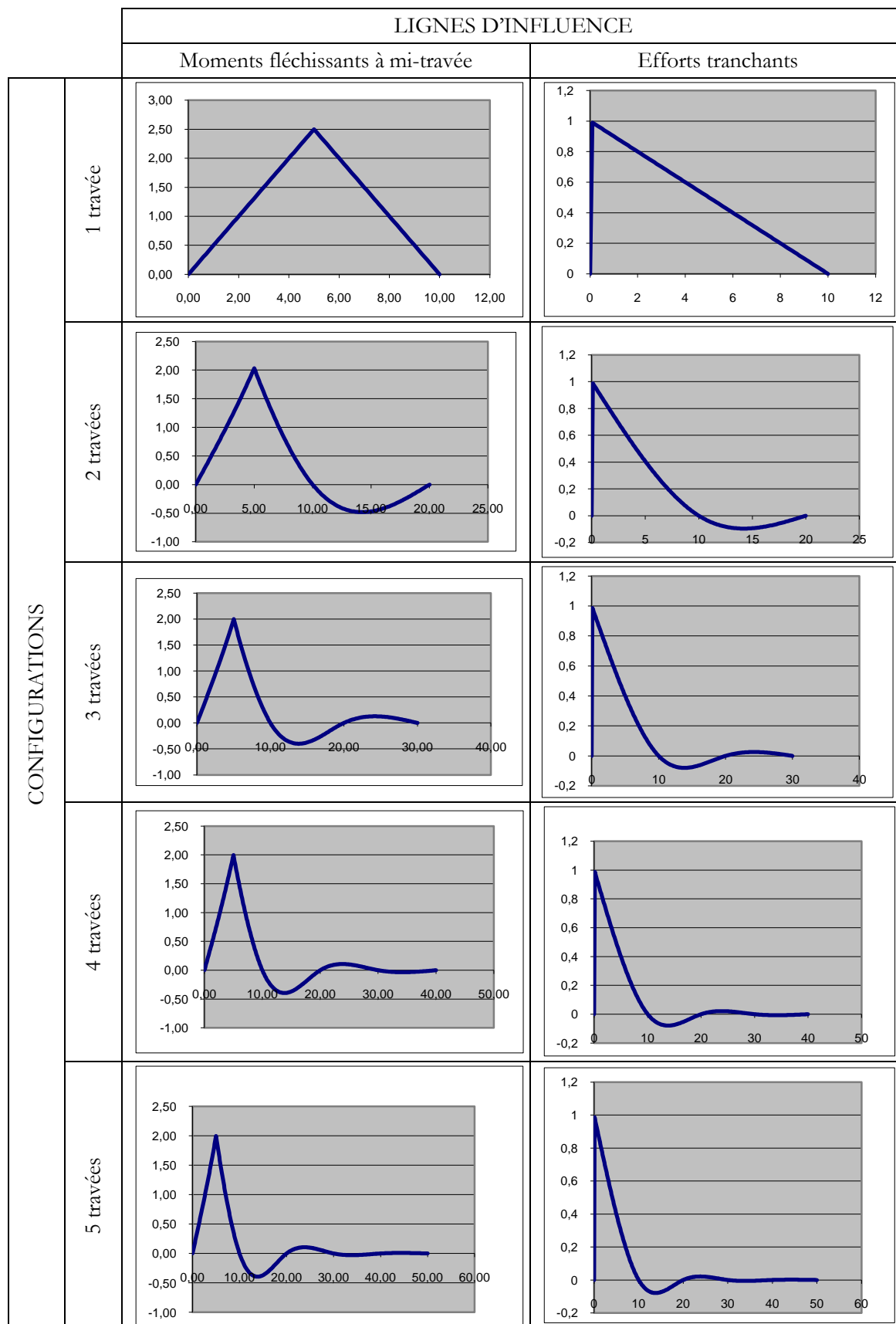


Peu de ponts excèdent une longueur de travée de 100 mètres. Ce sont des cas exceptionnels. Pour les ponts isostatiques (une seule travée), près de 80% des cas sont des courtes travées (≤ 10 m). Pour les configurations à 2 et 3 travées, les ponts sont essentiellement de moyennes travées (longueur comprise entre 10 et 50 mètres).

ANNEXE D : COMPARAISON DES LIGNES D'INFLUENCE POUR DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE TRAVEES

L'effet (que ce soit le moment fléchissant ou l'effort tranchant) est significativement plus faible au-delà de la troisième travée. Etant donné que nous ne nous intéressons qu'aux effets extrêmes, il n'est pas pertinent de travailler sur des configurations avec plus de trois travées.

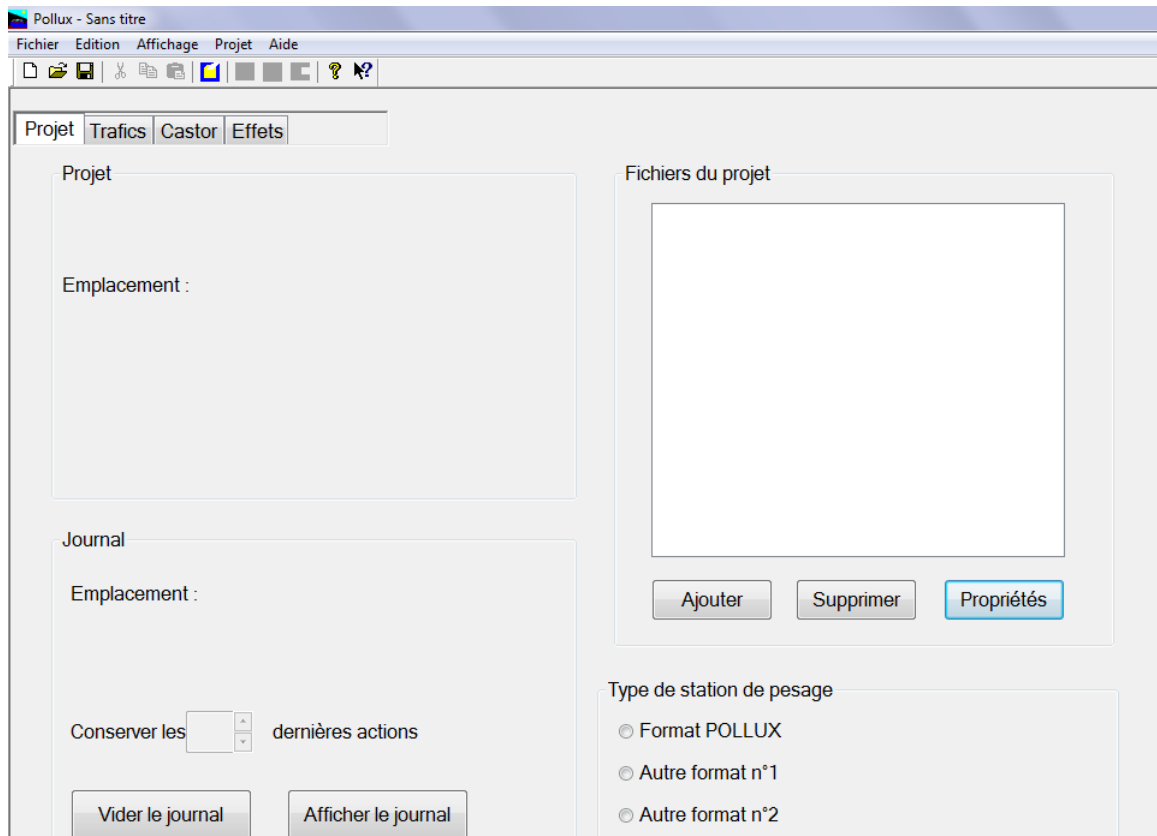
La comparaison a été réalisée pour une longueur de travée de 10 mètres :



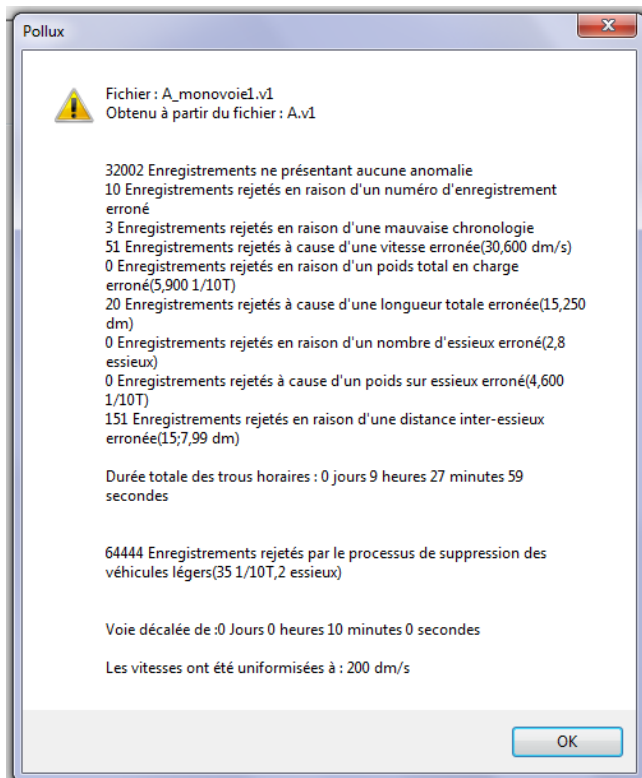
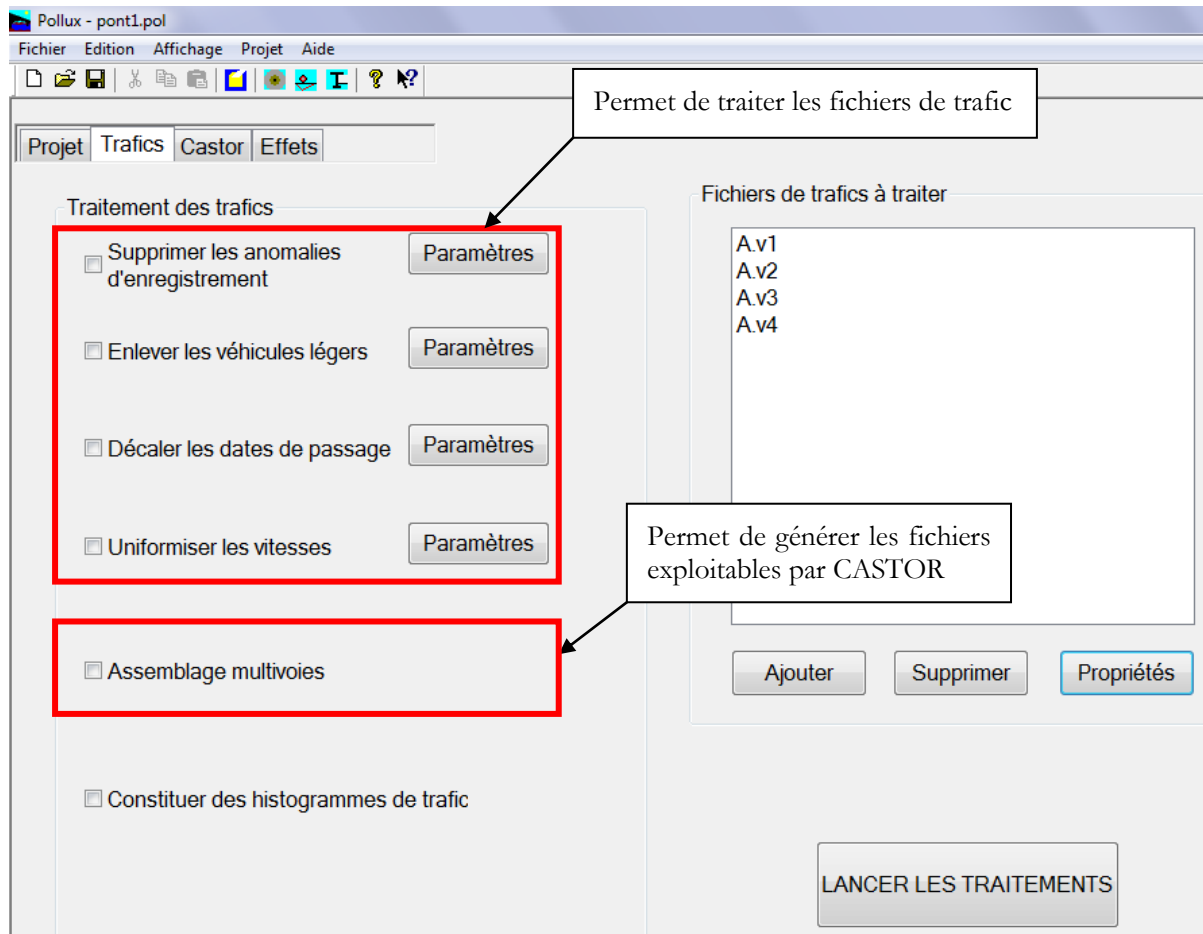
ANNEXE E : PRESENTATION DU LOGICIEL POLLUX

Nous allons décrire l'interface du logiciel avant de présenter ensuite les fichiers d'entrée et les fichiers de sortie.

Dans une première fenêtre, l'utilisateur doit entrer les fichiers utiles au projet : cela comprend les fichiers de trafic (extension .v) ainsi que les fichiers descriptifs des lignes d'influence (extension .inf) des ponts. Tous les fichiers traités doivent être préalablement entrés dans cette fenêtre.



Une fois que les chemins d'accès aux fichiers sont précisés, l'utilisateur accède ensuite au module « Trafics ». Celui-ci permet de traiter les fichiers de trafic entrés dans le projet. L'utilisateur peut alors demander la suppression des anomalies d'enregistrement (poids extrêmes, vitesses extrêmes ou autre), il peut sélectionner uniquement que les poids lourds ou encore choisir d'uniformiser les vitesses de circulation (afin de ne considérer qu'une voie où aucun PL ne se double). L'onglet « trafics » propose aussi de constituer un assemblage multivoie, c'est-à-dire entrer des données de circulation pour plusieurs voies de circulation (x voies dans le sens montant et y voies dans le sens descendant). L'assemblage multivoie génère alors un fichier de trafic modifié, utilisable par CASTOR (extension .tra).



Une fenêtre avertit l'utilisateur du nombre de fichiers qui correspondent aux critères de sélection. Il donne également le nombre de fichiers qui sont rejetés et la raison de l'anomalie.

Le traitement des trafics peut permettre de réaliser des histogrammes de trafic avec des classes de vitesse, de poids total, de poids par essieu, de distance entre essieux, mais ces histogrammes peuvent également donner la composition de trafic selon plusieurs classes de PL.

Une fenêtre permet à l'utilisateur de choisir les fichiers de trafic pour l'assemblage multivoies. Pour chaque fichier sélectionné, il est possible de donner le numéro de voie ainsi que le sens (montant ou descendant).

The dialog box is titled "Sélection du sens de circulation et du numéro de voie". It contains a table with the following columns: "Nom de la voie", "N° de voie", "Montant", and "Sens descendant".

Nom de la voie	N° de voie	Montant	Sens descendant
A_monovoie1.v1	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
A_monovoie1.v2	2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
A_monovoie1.v3	3	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
A_monovoie1.v4	4	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Annuler".

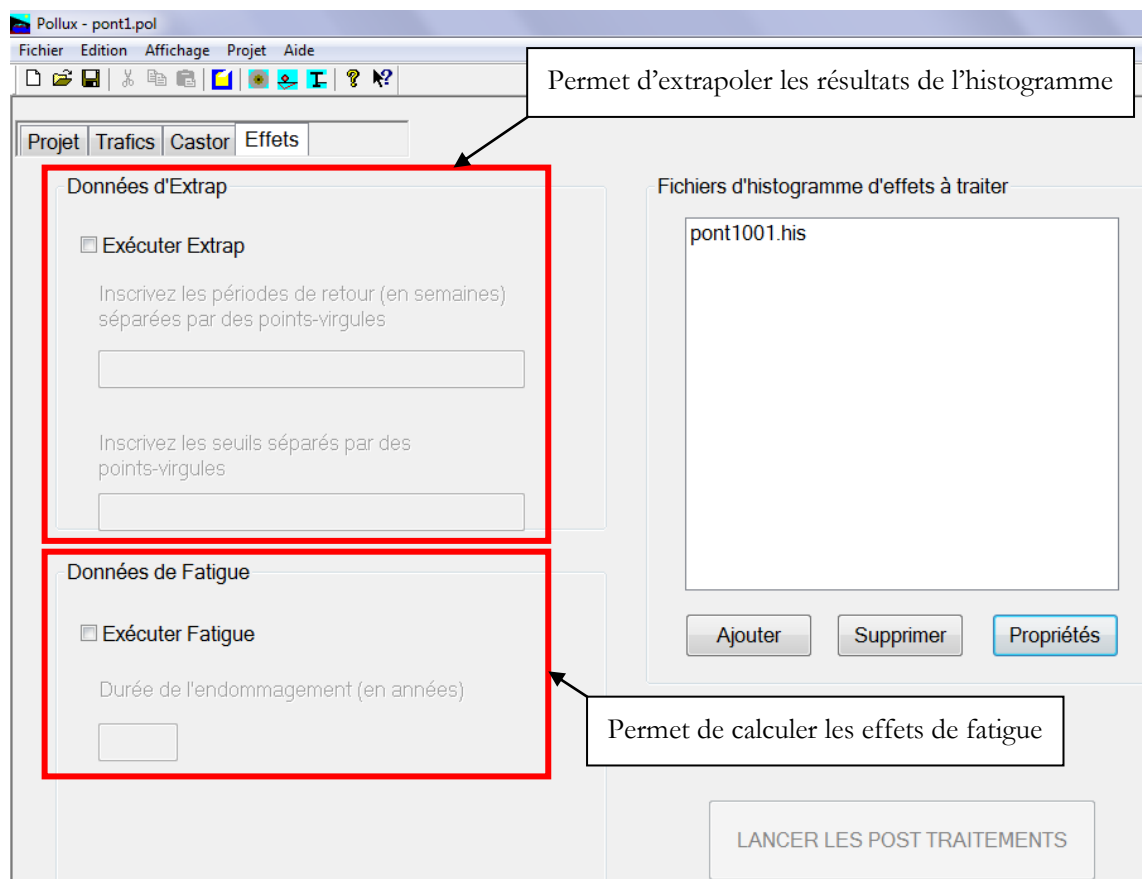
La phase suivante est le traitement par le module « CASTOR ».

The screenshot shows the "Pollux - pont1.pol" software interface. The "Castor" module is selected in the top menu. The interface is divided into several sections:

- Données générales:** Includes fields for "Fichier de trafic" and "Fichier de la ligne d'influence", each with a "Parcourir..." button. It also has input fields for "Pas de temps (en (1/100)secondes)" and "Nombre de valeurs extrêmes".
- Données des histogrammes:** Includes input fields for "Valeur minimale", "Valeur maximale", and "Pas de l'histogramme".
- Lignes d'influence déjà associées à ce trafic:** A large empty box with a "Propriétés" button at the bottom right.
- EXECUTER CASTOR:** A large button at the bottom center.

Après avoir sélectionné le fichier le trafic et la ligne d'influence, l'utilisateur choisit le pas de temps et les données relatives aux valeurs extrêmes à calculer. Le module CASTOR retourne les valeurs extrêmes dues au trafic sur la ligne d'influence en mode console et des histogrammes de valeurs d'effets (valeurs, minima, dépassements des niveaux et « rain-flow ») sous forme de fichiers .his.

Ces fichiers sont utilisés afin de déterminer les conséquences des effets en fatigue sur la structure. POLLUX propose dans un quatrième onglet « Effets » d'extrapoler les résultats obtenus avec CASTOR et de déterminer la durée de vie de l'ouvrage considéré en fonction de classes de trafic.



Le module « Extrap » nécessite l'entrée de périodes de retour en semaines¹⁵ ainsi que les seuils de Kolmogorov (il s'agit d'un test d'ajustement statistique). Le module « Fatigue » demande la saisie d'une durée d'endommagement en années.

¹⁵ La période de retour d'un phénomène aléatoire est la probabilité que le phénomène se produise durant une période temporelle déterminée. Par exemple, si un phénomène (comme le passage d'un PL exceptionnel) a une période de retour de 100 ans, cela signifie que ce phénomène a une probabilité de 10% de se produire sur une durée de vie de 100 ans.

Nous présentons désormais le type des fichiers d'entrée. Nous commençons avec les fichiers de trafic. Ceux-ci se composent d'un entête de trois lignes qui précise le réseau routier, la localisation et les dates des enregistrements. Ce sont ensuite les données propres aux véhicules. Elles sont organisées comme suit :

- Les deux premiers nombres, constitués chacun de cinq chiffres, sont deux numéros d'enregistrement propres à chaque véhicule ;
- La date d'enregistrement sous le format jour, mois et année (« jj/mm/aa ») ;
- Le temps de l'enregistrement du type heure, minutes, secondes puis centièmes (« hh/mm/ss/cc ») ;
- La vitesse (sur trois chiffres, exprimée en décimètres par seconde, « vvv ») ;
- Le tonnage total (en dixièmes de tonnes, « tttt ») ;
- La longueur totale (en décimètres, « lll ») ;
- Le nombre d'essieux (« n ») ;
- Le poids de l'essieu 1 (en dixièmes de tonnes, « ppp ») ;
- La distance entre l'essieu 1 et l'essieu 2 (en décimètres, « dd ») ;
- Le poids de l'essieu 2 ;
- ...
- Le poids de l'essieu *n*.

```

89A A 6 AUXERRE COMDALOR 402 13098912134262
DEBUT DES ENREGISTREMENTS : LE 13/09/89 A 12H13
FIN DES ENREGISTREMENTS : LE 25/09/89 A 12H30

0000120000130989121342623530022021201121011
0000220000130989121344133470029024201524014
0000320000130989121417793420024021201221012
0000420000130989121429454030036028201828018
000052000013098912145026319
0000620000130989121451093190025022201322012
000072000013098912145188322
0000820000130989121452623440020024201024010
0000920000130989121453603390032024201624016
0001020000130989121532293500033028201928014
000112000013098912155657328
0001220000130989121710484690025028201228013
000132000013098912174433330019020201020009
000142000013098912174502394
000152000013098912175833417
0001620000130989121827253670028026201426014
0001720000130989121835893690024026201126013
0001820000130989121841863690028026201626012
000192000013098912184546389
000202000013098912192044419
0002120000130989122032113470021028201128010
000222000013098912203374283
000232000013098912203569375
000242000013098912204391444
000252000013098912211515439
000262000013098912212053378

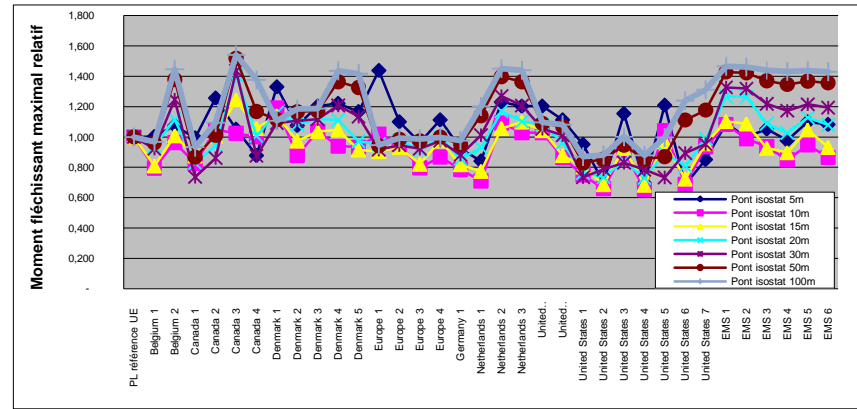
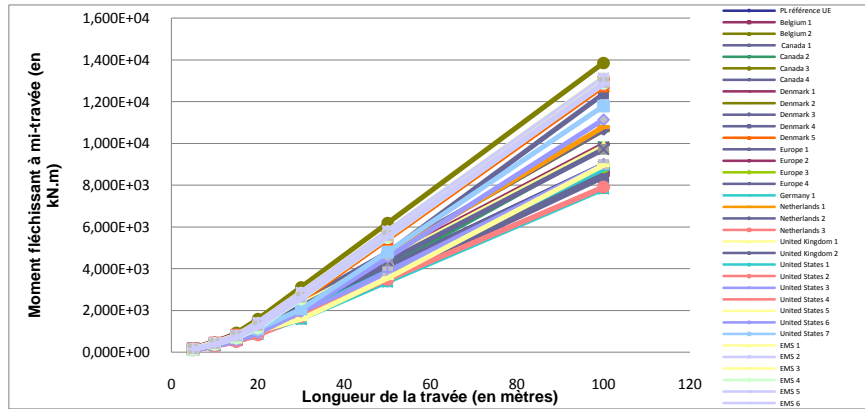
```

Exemple de fichier de trafic utilisé sous POLLUX

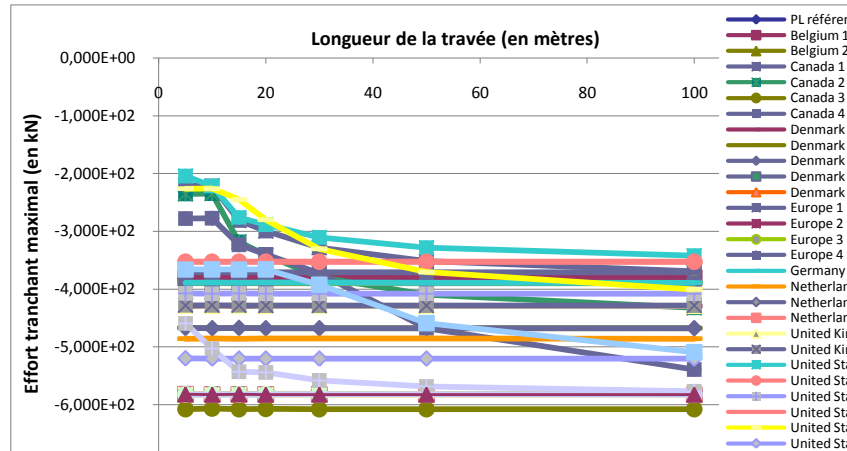
La première ligne correspond ainsi à un enregistrement effectué le 13 septembre 1989 à 12 heures, 13 minutes, 42 secondes et 62 centièmes. Le véhicule roulait à 353 dm/s. celui pesait 2,2 tonnes pour une longueur totale de 2,1 mètres. Il est constitué de deux essieux de 1,1 tonnes chacun et distants de 2,1 mètres.

ANNEXE F : RESULTATS POUR LES PL INDIVIDUELS SOUS POLLUX

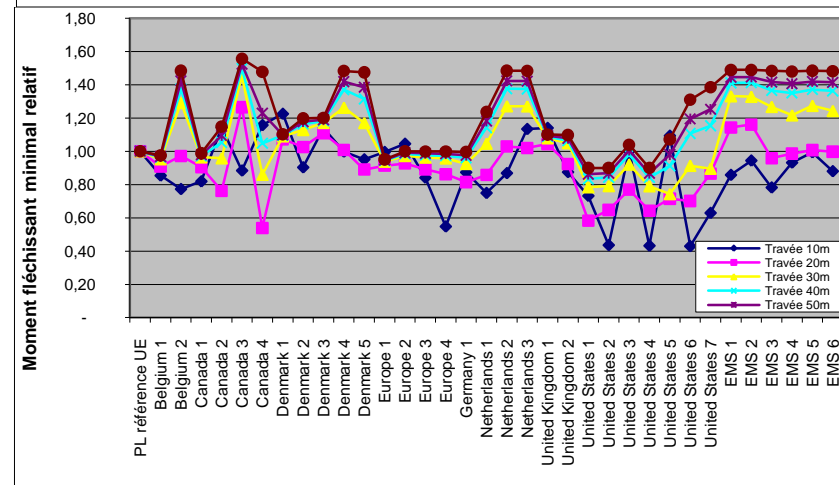
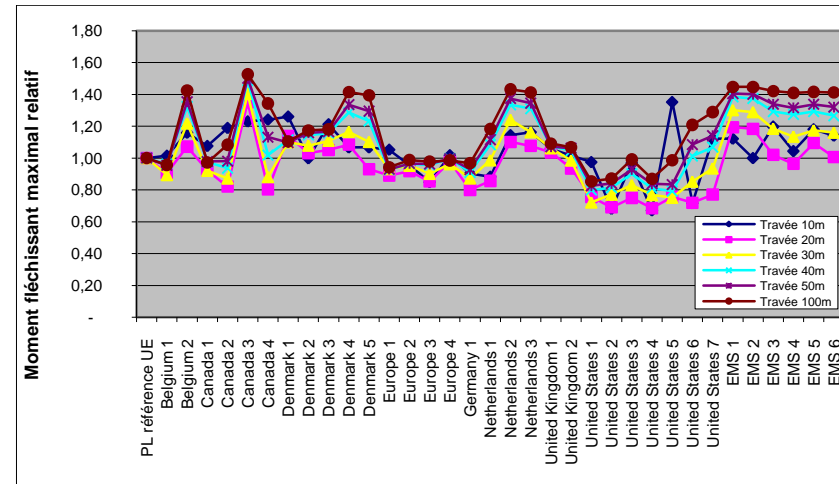
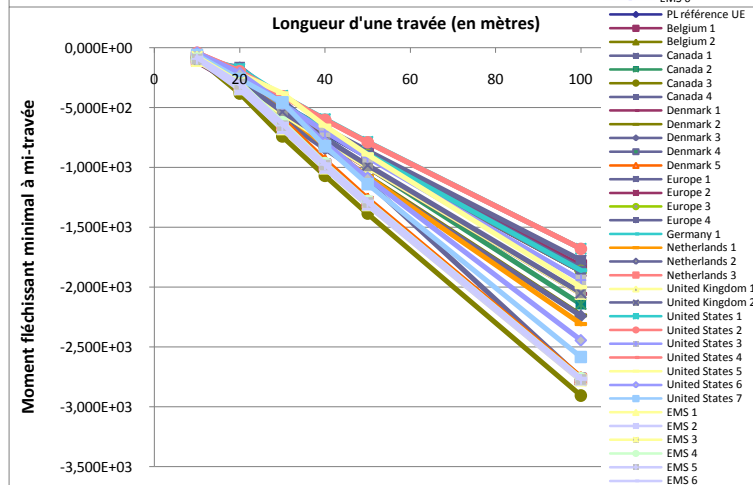
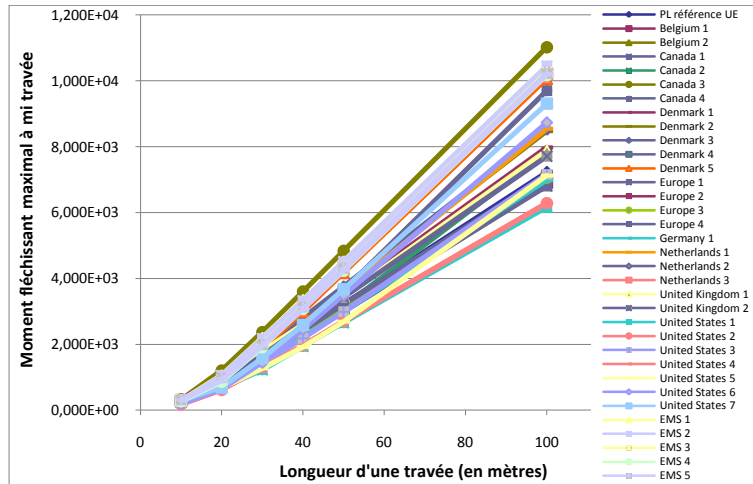
- Moments fléchissants pour ponts isostatiques :



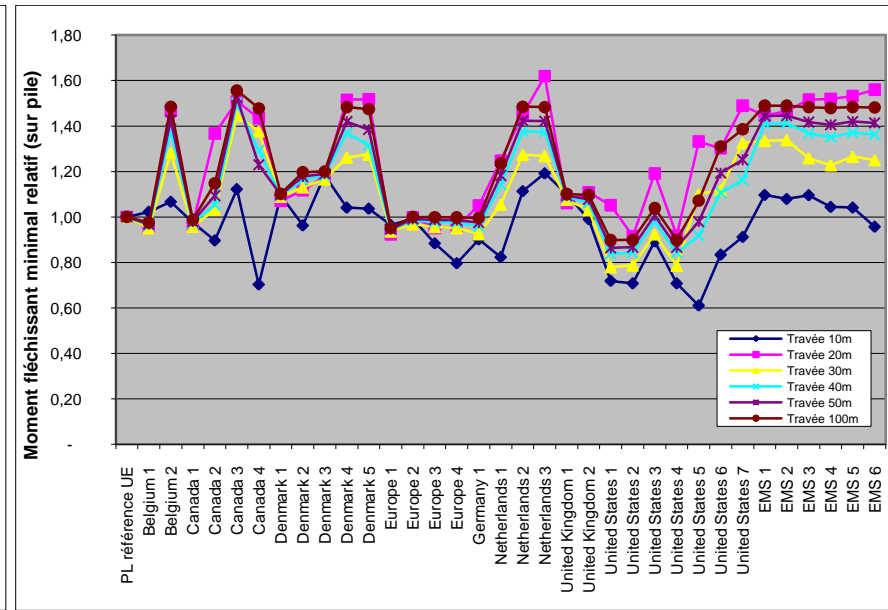
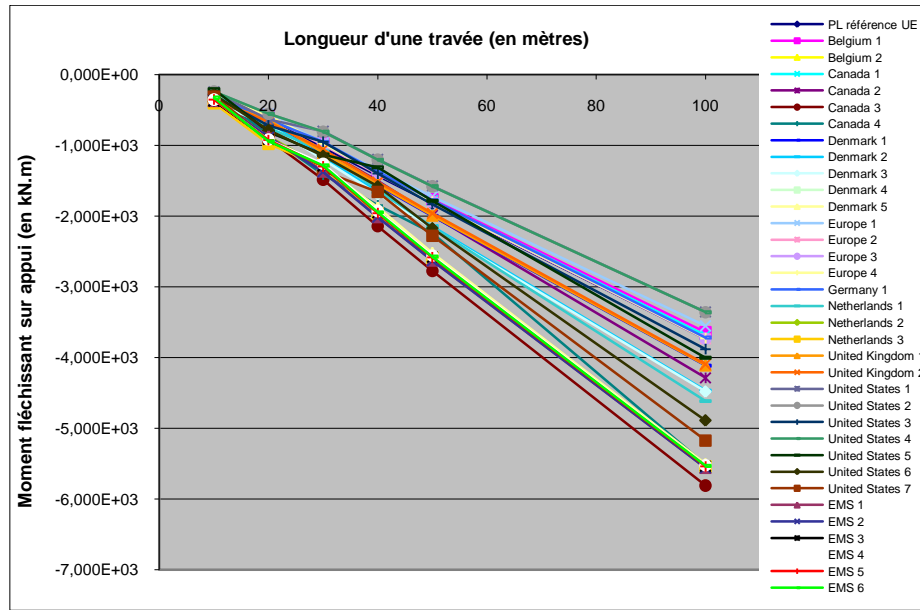
- Efforts tranchants pour les ponts isostatiques :



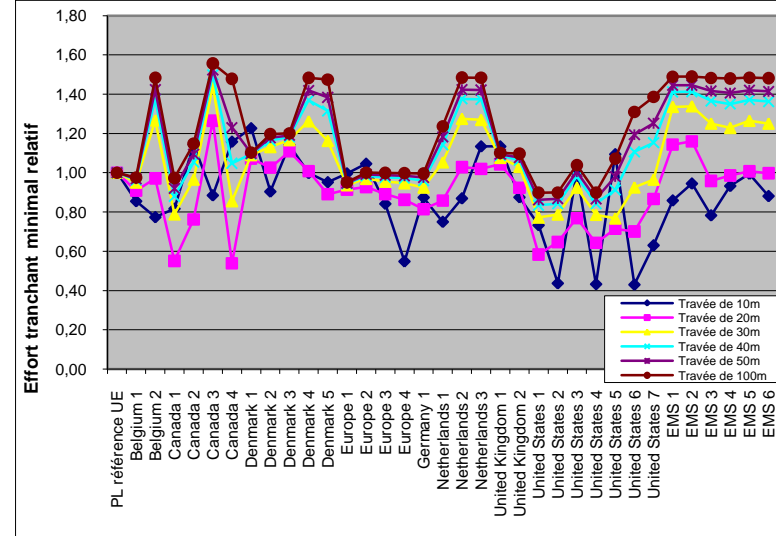
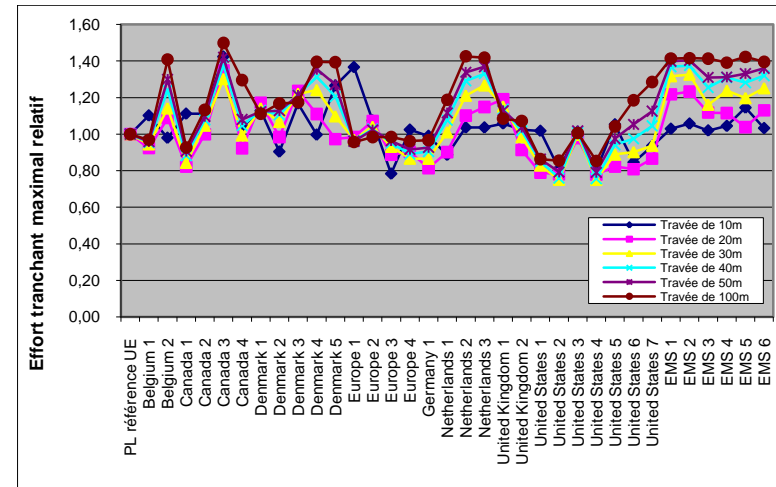
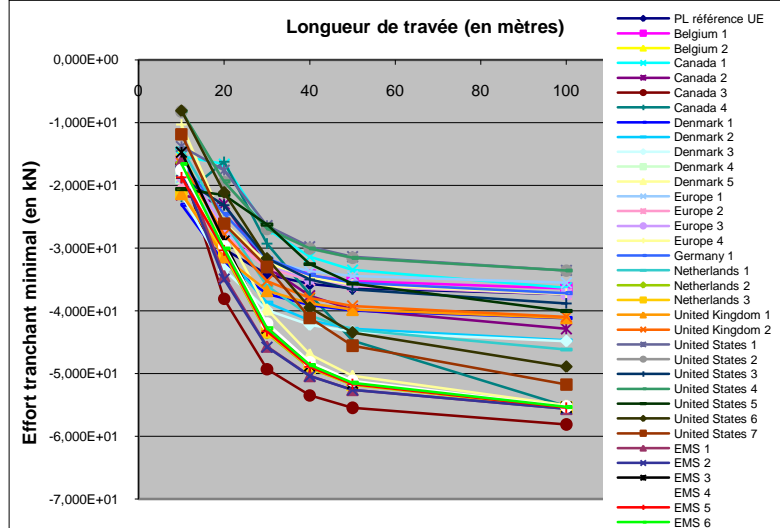
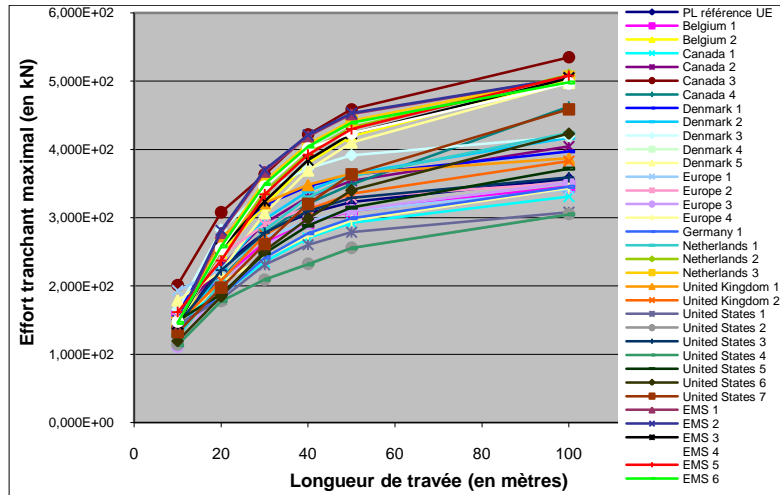
- Moments fléchissants (appui à mi-travée) pour ponts à deux travées :



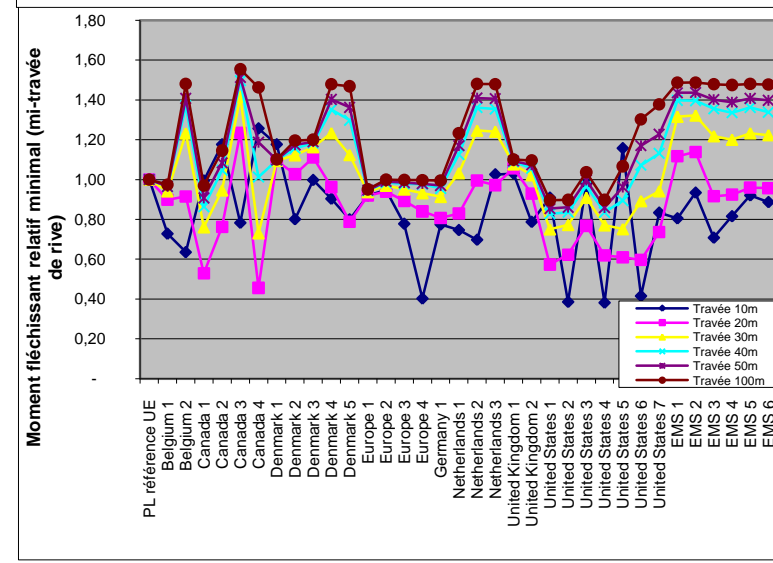
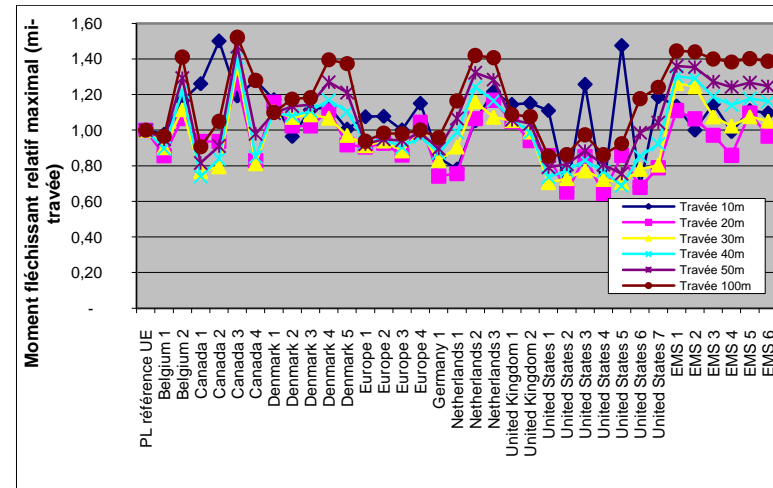
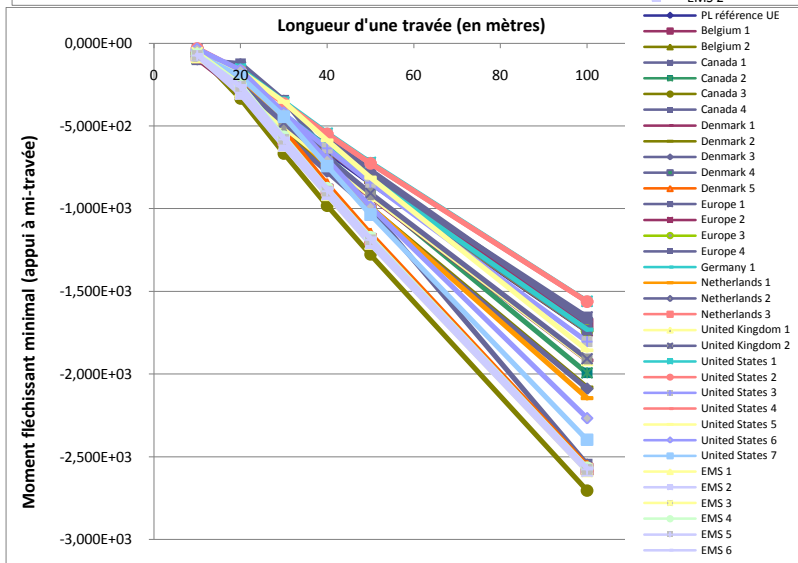
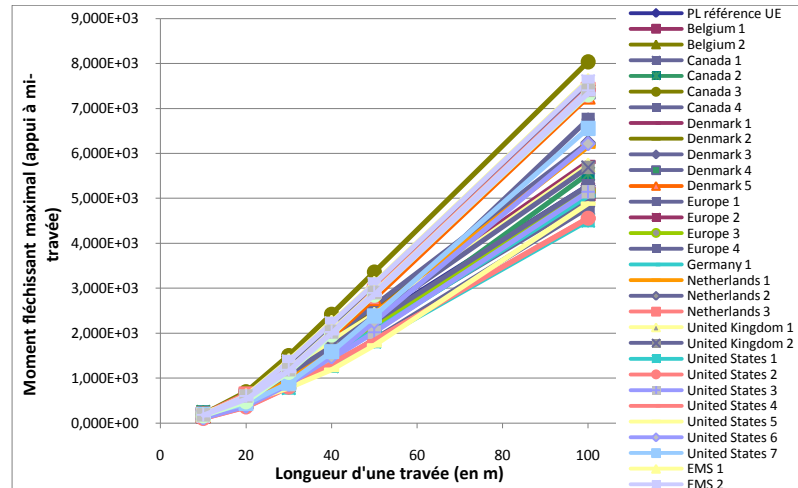
- Moments fléchissants (appui sur pile) pour ponts à deux travées :



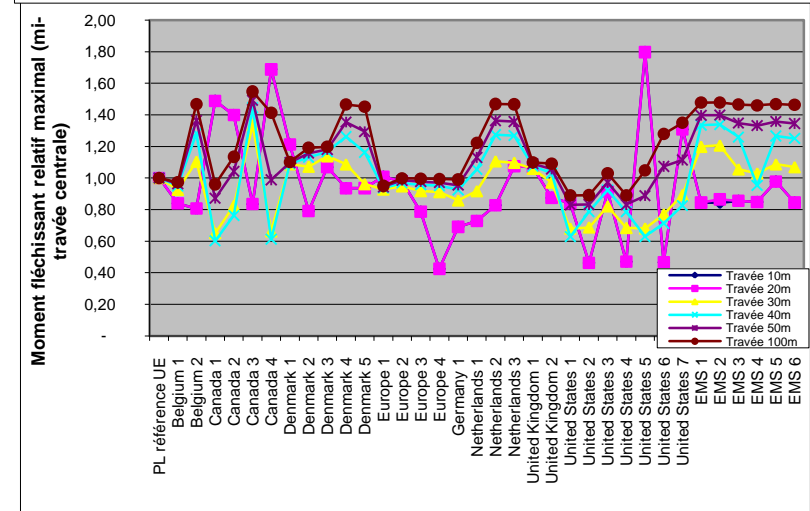
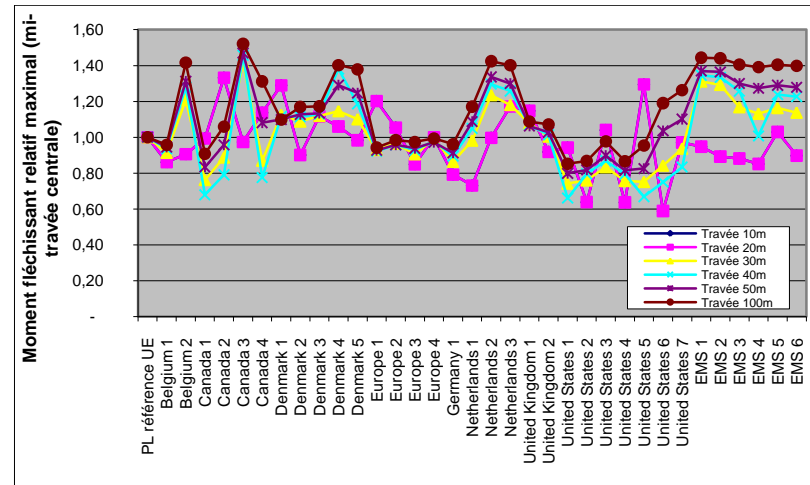
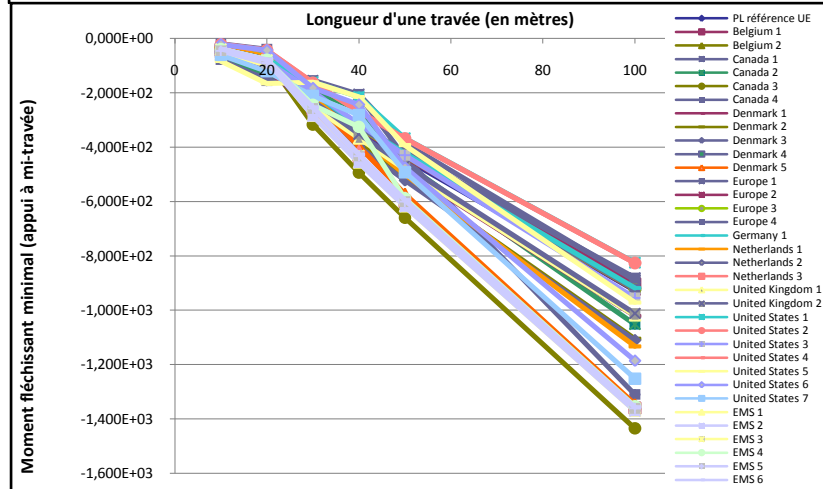
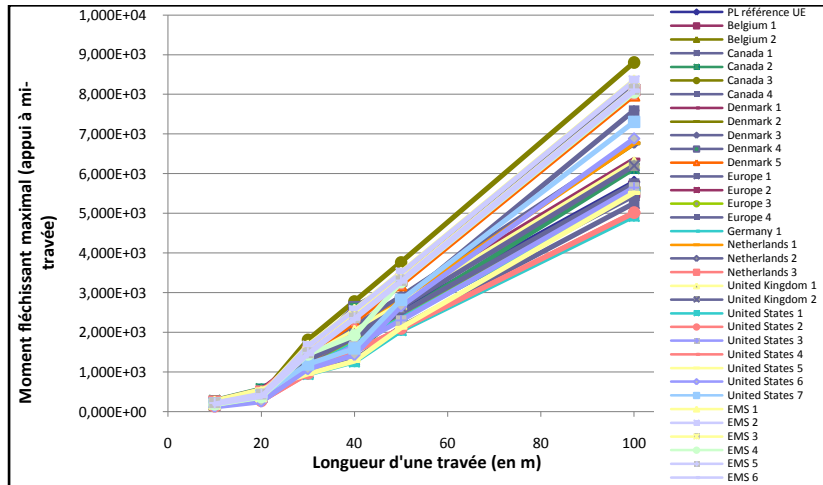
Efforts tranchants pour les ponts à deux travées :



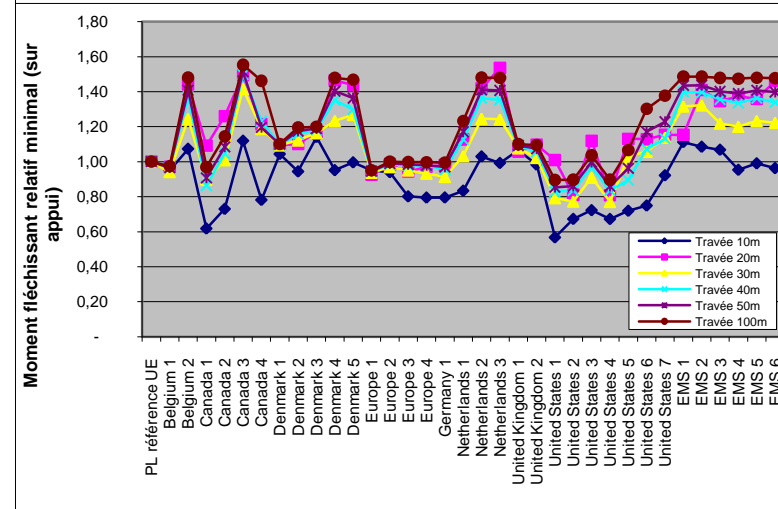
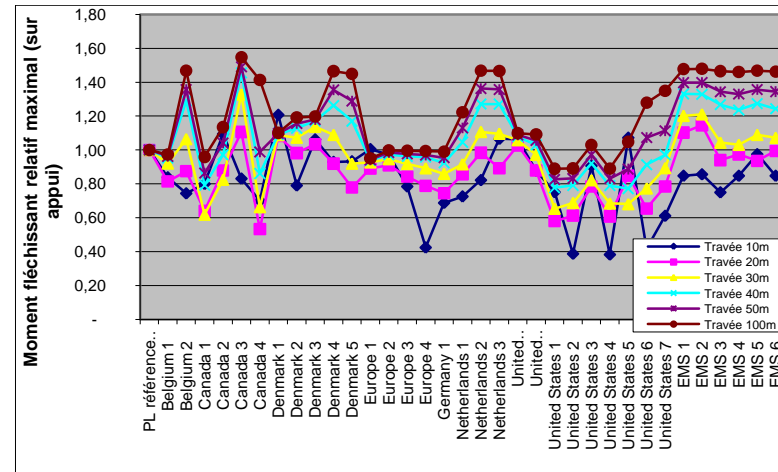
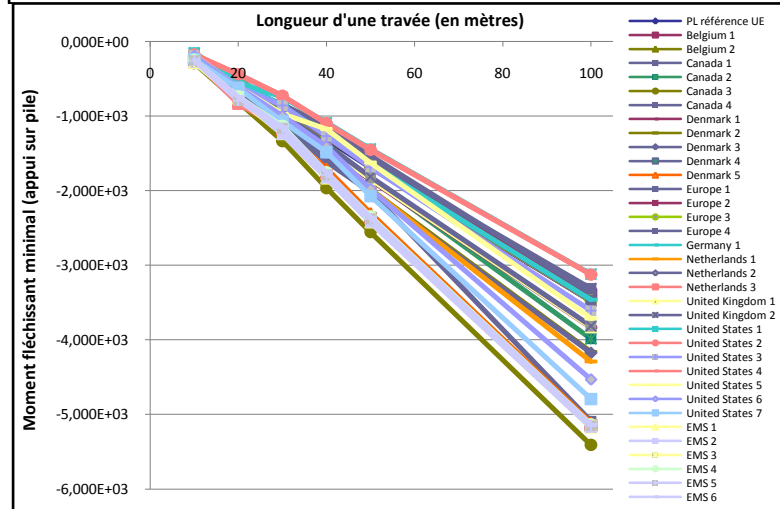
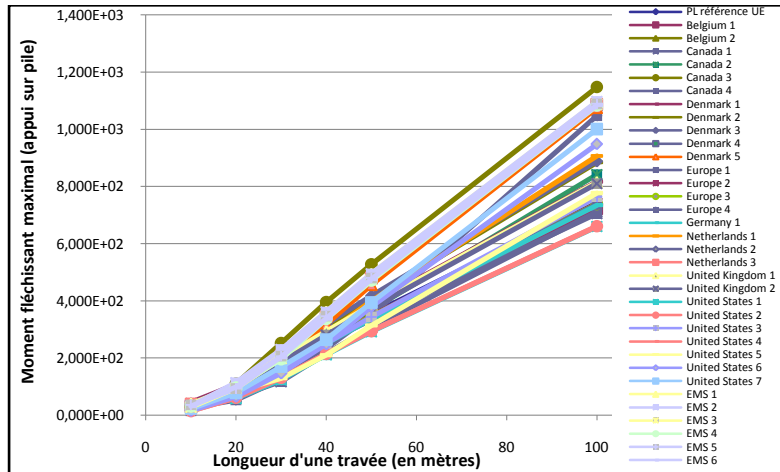
• Moments fléchissants (appui à mi-travée de rive) pour ponts à trois travées :



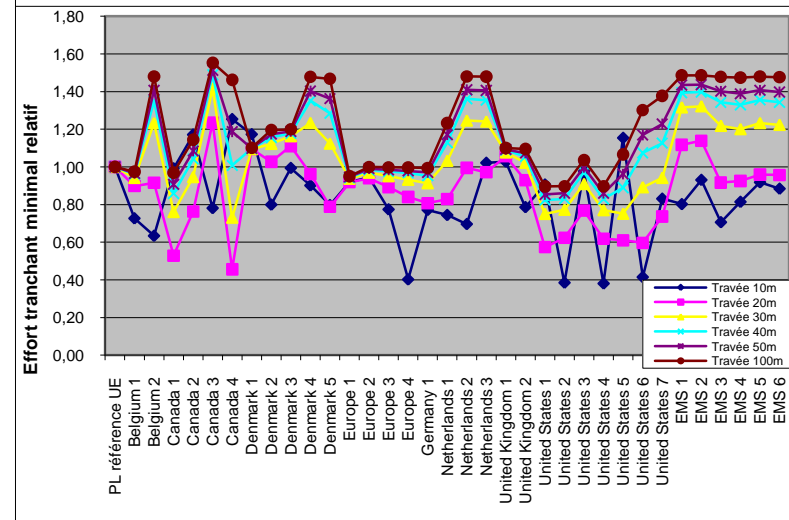
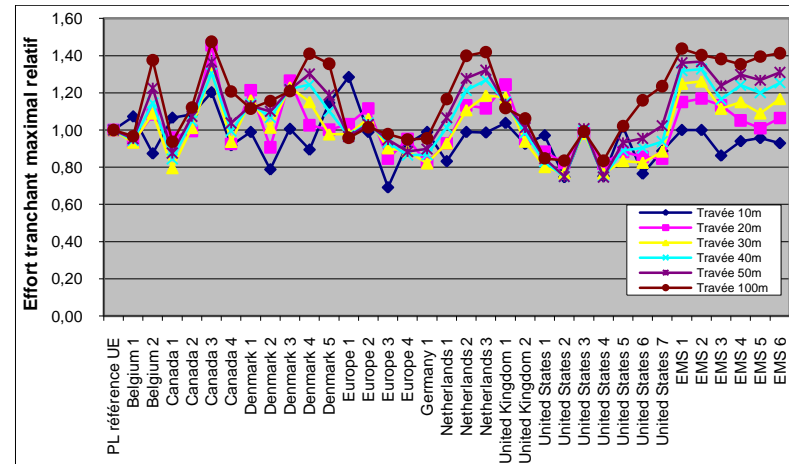
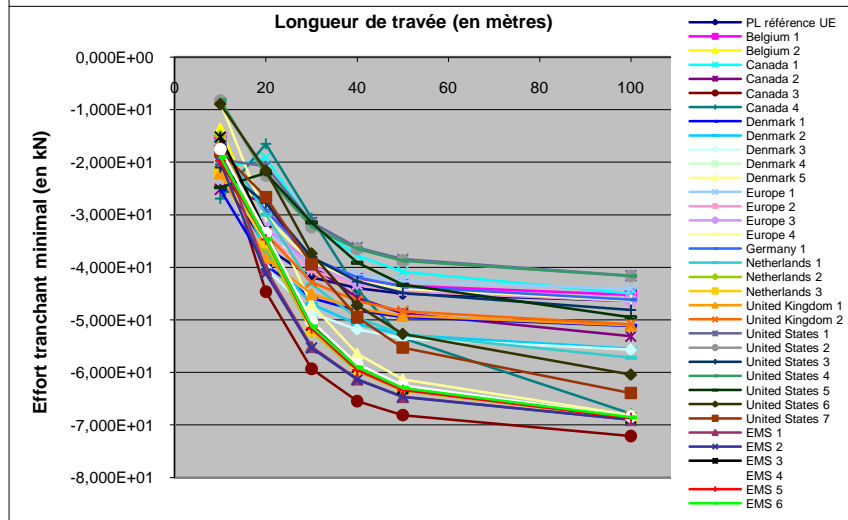
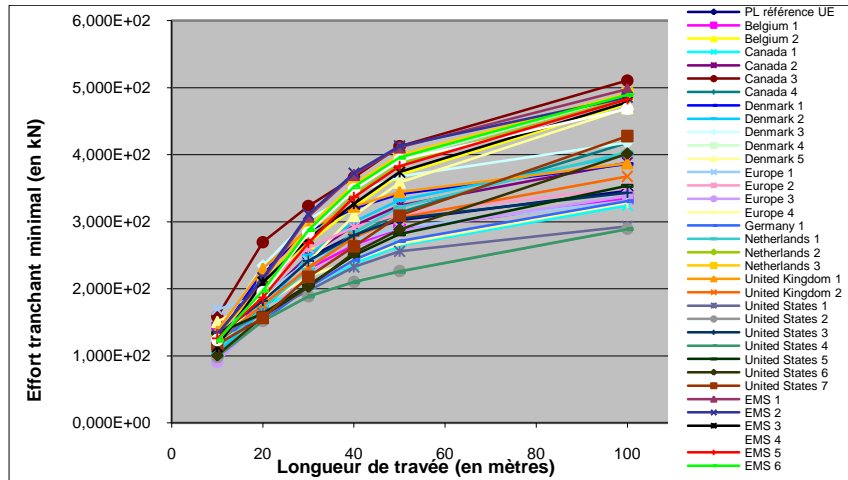
• Moments fléchissants (appui à mi-travée de **centrale**) pour ponts à trois travées :



- Moments fléchissants (appui sur pile) pour ponts à trois travées :



Efforts tranchants pour les ponts à trois travées :



BIBLIOGRAPHIE

BATTELLE Team., *Comprehensive truck size and weight study; bridges and truck size and weight regulations*, Federal Highway Administration (U.S. Department of transportation), février 1995. Disponible en ligne : <<http://www.fhwa.dot.gov/reports/tswstudy/TSWwp4.pdf>> (consulté le 22/03/2010)

Code de la Route, chapitre II « Poids et dimensions ». Disponible en ligne sur : <<http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?idArticle=LEGIARTI000006841583&idSectionTA=LEGISCTA000006177084&cidTexte=LEGITEXT000006074228&dateTexte=20091007>> (consulté le 18/05/2010)

COHEN et HOEL, *Trucks weight limits, issues and option*, Transportation Research Board, National Research Council, 1990, 307 p., ISBN 0-309-04955-5

CONTRACTOR Yateesh Jaykishan, *Evaluation of a new bridge formula for regulation of trucks weights*, thèse présentée devant l'université A&M du Texas, 182 p., août 2005. Disponible en ligne : <<http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/2551/etd-tamu-2005B-CVEN-Contrac.pdf?sequence=1>> (consulté le 24/03/2010)

DAVIES G.M. et CUNNINGHAM W. A., *A primer on highway finance*, University Press of America, février 1993, 206 p., ISBN : 0-8191-9362-3

DE CEUSTER et al., *Effects of adapting the rules on weights and dimensions of heavy commercial vehicles as established within directive 95/53/EC*, rapport de la Commission européenne, 2008, 315 p.

FENVES S. J., VELETOS A.S. et SIESS C.P., *Dynamic studies on bridges on the AASHO test road*, University of Illinois Engineering Experiment Station, février 1962, 366 p. Disponible en ligne sur : <<http://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/13763>> (consulté le 19/03/2010)

GHOSN Michel, *Development of truck weight regulations using bridge reliability model*, ASCE Journal of Bridge Engineering, pp. 293-303, novembre 2000.

GHOSN Michel et MOSES Fred, *Effect of changing truck weight regulations on U.S. bridge network*, ASCE Journal of Bridge Engineering, pp. 304-310, novembre 2000.

GHOSN M. et MOSES F., *Redundancy in highway bridge superstructures*, 1998, ISBN : 0-309-06257-8

IMHOF D., BAILEY S. F., HIRT M. A., *Modèle de charge pour l'évaluation des ponts-routes à deux voies avec trafic bidirectionnel*, juin 2001, disponible en ligne : <<http://www.nbq.ch/daniel/professional/CUED/daniel/docs/Modele40t.pdf>> (consulté le 22/03/2010)

JAMES W. Ray, NOEL James S., FURR Howard L. et BONILLA Francisco E., *Proposed New Truck Weight Limit Formula*, ASCE Journal of Structural Engineering, volume 112, numéro 7, pp. 1589-1604, juillet 1986.

Joint Transport Research Centre (JTRC), *Moving freight with better trucks, Final report*, OCDE, mars 2010, 334 p.

Journal Officiel, *Directive 96/53/CE du Conseil du 25 juillet 1996 fixant, pour certains véhicules routiers circulant dans la Communauté, les dimensions maximales autorisées en trafic national et international et les poids maximaux autorisés en trafic international*, JO L 235 du 17/09/1996, p. 59

KNIGHT I. et al., *Longer and/or heavier vehicles (LHV's) – a study of the likely effects if permitted in the UK: final report*, Transport Research Laboratory, Wokingham, 332 p., juin 2008. Disponible en ligne : <<http://www.ciltuk.org.uk/pages/downloadfile?d=46AAD48B-7044-4819-81FA-753DF78D61AC&a=stream>> (consulté le 20/04/2010)

KURT Carl E., *A proposed modification of the Bridge Gross weight formula*, Mid-continent transportation symposium, pp.104-108, 2000. Disponible en ligne : <<http://www.ctre.iastate.edu/pubs/midcon/Kurt.pdf>> (consulté le 25/03/2010)

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Section Durabilité des Ouvrages d'Art, *POLLUX LCPC v1.0, Manuel de prise en main*, LCPC Paris, 2008, 48 p.

MOSES F., *Effects on bridges of alternative truck configurations and weights*, en réponse au Transportation Research Board Truck Weight Study Committee, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1988.

O'CONNOR Alan, *User's manual Castor-LCPC*, Trinity College Dublin, Department of Civil Structural & Environmental Engineering, 39 p.

O'CONNOR C. et SHAW P., *Bridge loads, an international perspective*. Mars 2000, Taylor and Francis, 368 p., ISBN : 978-0-419-24600-8

OFTEDAL Sveinung, *Taxation and infrastructural costs of heavy goods transport*, avril 1993, 61 pages, ISBN: 82-7478-077-09. Disponible en ligne sur : <http://vassdragsvern.no/data/f/0/65/92/9_2401_0/4TAXTRAN.pdf> (consulté le 19/03/2010)

PERRET J. et DUMONT A.-G., *Modélisation des charges d'essieu*, septembre 2004, disponible en ligne sur : <http://infoscience.epfl.ch/record/116263/files/Rapport%20FP3%20partie%201_VERSION%20FINALE%2007.05.pdf>

Rapport d'étude du SETRA, *Camions de 60t et 25.25 m de long ; impact sur les chaussées*, collection « Les rapports » SETRA, novembre 2007, 17 p.

Rapport du SETRA, *IQOA Ponts, Campagne d'évaluation 2008, Dossier national*, juillet 2009, 35 p. Disponible en ligne : <http://www.piles.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/IQOA_PONTS_2008_DN_cle555aaf.pdf> (consulté le 15/04/2010)

Rapport d'étude du SETRA, *Sondage de circulation 2004-2005, Document de synthèse*, juillet 2009, 54 p. Disponible en ligne : <http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0942w_Sondage_de_circulation_2004-2005.pdf> (consulté le 04/05/2010)

TA Van-Bao, *Analyse de l'impact des poids lourds du futur sur les infrastructures routières*, Rapport de stage ENTPE, juillet 2009, 64 p.

Groupe de travail VLL, *Véhicules plus longs et plus lourds – Rapport final*, Centre de Recherches Routières (CRR), 2007, 152 p.

VROUWENVELDER, *Comparison of Truck-Semitrailer Combinations and LHV's with Regard to their Effect on Bridges*, Rapport du TNO, avril 2008.

SITOGRAPHIE

Site Internet du National Transport Commission en Australie :

<http://www.ntc.gov.au/viewpage.aspx?documentid=1356>

Site Internet du Ministère fédéral des transports aux États-Unis, rubrique fret routier :

<http://ops.fhwa.dot.gov/freight/sw/index.htm>

Site Internet du SETRA, spécialisé sur l'étude des ouvrages d'art :

<http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>

Directive 96/53/EC du 25 juillet 1996 concernant les règles de circulation des poids lourds dans l'Union Européenne :

<http://www.legaltext.ee/text/en/T61381.htm>

Pascaline COUSIN, *Imputations aux usagers PL et VL du coût d'infrastructure des routes*, rapport d'étude du SETRA, juin 2009 :

http://www.setra.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/0923w_Imputation_trafic_PL_sur_cout_routes.pdf