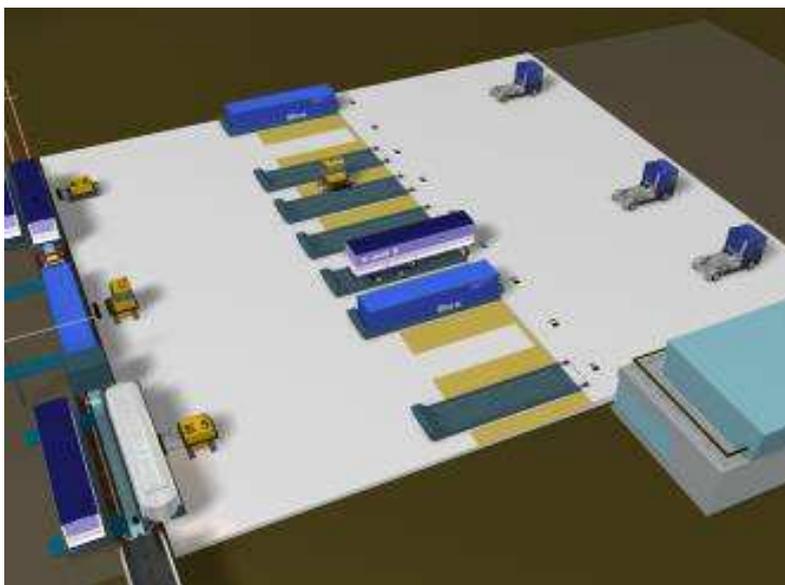


# R-shift-R

Contrat N°0603C0002

*Réorganiser la chaîne des moyens, pour améliorer la qualité et la rentabilité du transport de fret par le rail, grâce au concept R-shift-R*



*Rapport final*

## REVISIONS

### Version 0

12/03/08      TLA              Première version (contributions TLA, LET, APF et INSA)

### Version 1

24/03/08      APF              Intégration de modifications

### Version 2

12/04/08      LET              Intégration résultats de simulation finaux et bilan

### Version finale

14/04/08      TLA              Dernières modifications

## SOMMAIRE

1.	Contexte du projet .....	16
2.	Objectifs du projet .....	17
3.	Partenaires et comité de pilotage.....	18
4.	Contenu du document.....	19
5.	Méthodologie mise en œuvre au cours du projet .....	20
6.	Introduction au concept R-shift-R.....	21
6.1	Des enjeux à une architecture de rupture .....	21
6.2	Les technologies constituantes .....	23
6.2.1	Le wagon .....	23
6.2.2	La rame.....	23
6.2.3	Le chantier.....	23
7.	Etat des lieux de la situation.....	24
7.1	Analyse de la demande.....	24
7.1.1	La demande de transport ferroviaire .....	24
7.1.2	Les flux routiers captables.....	25
7.1.2.1	Sources de données et périmètre .....	25
7.1.2.2	Traitement des bases de données .....	25
7.1.2.3	Regroupement de pays et comptabilisation.....	27
7.1.2.4	Les axes à potentiel (en terme de transfert rail – route).....	28
7.1.3	Les caractéristiques attendues des autoroutes ferroviaires.....	30
7.1.3.1	L'élargissement de l'Union Européenne .....	30
7.1.3.2	L'adaptation des entreprises de transport .....	30
7.1.3.3	Le renforcement de l'industrialisation du transport.....	31
7.1.4	Les axes de transport souhaités .....	33
7.1.5	Les systèmes d'aide.....	34
7.1.5.1	Les aides Européennes .....	34
7.1.5.2	Les aides Nationales.....	35
7.2	Analyse de l'offre.....	40
7.2.1	Les acteurs.....	40
7.2.2	Les organisations.....	42
7.2.2.1	Le trafic ferroviaire français.....	42
7.2.2.2	Le train complet .....	42

7.2.2.3	Le wagon isolé .....	43
7.2.2.4	Le transport combiné.....	44
7.2.3	Les services .....	45
7.2.3.1	Les autoroutes ferroviaires .....	45
7.2.3.1.1	La Navette Transmanche Eurotunnel .....	46
7.2.3.1.2	L'Autoroute Ferroviaire Alpine AFA .....	47
7.2.3.1.3	L'autoroute ferroviaire France Luxembourg .....	48
7.2.3.2	Les liaisons de transport combiné .....	49
7.2.4	Les techniques et technologies .....	52
7.2.4.1	Le matériel roulant .....	52
7.2.4.2	Les terminaux .....	56
7.2.4.3	L'exploitation des rames .....	56
7.2.4.4	Les techniques de transbordement sur terminal .....	60
7.2.4.4.1	Introduction.....	60
7.2.4.4.2	CARGO SPEED .....	61
7.2.4.4.3	CARGO BEAMER .....	64
7.2.4.4.4	CARGO ROO .....	66
7.2.4.4.5	FLEXIWAGON .....	70
7.2.4.4.6	G-2000 .....	72
7.2.4.4.7	COMMUTOR .....	74
7.2.4.4.8	Le wagon de ferroutage polyvalent AFR .....	77
7.2.4.4.9	Le wagon pivotant surbaissé Modalohr.....	84
7.2.4.4.10	Le concept R-shift-R .....	89
7.2.4.4.11	Comparaison des techniques étudiées .....	95
7.2.4.5	Les systèmes d'information .....	97
7.2.4.5.1	Introduction.....	97
7.2.4.5.2	Les données utilisées dans la gestion des wagons .....	97
7.2.4.5.3	Les systèmes de gestion (exploitation) des wagons.....	99
7.2.4.5.4	Les outils d'aide à la décision .....	100
7.2.4.5.5	Les systèmes de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) et les outils de diagnostic	101
7.2.4.5.6	Les systèmes de géo-localisation .....	102
7.2.4.6	Quelques expériences réalisées et meilleures pratiques.....	104
7.2.4.6.1	IAV (identification automatique des véhicules).....	104
7.2.4.6.2	Shortlines .....	104
7.2.4.6.3	Espagne .....	104
7.2.4.6.4	Belgique.....	105
7.2.5	L'infrastructure.....	106
7.2.5.1	Le réseau ferré Européen.....	106
7.2.5.2	Le réseau ferré Français .....	106
7.2.5.3	L'articulation du réseau entre le transport fret et voyageurs.....	107
7.2.5.4	L'articulation diesel / électricité.....	108
7.2.5.5	Les systèmes d'électrification du réseau .....	108
7.2.5.6	Les infrastructures logistiques françaises.....	110

7.2.5.7	L'infrastructure du transport combiné.....	111
7.2.5.8	Le gabarit ferroviaire.....	112
7.2.5.9	La charge à l'essieu .....	113
7.2.5.10	Les vitesses de transport.....	115
7.3	Diagnostic et bilan.....	117
7.3.1	L'importance de la politique tarifaire.....	117
7.3.2	L'importance de la fiabilité.....	118
7.3.3	L'importance de la simplicité.....	119
7.3.4	L'importance de la sécurité liée aux conditions de circulation.....	120
7.3.5	L'importance des aspects environnementaux .....	121
7.3.6	Premières conclusions .....	121
8.	Description et évaluation de scénarios d'évolution du fret ferroviaire autour du concept R-shift-R.....	124
8.1	Objectifs, contraintes et concepts.....	124
8.2	Description détaillée du concept R-shift-R .....	126
8.2.1	La rame R-shift-R.....	126
8.2.2	Le wagon R-shift-R.....	126
8.2.2.1	Général .....	126
8.2.2.2	Le praticable .....	127
8.2.2.3	La balancelle .....	129
8.2.2.4	Le système de fixation et de reprise des charges .....	131
8.2.2.4.1	Cas des remorques .....	131
8.2.2.4.2	Cas des conteneurs .....	132
8.2.3	Le bogie R-shift-R.....	133
8.2.3.1	Introduction .....	133
8.2.3.2	Cahier des charges fonctionnel .....	135
8.2.3.2.1	Fonctions principales .....	135
8.2.3.2.2	Fonctions contraintes .....	136
8.2.3.3	Les différents sous systèmes du bogie .....	137
8.2.3.4	Solution proposée.....	137
8.2.3.4.1	Présentation générale .....	137
8.2.3.4.2	Caractéristiques principales.....	138
8.2.3.4.3	La suspension.....	141
8.2.3.4.3.1	Dispositif de variation de hauteur .....	141
8.2.3.4.3.2	Nécessité d'avoir une garde au rail variable .....	145
8.2.3.4.3.3	Prise en compte de la variation de la garde au rail en fonction de la charge .....	148
8.2.3.4.3.4	Dispositif d'amortissement .....	150
8.2.3.4.4	Les essieux .....	151

8.2.3.4.5	Le système de freinage.....	154
8.2.3.4.6	La motorisation .....	156
8.2.3.4.7	Le châssis .....	160
8.2.3.4.7.1	Architecture .....	160
8.2.3.4.7.2	Dispositif de reprise des efforts horizontaux des balancelles.....	160
8.2.3.4.7.3	Amortissement des mouvements de lacet .....	161
8.2.3.4.8	Le circuit hydraulique .....	163
8.2.3.4.8.1	Général.....	163
8.2.3.4.8.2	Description des quatre opérations .....	165
8.2.3.4.8.3	Caractéristiques principales .....	166
8.2.4	La gare R-Shift-R .....	170
8.2.4.1	Structure générale.....	170
8.2.4.2	Zone routière .....	171
8.2.4.2.1	Poste de contrôle.....	171
8.2.4.2.2	Zones communes d'attentes .....	171
8.2.4.2.2.1	Organisation.....	171
8.2.4.2.2.2	Zone de départ différé/différé .....	172
8.2.4.2.2.3	Zone commune de départ immédiat et immédiat différé.....	172
8.2.4.3	Zone de transfert route rail .....	173
8.2.4.3.1	Gare de forte utilisation.....	173
8.2.4.3.2	Gare de faible utilisation .....	173
8.2.4.3.3	Définition du nombre de modules actifs.....	173
8.2.4.4	Module « découpage » .....	174
8.2.4.4.1	Partie débarquement/embarquement .....	174
8.2.4.4.2	Zone de transfert entre l'embarquement et le quai .....	175
8.2.4.4.3	Zone ferroviaire.....	175
8.2.4.5	Description des matériels spécifiques .....	176
8.2.4.5.1	Partie débarquement/embarquement sur les praticables .....	176
8.2.4.5.2	Partie transfert.....	177
8.2.4.5.2.1	Fonction de reprise de charge .....	177
8.2.4.5.2.2	Fonction de déplacement .....	178
8.2.4.5.2.3	Sens de la charge sur le wagon .....	179
8.2.4.5.3	Partie ferroviaire .....	180
8.2.4.5.3.1	Principe de fonctionnement .....	180
8.2.4.5.3.2	Processus de manutention .....	181
8.2.4.5.3.3	Construction et contraintes dimensionnelles et fonctionnelles.....	181
8.2.4.6	Caractérisation d'un module de base .....	182
8.2.4.6.1	Définition .....	182
8.2.4.6.2	Dimensionnement .....	182
8.2.4.6.3	Composants.....	182
8.2.4.6.4	Schématisation .....	183
8.2.4.6.5	Position des éléments en attente de la rame .....	184
8.2.4.6.6	Cycle .....	185
8.2.4.6.7	Diagramme des temps .....	187
8.2.4.7	Présentation d'une gare R-shift-R avec un quai.....	188
8.2.5	Fiche technique R-shift-R .....	189
8.3	Recherche et évaluation de scénarios de déploiement du concept R-shift-R.....	191
8.3.1	Description des scénarios étudiés.....	191
8.3.1.1	Introduction .....	191

8.3.1.2	Scénario 1 (transit) .....	192
8.3.1.3	Scénario 2 (hinterland portuaire).....	193
8.3.1.4	Scénario 3 (franchissement).....	194
8.3.1.5	Scénario 4 (interconnexions).....	195
8.3.2	Evaluation des scénarios .....	196
8.3.2.1	Préambule.....	196
8.3.2.2	Présentation systématique de STEFv2.0.....	197
8.3.2.2.1	Onglet « Route » .....	197
8.3.2.2.2	Onglet « Mat-roul ».....	197
8.3.2.2.3	Onglet « Liaisons » .....	198
8.3.2.2.4	Onglet « Gares » .....	199
8.3.2.2.5	Onglet « Offre » .....	199
8.3.2.2.6	Onglet « Flux-Dist ».....	200
8.3.2.2.7	Onglet « Affect ».....	201
8.3.2.2.8	Onglet « Dist pré-post » .....	201
8.3.2.2.9	Onglet « Coût RSR ».....	201
8.3.2.2.10	Onglet « Marché ».....	201
8.3.2.2.11	Onglet « CalcPart » .....	202
8.3.2.2.12	Onglet « Trafic pot. » .....	202
8.3.2.2.13	Onglet « Traf. pot. gare » .....	202
8.3.2.2.14	Onglet « trafic réel gare ».....	202
8.3.2.2.15	Onglet « Exploit » .....	202
8.3.2.2.16	Onglet « Bilan » .....	203
8.3.2.2.17	Onglet « km éludés ».....	203
8.3.2.3	La simulation économique du fonctionnement d'un service R-shift-R .....	204
8.3.2.3.1	Les hypothèses de simulation.....	204
8.3.2.3.1.1	Caractéristiques de la demande.....	204
8.3.2.3.1.2	Hypothèses du système R-Shift-R .....	205
8.3.2.3.1.3	Distance minimale de pertinence du service R-Shift-R.....	206
8.3.2.3.2	Scénario 1 : simulation d'un axe Lille-Hendaye .....	208
8.3.2.3.2.1	Evaluation de la performance de la version système RSR1 sur l'axe Lille-Hendaye.....	208
8.3.2.3.2.2	Test de la version système R-S-R 4 – avec «monte-et-baisse» mais sans motorisation répartie – sur l'axe Lille-Hendaye.....	213
8.3.2.3.2.3	Test de la version système R-S-R 2 (sans « monte-et-baisse » mais avec motorisation répartie) sur l'axe Lille-Hendaye.....	216
8.3.2.3.2.4	Test de la version système R-S-R 2 (sans « monte-et-baisse » mais avec motorisation répartie) sur l'axe Lille-Hendaye avec un itinéraire à grand gabarit.....	218
8.3.2.3.2.5	Test de la version système R-S-R 3 (sans «monte-et-baisse» et sans motorisation répartie) sur l'axe Lille-Hendaye .....	220
8.3.2.3.3	Scénario 2 : simulation d'un axe Nord-Sud du Havre à Marseille entre ports maritimes.....	222
8.3.2.3.3.1	Evaluation de la performance de la version système RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de “monte-et-baisse”) sur l'axe Le Havre-Marseille .....	223
8.3.2.3.3.2	Evaluation de la performance de la version système RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de “monte-et-baisse”) sur l'axe Le Havre-Marseille avec des trains de 1500 m .....	225
8.3.2.3.3.3	Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de “monte-et-baisse”) sur l'axe Le Havre-Marseille sans itinéraire à grand gabarit.....	226
8.3.2.3.3.4	Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de “monte-et-baisse”) sur l'axe Le Havre-Marseille avec un itinéraire à grand gabarit .....	228
8.3.2.3.3.5	La prise en compte de l'évacuation des conteneurs depuis les ports.....	230
8.3.2.3.4	Scénario 3 : simulation du franchissement d'un obstacle naturel entre Lyon et Turin .....	238
8.3.2.3.4.1	Evaluation de la performance de la version système RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin .....	239
8.3.2.3.4.2	Evaluation de la performance de la version système RSR4 (sans motorisation répartie mais avec dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin .....	247

8.3.2.3.4.3	Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie et sans dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin actuel .....	249
8.3.2.3.4.4	Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin avec une ligne à grand gabarit .....	253
8.3.2.3.4.5	Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin avec une ligne à grand gabarit et des trains de 1500m	258
8.3.2.3.5	Scénario 4 : simulation de la combinaison de la desserte Nord-Sud Le Havre-Marseille et de l'axe transalpin Lyon Turin avec une connexion à Lyon .....	263
8.3.2.3.5.1	Limites, paramètres et hypothèse de la simulation.....	263
8.3.2.3.5.2	Calcul de la part de marché de RSR avec connexion.....	264
8.3.2.3.5.3	La sensibilité aux prix des prestation RSR.....	265
8.3.2.3.5.4	Simulation avec un axe Le Havre-Paris-Dijon-Lyon-Fos-Béziers .....	267
8.4	Synthèse et bilan.....	268
8.4.1	Introduction .....	268
8.4.2	Scénario 1 : des potentialités sur un axe de transit.....	269
8.4.2.1	La pertinence avérée de certains scénarios .....	269
8.4.2.2	L'avantage de la massification .....	270
8.4.2.2.1	Une infrastructure dédiée ? .....	270
8.4.2.2.2	Optimiser l'usage des sillons comme objectif pour la poursuite des projets .....	270
8.4.3	Scénario 2 : la desserte des hinterlands portuaires, une opportunité pour RSR ?	271
8.4.3.1	L'importance d'une répartition géographique favorable des flux captables	271
8.4.3.2	La fréquence de desserte de RSR prise en étau.....	272
8.4.3.3	La prise en charge des conteneurs portuaires par un service RSR.....	273
8.4.4	Scénario 3 : l'efficacité de RSR sur une liaison de franchissement d'un obstacle naturel.....	274
8.4.4.1	Malgré des incertitudes, une pertinence économique avérée.....	274
8.4.4.2	L'affectation de la capacité des infrastructures et la productivité du matériel roulant des problématiques à relier .....	275
8.4.4.3	Dans l'hypothèse d'un itinéraire à grand gabarit, une capacité contributive à l'infrastructure très importante.....	276
8.4.5	Scénario 4 : vers une logique de réseau par l'interconnexion de différentes lignes RSR ? .....	277
8.4.5.1	Effet de réseau .....	277
8.4.5.1.1	Un effet-réseau réel, mais pas systématique.....	277
8.4.5.1.2	Un effet-réseau qui est aussi un effet-distance .....	278
8.4.5.2	Simuler plus en détail l'effet de réseau .....	278
8.4.6	Bilan : une pertinence et des incertitudes qui justifient la poursuite du développement de RSR .....	279
8.4.6.1	Des créneaux de pertinence qui justifient la poursuite des investigations .	279

8.4.6.2	Une évaluation à préciser, des coûts fixes à réduire .....	279
8.4.6.3	Préparer les conditions nécessaires à l'émergence d'innovations dans le fret « durable » .....	280
9.	Mise en perspective .....	282
9.1	Forces, faiblesses, menaces et opportunités du concept R-shift-R .....	282
9.2	Points clés du concept .....	283
9.2.1	Introduction .....	283
9.2.2	Difficultés de conception bogie / gabarit .....	283
9.2.3	Adéquation entre temps disponible en gare et fréquence des rames .....	284
9.2.4	Difficultés de structure : le bridage de la remorque .....	284
9.2.5	Difficultés de fonctionnement : la rupture de charge entre modes .....	285
9.2.5.1	Préambule .....	285
9.2.5.2	Le wagon .....	285
9.2.5.3	Les gares .....	287
9.2.5.3.1	Contraintes incontournables .....	287
9.2.5.3.2	Moyens de manipulation .....	288
9.2.5.3.3	Remarques préliminaires .....	288
9.2.5.3.4	Première approche .....	289
9.2.5.3.5	Deuxième approche .....	289
9.2.5.3.6	Redéfinition des conteneurs embarquables .....	289
9.2.5.3.7	Evolution nécessaire de la gare .....	289
9.2.5.3.8	Description du cycle de fonctionnement .....	291
9.2.6	Difficultés d'évaluation et de comparaison .....	292
9.3	Impacts liés au déploiement du concept .....	293
9.3.1	Avant-propos .....	293
9.3.2	Impacts sur le fonctionnement de l'infrastructure .....	294
9.3.2.1	Etude de trafic .....	294
9.3.2.2	Définition du secteur le plus chargé .....	294
9.3.2.3	Calcul du nombre de rames et des km parcourus .....	295
9.3.2.4	Organisation des convois et des embarquements .....	297
9.3.3	Impacts sur les moyens humains et matériels .....	298
9.3.4	Estimation des investissements .....	303
9.3.4.1	Introduction .....	303
9.3.4.2	Cas d'une ligne isolée .....	304
9.3.4.3	Cas d'un réseau maillé .....	308
9.3.5	Comparaison des besoins en équipements et des coûts au km/wagon par variantes 310	

9.4	Comparaison aux alternatives existantes.....	312
9.4.1	Préambule.....	312
9.4.2	Analyse des paramètres dimensionnants.....	312
9.4.2.1	Nombre de quais.....	312
9.4.2.2	Surface des gares.....	313
9.4.2.3	Nombre de rames.....	313
9.4.3	Analyse du coefficient technologique.....	314
9.4.4	Comparaison entre variantes R-shift-R et un Modèle.....	318
9.5	Définition de pilotes.....	321
9.5.1	Préambule.....	321
9.5.2	Définition des besoins et des compétences.....	321
9.5.2.1	Démonstrateur 3D et maquette.....	321
9.5.2.2	Démonstrateur physique et moyens à affecter.....	321
9.5.2.2.1	Introduction.....	321
9.5.2.2.2	Répartition des compétences.....	322
9.5.2.2.3	Scénarios possibles.....	324
9.5.2.2.3.1	Scénario 1.....	324
9.5.2.2.3.2	Scénario 2.....	326
9.5.2.2.3.3	Scénario 3.....	327
9.5.2.2.3.4	Récapitulatif des engagements financiers suivant les options envisagées.....	328
9.5.2.2.3.5	Phase finale.....	329
9.5.2.3	Poursuite des études.....	329
10.	Conclusions du projet.....	332
11.	Recommandations.....	337
	ANNEXE 1: PANEL D'ENTREPRISES INTERVIEWEES.....	338
	ANNEXE 2: EXEMPLE DE QUESTIONNAIRE UTILISE.....	339
	ANNEXE 3: BIBLIOGRAPHIE.....	355
	ANNEXE 3.1: RAPPORTS ET ETUDES EXISTANTS.....	355
	ANNEXE 3.2: SITES INTERNET CONSULTES.....	356
	ANNEXE 3.3: BASES DE DONNEES ETUDIEES.....	356
	ANNEXE 4: DETAIL DES FLUX ROUTIERS.....	357
	ANNEXE 4.1 : MATRICES O/D FRANCE-FRANCE (INTER REGIONS).....	357
	ANNEXE 4.2 : MATRICES O/D FRANCE-ITA / ESP - PT (ECHANGES).....	357
	ANNEXE 4.3 : MATRICES O/D FRANCE > AUTRES PAYS (ECHANGES).....	358
	ANNEXE 4.4 : MATRICES O/D AUTRES PAYS - FRANCE (ECHANGES).....	358
	ANNEXE 4.5 : MATRICE O/D TRANSIT (TRAVERSEE DE LA FRANCE).....	359

ANNEXE 5 : PLAN DU PRATICABLE .....	360
ANNEXE 6 : PLAN DE LA BALANCELLE .....	361
ANNEXE 7 : PLAN DU PRATICABLE DANS LA BALANCELLE .....	362
ANNEXE 8 : ETUDE DETAILLEE DES CHARGES UTILES.....	363
ANNEXE 9 : ETUDE DETAILLEE DE LA MOTORISATION.....	368
ANNEXE 10 : ETUDE DETAILLEE DU CHASSIS .....	374
ANNEXE 11 : ETUDE DETAILLEE DE LA SUSPENSION.....	379
ANNEXE 12 : ETUDE DETAILLEE DU SYSTEME DE FREINAGE.....	390
ANNEXE 13 : ETUDE DETAILLEE DU CIRCUIT HYDRAULIQUE.....	393
ANNEXE 14 : NOMENCLATURES .....	394
ANNEXE 15 : DIMENSIONS HORS TOUT DU BOGIE ET DU CHASSIS .....	400
ANNEXE 16 : REPRESENTATIONS 3D DES BOGIES .....	403
ANNEXE 17 : RESULTATS DES SIMULATIONS PAR ELEMENTS FINIS .....	412
ANNEXE 18 : ABREGES BREVETS.....	418
ANNEXE 18.1 : ABREGE BREVET REPRISE DE CHARGE .....	418
ANNEXE 18.2 : ABREGE BREVET PORTE CONTENEUR.....	418

## FIGURES

Figure 1 : Vue d'ensemble du concept R-shift-R.....	21
Figure 2 : Enjeux du concept R-shift-R .....	22
Figure 3 : Parties constituantes du concept R-shift-R.....	23
Figure 4 : Tonnes kilomètres réalisés par le fer (source SESP).....	24
Figure 5 : Types carrosserie et camion.....	25
Figure 6 : Trafics France .....	26
Figure 7 : Synoptique d'analyse des flux captables par R-shift-R.....	28
Figure 8 : Principaux axes pour R-shift-R .....	29
Figure 9 : Evolutions des transports (source SESP, fév. 2006).....	30
Figure 10 : Chaîne de transport combiné .....	44
Figure 11 : Chaîne d'autoroute ferroviaire.....	44
Figure 12 : Evolutions du transport combiné (source DGMT) .....	45
Figure 13 : Trafic navette TransManche (source Eurotunnel).....	46
Figure 14 : Tracé de l'autoroute ferroviaire Aiton-Orbassano (source Modalohr).....	47

Figure 15 : Situation des liaisons de transport combiné rail-route au 30 juin 2006 - Liaisons domestiques (source Tableau de bord national du transport combiné, octobre 2006).....	49
Figure 16 : Situation des liaisons de transport combiné rail-route au 30 juin 2006 - Liaisons bilatérales (source Tableau de bord national du transport combiné, octobre 2006) .....	50
Figure 17 : Situation des liaisons de transport combiné rail-route au 30 juin 2006 - Liaisons de transit (source Tableau de bord national du transport combiné, octobre 2006).....	51
Figure 18 : Présentation du concept Cargospeed .....	61
Figure 19 : Présentation du concept Cargo Beamer .....	64
Figure 20 : Présentation du concept Cargo Roo.....	66
Figure 21 : Présentation du concept Flexiwagon .....	70
Figure 22 : Présentation du concept G-2000 .....	72
Figure 23 : Photographie d'un transbordeur pilote et plan d'un chantier COMMUTOR.....	75
Figure 24 : Synoptique du système Modalohr (source Modalohr).....	84
Figure 25 : Schéma d'une rame R-shift-R .....	90
Figure 26 : Structure d'un terminal R-shift-R.....	91
Figure 27 : Utilisation du réseau ferroviaire FRET européen (source Nestear, 2005).....	106
Figure 28 : Evolution de la longueur des lignes ferroviaires françaises exploitées (source Faits et Chiffres 2006 – Statistiques du transport en France, UFR, 2006) .....	107
Figure 29 : Modes de traction ferroviaires (source RFF, 2005).....	108
Figure 30 : Chantiers de transbordement français (source SNCF, 2006).....	110
Figure 31 : Terminaux de transport combiné français (source Tableau de bord national du transport combiné, AJI-Europe / ADEME, Octobre 2006).....	111
Figure 32 : Charge admissible pour le transport de fret (source RFF, 2007).....	114
Figure 33 : Vitesse maximale autorisée sur les différents axes ferroviaires (source RFF, 2007) .....	116
Figure 34 : Coûts externes totaux des modes de transport (source VNF).....	121
Figure 35 : Wagon double R-shift-R chargé d'une semi-remorque.....	126
Figure 36 : Wagon double chargé d'une semi-remorque .....	127
Figure 37 : Praticable R-shift-R .....	127
Figure 38 : Balancelle R-shift-R .....	129
Figure 39 : Caractéristiques routières à considérer .....	131
Figure 40 : Gabarit GB+.....	134
Figure 41 : Garde au rail standard .....	135
Figure 42 : Bogie motorisé / freiné .....	137
Figure 43 : Bogie central motorisé.....	139

Figure 44 : Bogie externe freiné.....	140
Figure 45 : Position haute et basse .....	141
Figure 46 : Bras de suspension et supérieur .....	141
Figure 47 : Dimensions caractéristiques .....	142
Figure 48 : Schéma cinématique .....	142
Figure 49 : Interférences dues aux gabarits.....	145
Figure 50 : Garde au rail standard.....	149
Figure 51 : Schéma cinématique .....	151
Figure 52 : Positions de l’essieu en fonction des positions des bras.....	152
Figure 53 : Position moyenne de l’essieu.....	153
Figure 54 : Essieu représenté sans les dispositifs de freinage ou de transmission.....	153
Figure 55 : Architecture du système de freinage.....	154
Figure 56 : Montage du dispositif de freinage .....	155
Figure 57 : Motorisation d’un wagon.....	156
Figure 58 : Bielle du moteur .....	156
Figure 59 : Schéma cinématique de la transmission de puissance.....	158
Figure 60 : Architecture et montage du motoréducteur .....	159
Figure 61 : Architecture du châssis bogie motorisé et non motorisé .....	160
Figure 62 : Dispositif de reprise des efforts horizontaux des balancelles.....	161
Figure 63 : Balancelle vue de dessous .....	161
Figure 64 : Barre d’attelage de liaison entre deux bogies freinés.....	162
Figure 65 : Bielle de reprise d’efforts .....	163
Figure 66 : Module de gare R-shift-R .....	170
Figure 67 : Zones d’attente.....	172
Figure 68 : Zone ferroviaire .....	175
Figure 69 : Porte praticable .....	177
Figure 70 : Répartition de la charge sur les différents éléments porteurs .....	178
Figure 71 : Version manuelle et automatique de l’automanipulateur .....	179
Figure 72 : Principe de fonctionnement du porte praticable .....	180
Figure 73 : Module de base avec des tiroirs de passage de fosse (schéma n° 1) .....	183
Figure 74 : Module de base avec des tiroirs de passage de fosse (schéma n° 1bis).....	184
Figure 75 : Phases du cycle de manutention .....	186
Figure 76 : Diagramme des temps du cycle de manutention .....	187

Figure 77 : Schématisation d'une gare R-shift-R avec un quai.....	188
Figure 78 : Représentation du scénario 1 (Transit) .....	192
Figure 79 : Représentation du scénario 2 (Hinterland portuaire).....	193
Figure 80 : Représentation du scénario 3 (Franchissement) .....	194
Figure 81 : Représentation du scénario 4 (Interconnections).....	195
Figure 82 : Variante de la gare R-shift-R pour conteneurs .....	290
Figure 83 : Principe d'un quai pour conteneurs .....	291
Figure 84 : Besoins en hommes et matériels suivant les options de trafic.....	302
Figure 85 : Structure de coûts pour une ligne dédiée.....	306
Figure 86 : Répartition des investissements .....	307
Figure 87 : Structure de coûts pour un réseau maillé.....	309

## TABLEAUX

Tableau 1: Evolution du transport ferroviaire national de 2001 à 2005.....	16
Tableau 2: Impacts des modes d'exploitation sur les terminaux .....	58
Tableau 3: Fiche signalétique solution Cargo Speed .....	63
Tableau 4: Fiche signalétique solution Cargo Beamer.....	65
Tableau 5: Fiche signalétique solution Cargo Roo .....	69
Tableau 6: Fiche signalétique solution Flexiwagon.....	71
Tableau 7: Fiche signalétique solution G-2000.....	73
Tableau 8: Fiche signalétique solution Commuter .....	76
Tableau 9: Fiche signalétique solution Arbel.....	83
Tableau 10: Fiche signalétique solution Modalohr.....	88
Tableau 11: Fiche signalétique solution R-shift-R.....	94
Tableau 12: Comparaison des techniques étudiées .....	96
Tableau 13: Objectifs, contraintes et concepts des scénarios de déploiement du concept R-Shift-R.....	125
Tableau 14: Liste et caractérisation des fonctions contraintes .....	136
Tableau 15: Répartition de la charge sur les différents éléments porteurs.....	178
Tableau 16: Récapitulatif des coûts des wagons et de leur entretien retenus dans STEF.....	287
Tableau 17: Flux en fonction des secteurs et définition des sillons nécessaires .....	294
Tableau 18: Flux en fonction des secteurs et définition du secteur le plus chargé .....	295
Tableau 19: Calcul du nombre de rames et des km parcourus.....	296

Tableau 20: Evaluation des besoins en fonction du temps d'arrêt en gare et du nombre de sillons .....	297
Tableau 21: Besoins en hommes et matériels (organisation 1).....	299
Tableau 22: Besoins en hommes et matériels (organisation 2).....	300
Tableau 23: Besoins en hommes et matériels (organisation 3).....	301
Tableau 24: Prix unitaire des constituants R-shift-R .....	304
Tableau 25: Coûts et amortissements à 100 % de trafic sur 24 h une rame toutes les 17 minutes .....	304
Tableau 26: Coûts et amortissement pour 50% du trafic en 24 heures une rame toutes les 34 mn.....	305
Tableau 27: Coûts et amortissements pour 50 % du trafic sur 12 h une rame toutes les 17 minutes .....	305
Tableau 28: Synthèse des calculs pour les 3 cas d'application .....	306
Tableau 29: Distances entre gares .....	307
Tableau 30: Coût d'un transfert O/D.....	307
Tableau 31: Coûts en personnel et équipements pour un réseau maillé.....	308
Tableau 32: Coût du km pour le réseau maillé.....	309
Tableau 33: Synthèse des besoins en équipements et leur influence sur les coûts au km/wagon en fonction de la variante retenue (hors MO) .....	311
Tableau 34: Comparaison du nombre de quais nécessaire pour les trois solutions .....	312
Tableau 35: Comparaison des surfaces requises pour les trois solutions.....	313
Tableau 36: Comparaison sur le nombre de trains à construire pour les trois solutions.....	313
Tableau 37: Feuille de calcul du coefficient technologique (modèle) .....	315
Tableau 38: Feuille de calcul du coefficient technologique des solutions Modalohr, Arbel et R-shift-R.....	316
Tableau 39: Investissement ferroviaire pour 3 types de wagons suivant les paramètres de liaison .....	317
Tableau 40: Contraintes des variantes R-shift-R et d'un Modèle .....	318
Tableau 41: Prix des rames d'un modèle et par variantes R-shift-R.....	319
Tableau 42: Besoins financiers pilote scénario 1 (1 <sup>ère</sup> alternative) .....	324
Tableau 43: Besoins financiers pilote scénario 1 (2 <sup>nde</sup> alternative).....	325
Tableau 44: Besoins financiers pilote scénario 2 .....	326
Tableau 45: Besoins financiers pilote scénario 3 .....	328
Tableau 46: Récapitulatif des engagements financiers suivant les options envisagées .....	328

## 1. CONTEXTE DU PROJET

Depuis les années 1970, le fret ferroviaire français a reculé inexorablement. Le mode ferroviaire ne transporte plus en 2005 que 3,14% des marchandises du territoire national, soit 11,44% des tonnes kilomètres réalisées.

### ÉVOLUTION DU TRANSPORT NATIONAL DE 2001 À 2005 (1)

**tonnes transportées**

*Millier de tonnes*

	2001	2002	2003	2004	2005
Fer	80 910	82 825	78 261	74 243	65 769
Voie navigable	24 775	26 527	27 230	27 500	28 936
Route	1 916 304	1 968 351	1 914 142	2 006 724	1 997 363
<b>Total</b>	<b>2 021 989</b>	<b>2 077 703</b>	<b>2 019 633</b>	<b>2 108 467</b>	<b>2 092 068</b>

**tonnes-kilomètres réalisées**

*Million de tkm*

	2001	2002	2003	2004	2005
Fer	29 874	29 819	27 795	26 572	23 518
Voie navigable	3 594	3 902	4 021	4 163	4 640
Route	168 656	169 956	171 157	179 244	177 447
<b>Total</b>	<b>202 124</b>	<b>203 677</b>	<b>202 973</b>	<b>209 979</b>	<b>205 605</b>

MTETM/SESP, SitraM (SNCF, VNF, TRM)

(1) National : chargement et déchargement sur le territoire national

**Tableau 1: Evolution du transport ferroviaire national de 2001 à 2005**

Paradoxalement, ces difficultés s'inscrivent dans un contexte de développement économique favorable aux échanges et alors même que le développement durable est devenu une préoccupation constante des citoyens. Le CIADT du 18/12/2003 a permis de fixer un certain nombre de projets d'infrastructures visant l'amélioration du système ferroviaire : contournement de Lyon, liaison Lyon Turin, tunnels, LGV,... Ces grands projets posent cependant la problématique de leur financement.

Les solutions actuellement exploitées pour le transport combiné rail-route sur des voies à gabarit normal sont la « chaussée roulante » (Suisse, Autriche) et l'autoroute ferroviaire reposant sur la technologie de wagon surbaissé Modalohr. On peut leur rapprocher la solution grand gabarit mise en œuvre par Eurotunnel entre Calais et Douvres, ou encore les liaisons exploitées en transport combiné de conteneurs par divers opérateurs spécialisés.

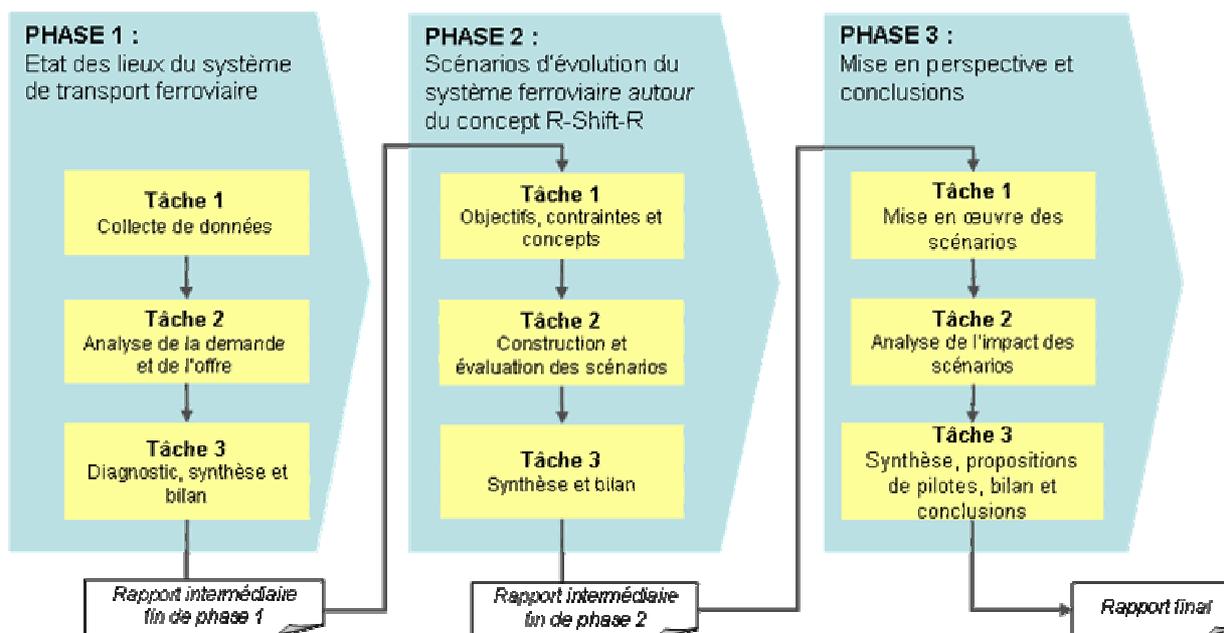
Le concept R-shift-R a donné lieu à une première ébauche de validation économique de son concept sous la forme d'un modèle de simulation. Dans un contexte de réflexion à long terme sur le système de fret ferroviaire, la présente étude aborde la faisabilité de mise en œuvre d'innovations de rupture tel que le concept R-shift-R, ainsi que sa capacité à structurer une offre de fret ferroviaire compétitive, utilisant au mieux les infrastructures existantes et améliorant les possibilités de circulation mixte fret/passager.

## 2. OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif du projet est d'étudier la viabilité du concept R-shift-R, ce qui sous-entend :

- Caractériser de manière détaillée les différents sous-systèmes constitutifs du concept ;
- Le comparer aux alternatives existantes (Modalohr, wagon AFR, ...) ;
- Étudier des scénarios de déploiement et en identifier les enjeux technologiques, infrastructurels, et économiques ;
- Proposer des pilotes.

Dans ce cadre, le projet a été divisé en trois phases réparties sur 18 mois :



Il s'est donc agi :

- De dresser un état des lieux du système de fret ferroviaire en France faisant ressortir l'offre (services, performances et qualités de service, technologies utilisées, utilisables (c'est-à-dire prototypes), infrastructure actuelle et politique d'aménagement, la demande (des clients, opérateurs, gestionnaire d'infrastructure) et leur degré d'adéquation mutuelle ;
- De proposer et d'évaluer des scénarios d'évolution du système de transport de fret ferroviaire construits autour du concept R-shift-R et de variantes organisationnelles (hub...) et technologiques (systèmes d'informations, wagons,...) ;
- De mettre en perspectives les résultats obtenus et de conclure le projet, et notamment :

- Estimer les impacts (social, économique) potentiels liés au déploiement du concept R-Shift-R, et le comparer aux alternatives existantes ;
- Définir des pilotes à mettre en place sous forme de propositions concrètes élaborées pour un trafic identifié avec un ou plusieurs opérateurs ferroviaires et des industriels et mettre en perspective les résultats.

### **3. PARTENAIRES ET COMITE DE PILOTAGE**

Les partenaires du projet R-shift-R sont :

- Le Laboratoire d'Economie des Transports (LET) qui est intervenu pour les aspects méthodologiques, économiques, sociaux et les simulations
- INSA qui a traité les aspects technologiques
- TL & ASSOCIES en tant que coordinateur du projet et pour les aspects logistiques, économiques et environnementaux, la manutention et les SI
- APF en tant qu'inventeur du concept R-shift-R et pour la collecte de données, les évolutions de l'outil de simulation STEF et les phases d'analyses

Afin de valider les résultats des différentes phases et d'apporter toute la caution technique requise pour le déroulement du projet, un comité de pilotage a été créé composé de:

- ADEME : G. Lalevée
- DGMT/PREDIT : M. Julien (GO V), D. de Briey (GO VI), M. Villette (DGMT/SD/MDS), H. Serret (DGMT/DTFC)
- Experts : A. Poinssot, P. Salini, J-C. Raoul

## 4. CONTENU DU DOCUMENT

Ce document constitue le rapport final du projet R-shift-R. Il intègre les éléments suivants :

- Le rappel du contexte et des objectifs du projet
- Une description de la méthodologie mise en œuvre au cours du projet
- Une présentation synthétique du concept R-Shift-R, détaillé par la suite
- Un état des lieux de la situation (*résultat de la phase 1*), intégrant :
  - La synthèse de la demande des acteurs
  - Un point sur l'offre
  - Une étude comparée des principales solutions de ferroutage
  - Une synthèse de la situation et un premier bilan
- La description et l'évaluation de différents scénarios d'évolution du fret ferroviaire autour du concept R-Shift-R (*résultat de la phase 2*), ce qui sous-entend :
  - Le rappel des objectifs, contraintes et concepts devant définir les scénarios
  - La description détaillée des sous-systèmes constitutifs du concept R-shift-R (wagon, train, gare, équipements de manutention, système d'informations)
  - La description et l'évaluation des quatre scénarios retenus
  - La synthèse des résultats d'évaluation obtenus et un bilan
- Une mise en perspectives des résultats obtenus au cours du projet (*résultat de la phase 3*), intégrant :
  - Le bilan des points clés du concept
  - Une estimation des impacts liés au déploiement du concept
  - La comparaison aux alternatives existantes
  - La description de pilotes envisageables
- Les conclusions du projet.

## **5. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE AU COURS DU PROJET**

La méthodologie mise en œuvre au cours du projet a consisté en :

- Une analyse des études et rapports déjà réalisés au niveau français et européen (cf. Annexe 3) notamment utilisée l'état des lieux et la recherche de scénarios,
- Concernant le dimensionnement du marché captable, l'analyse et le traitement des bases de données de flux disponibles (cf. Annexe 4) :
  - Bases SITRAM 2005 pour les trafics intérieurs France (échanges entre départements français) et imports/exports ;
  - Base Transit 2004 pour les trafics Italie-Péninsule Ibérique/France, et Péninsule Ibérique/pays étrangers (transit) ;
- La réalisation d'interviews (cf. Annexe 2 pour un extrait du questionnaire utilisé) d'une vingtaine d'acteurs, chargeurs, transporteurs, opérateurs du ferroutage en France et en Europe (cf. Annexe 1).
- Concernant la conception du wagon R-shift-R, l'utilisation d'outils de design et de calcul assisté par ordinateur ;
- Concernant l'évaluation des scénarios, l'évolution et l'utilisation de l'outil STEF et l'exploitation de la méthodologie du projet Axefret.

## 6. INTRODUCTION AU CONCEPT R-SHIFT-R

Même si le concept R-shift-R est détaillé dans la suite, il semble opportun de le décrire au préalable de manière synthétique.

### 6.1 DES ENJEUX A UNE ARCHITECTURE DE RUPTURE

Innovation de rupture, le concept R-shift-R vise à proposer une solution de transport combiné compétitive et fiable devant permettre de gagner la confiance des chargeurs et des opérateurs et d'offrir aux constructeurs de matériels ferroviaires une perspective de marché, tout en s'inscrivant dans une démarche de développement durable.

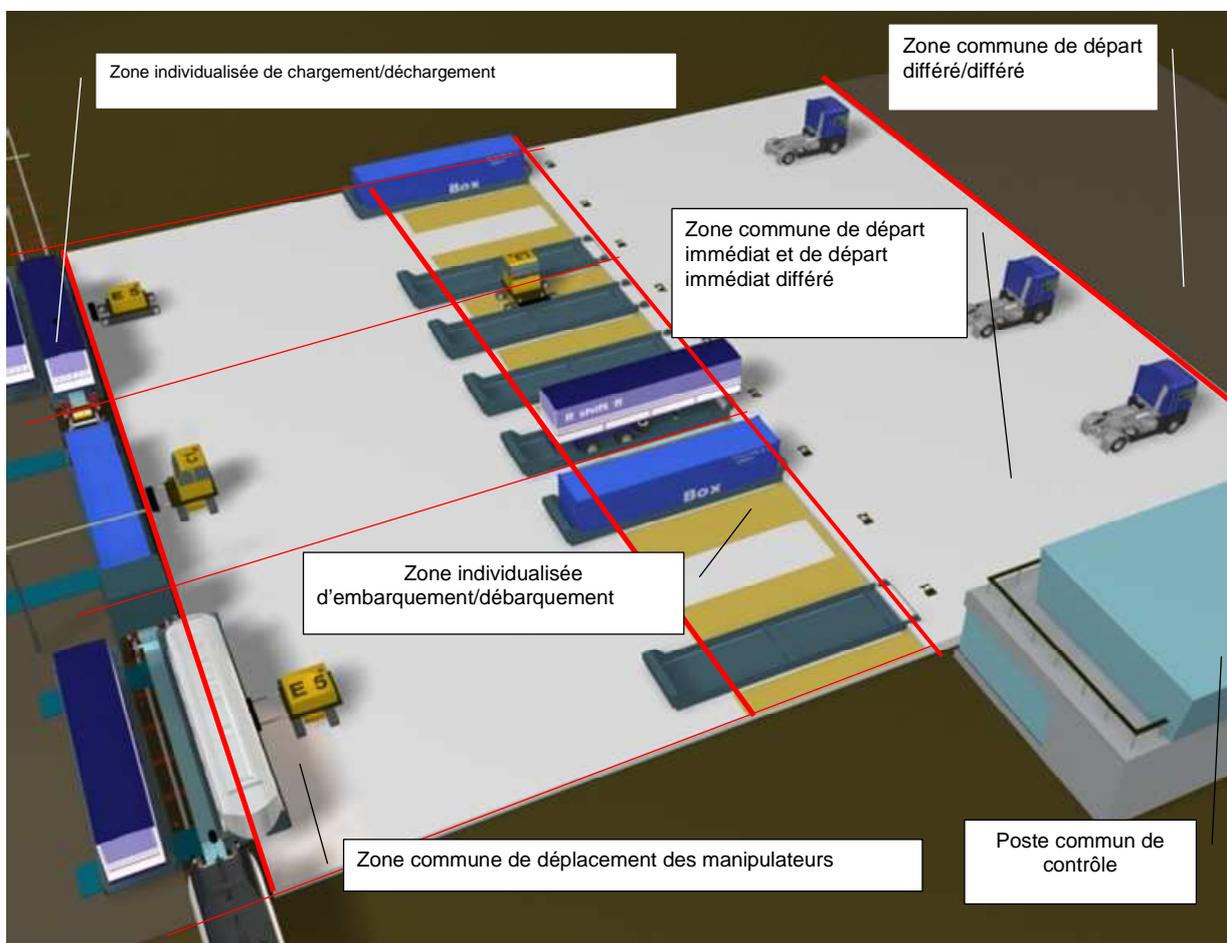


Figure 1 : Vue d'ensemble du concept R-shift-R

D'une manière générale, le concept R-shift-R met en œuvre une architecture de rupture qui doit permettre de répondre aux enjeux du fret ferroviaire.

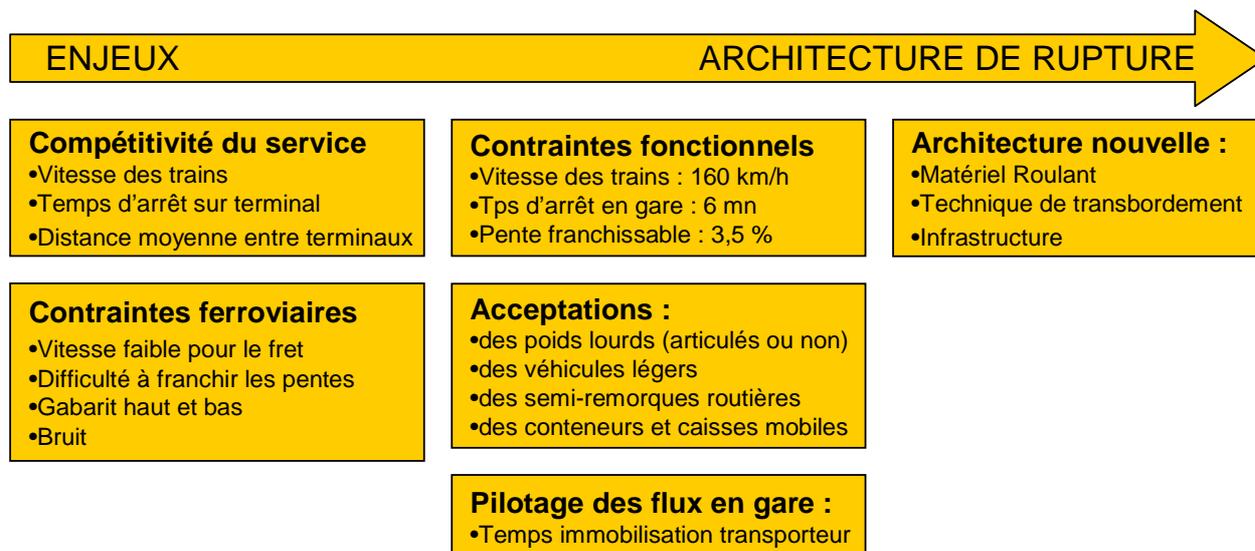


Figure 2 : Enjeux du concept R-shift-R

Le concept R-SHIFT-R présente les caractéristiques suivantes :

- Un même type de wagon susceptible d'embarquer tous les conditionnements utilisés à ce jour par le mode routier,
- Une motorisation permettant de s'adapter en adhérence et en consommation au profil des voies (passage des cols de montagne),
- Un maillage fin du territoire avec des distances entre terminaux pouvant descendre en dessous des 200 kms,
- Une extension géographique vers des zones moins denses tout en restant compétitif,
- Une rotation rapide des rames grâce à la désynchronisation des opérations de chargement/déchargement et d'embarquement /débarquement qui limite le temps d'arrêt sur chantier de transbordement,
- Un pilotage des flux de contenants sur terminal afin de maîtriser les temps d'immobilisation des tractions routières,
- Une minimisation de la ressource surface au sol grâce à :
  - L'automatisation des manutentions,
  - Des temps d'arrêt des trains faibles

L'ensemble de ces caractéristiques doit permettre de proposer un service dont la tarification est comparable à celle de la route.

## 6.2 LES TECHNOLOGIES CONSTITUANTES

Les leviers de la rupture envisagés sont essentiellement technologiques :

- Un wagon monobloc court sans châssis démontable pourvu d'un plateau amovible (praticable) sur lequel est déposé le contenant,
- Un système de portage et de manutention, automatisé ou non, assurant les déplacements sur terminal depuis/vers des travées d'embarquement /débarquement route vers/depus des emplacements rames prés affectés,
- Une propulsion répartie sur chaque wagon,
- Un bogie pourvu d'un mécanisme de variation de hauteur.

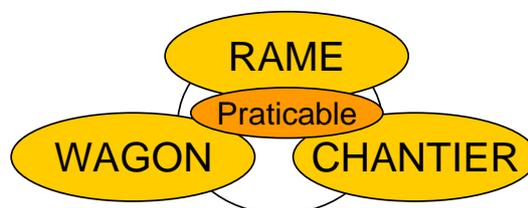


Figure 3 : Parties constituantes du concept R-shift-R

### 6.2.1 LE WAGON

La conception du wagon répond aux contraintes fonctionnelles suivantes :

- Gravier des pentes de 3,5%,
- Utiliser le réseau existant (respecter les contraintes dimensionnelles hautes et basses) avec des remorques de 4,1 m de hauteur,
- Maximiser le nombre de wagons par rame.

### 6.2.2 LA RAME

Une rame doit permettre l'incorporation de 46 wagons.

La puissance répartie sur chaque bogie permet :

- D'améliorer l'adhérence aux rails,
- D'utiliser l'espace classiquement pris par les motrices avec des wagons,
- L'affectation exclusive de la traction au service R-shift-R,
- De fiabiliser la propulsion via la redondance.

### 6.2.3 LE CHANTIER

Le chantier se décompose en trois zones (une zone routière, une zone d'embarquement/débarquement, et une zone de chargement /déchargement), ayant leur fonctionnement propre (organisation, équipement...), plus ou moins automatisé. Leurs gestions peuvent être confiées à des structures différentes.

## 7. ETAT DES LIEUX DE LA SITUATION

### 7.1 ANALYSE DE LA DEMANDE

Les trafics de poids lourds sont en croissance constante et forte. Cette croissance devrait se poursuivre dans les prochaines années. Les flux, outre la charge qu'ils provoquent sur les axes routiers, sont générateurs d'importants rejets de CO<sub>2</sub>. Les solutions de transfert modal représentent une alternative intéressante ; en particulier, les techniques de transport de camions et/ou semi-remorques sur des wagons surbaissés tel que R-shift-R semblent prometteuses. La solution R-shift-R n'a de sens que dans un scénario de rupture quantitative au sein duquel les débits du système de fret ferroviaire sont importants. Afin d'accélérer le report de trafic vers les services d'autoroute ferroviaire, il semble opportun d'identifier les axes disposant d'un potentiel de trafic adapté aux techniques mises en œuvre pour les autoroutes ferroviaires et plus particulièrement la technique R-shift-R. Comme cela sera précisé dans l'analyse de l'offre, la comparaison des techniques R-shift-R avec celles mise en œuvre par Modalohr ou pour le transport combiné « classique » n'a de sens que dans un contexte de forte demande. Elle s'appuiera sur un maillage important de terminaux R-shift-R avec des distances inter chantier de l'ordre de 300 km, voire moins dans un second temps.

#### 7.1.1 LA DEMANDE DE TRANSPORT FERROVIAIRE

Le ferroviaire n'a pas profité de l'explosion de la demande de transport. Seules les marchandises réputées captives ont été conservées par le fer qui n'a pas su conquérir de nouveaux marchés où la fiabilité est primordiale. On observe en effet une stagnation, voire une baisse de la demande effective alors que la demande de transport routier augmente chaque année. Cette différence considérable est essentiellement due aux performances opérationnelles médiocres du fer. Néanmoins, cela permet d'espérer un fort taux de captation des trafics routiers si le fret ferroviaire sort de sa crise de fiabilité de façon durable. Ces prochaines années, les besoins en transport ferroviaire risquent d'évoluer plus rapidement que ceux de la route. Ceci devrait être entraîné par la volonté accrue d'utiliser des modes de transport plus écologiques. De ce fait, même si la qualité de service n'augmente pas sensiblement, il ne serait pas surprenant d'observer une légère hausse de la demande. Par contre, si l'amélioration du service et de la qualité se produit dans les années à venir, la demande en transport ferroviaire pourrait fortement augmenter et reprendre une part importante du trafic routier.

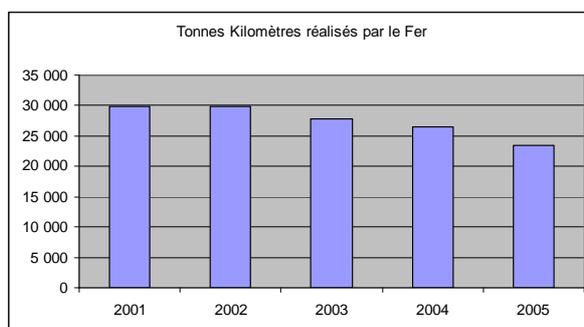


Figure 4 : Tonnes kilomètres réalisés par le fer (source SESP)

## 7.1.2 LES FLUX ROUTIERS CAPTABLES

### 7.1.2.1 Sources de données et périmètre

Les sources de données utilisées pour identifier les axes à potentiel ont été les suivantes :

- Bases SITRAM 2005 pour les trafics :
  - Intérieurs France (échanges entre départements français),
  - Imports et Exports (échanges entre départements français et pays étrangers, sauf France <> Espagne et France <> Italie issus de la base transit 2004).
- Base Transit 2004 pour les trafics :
  - Italie et Péninsule Ibérique avec la France,
  - Péninsule Ibérique vers pays étrangers (transit), et inversement (avec répartition des volumes aux points frontières : Biriadou / Perthuis ou Vintimille pour l'axe Espagne-Italie).

Pas de données disponibles pour les flux Ouest vers Est et inversement (i.e. UK et Benelux vers/à partir Allemagne). Ces flux passent principalement par le Benelux.

### 7.1.2.2 Traitement des bases de données

Lorsque les données sont disponibles en volume et non pas en nombre de trajets, nous sommes passés de l'unité « tonne » à celle de « camion » par le biais suivant : *camion* = tonnes/15 (15t = chargement moyen). Les données ont été filtrées sur la base des types de camion (TYP) et types de carrosserie (CAR). Il est à noter que seuls les véhicules articulés ont été considérés.

CAR	Type carrosserie	PEC ?	TYP	Type camion	PEC ?
1	Bâche Savoyarde rideau	PEC			
2	Bennes	PEC			
3	Fourgons ordinaires	PEC			
4	Fourgons frigorifiques	PEC			
5	Plateaux	PEC			
6	Citernes	PEC			
7	Porte véhicules	NON	1	Porteur (isolé)	NON
8	Porte conteneurs vide	NON	2	Train routier (1+ remorque)	NON
10	Porte conteneurs chargé	NON	3	Articulé (semi remorque)	PEC
12	Autres	NON	4	Train double (semi + remorque)	NON

Figure 5 : Types carrosserie et camion

\*PEC : Pris En Compte

- *France*

La base globale compte 153 841 095 trajets soit 493 080 trajets / jour. Après élimination des trajets intra régions, il reste 31 967 834 trajets, soit 21% du trafic (102 461 trajets / jour). Après élimination des trajets de moins de 200 km (distance entre deux régions), il reste 21 007 707 trajets, soit 14% du trafic (67 332 trajets / jour).

	Trajets/ an	Trajets / jour	%
Base globale	153 841 095	493 080	100%
Sans intra-régions	31 967 834	102 461	21%
Sans moins de 200 kms et sans intra-régions	21 007 707	67 332	14%

Figure 6 : Trafics France

- *Europe*

Les relations régions mitoyennes ou proches d'un pays frontalier ne sont pas prises en compte.

*Remarque*

Les premières études de viabilité du concept R-shift-R ont montré que le paramètre clé conditionnant la part de marché que peut capter R-shift-R est la distance entre les terminaux. Néanmoins, l'étude des flux ne prend pas en compte les trajets de moins de 200 km : même si à terme, il est envisageable que les besoins des clients correspondent à des distances entre terminaux de l'ordre de 100 à 150 km, un premier niveau de maillage sur des distances supérieures est davantage réaliste et doit permettre de déterminer la zone de pertinence (viabilité économique) du concept R-shift-R.

- Des vitesses faibles et des temps d'arrêt important conduisent à privilégier des relations rail sur longue distance.
- Des vitesses de rame élevées et des temps d'arrêt sur terminaux faibles (tels que proposés par la solution R-shift-R) permettent théoriquement de raccourcir les distances entre terminaux.

### 7.1.2.3 Regroupement de pays et comptabilisation

Les règles adoptées ont été les suivantes :

- Au départ d'une région, s'il existe un terminal de chargement/déchargement R-shift-R, on considère que le camion charge sur ce point.
- Pour les autres régions : chargement / déchargement sur les points les plus proches si :
  - Le tronçon ferroviaire représente la majeure partie du trajet,
  - Le tracteur ne revient pas en arrière après déchargement.

Le tableau ci-dessous définit les hypothèses prises. La première ligne par exemple doit se comprendre de la façon suivante : les flux d'origine Allemagne, Lorraine, Alsace sont susceptibles (fonction de leur destination du flux) d'utiliser l'autoroute ferroviaire en chargeant sur un terminal L.A. pour Lorraine Alsace, qui serait situé quelque part en Alsace Lorraine. Néanmoins, étant donné qu'il n'y a pas d'obstacle naturel remarquable entre la France et l'Allemagne, les échanges frontaliers n'ont pas été considérés comme susceptibles d'utiliser l'autoroute ferroviaire.

- LA : terminal Alsace Lorraine,
- ND : terminal dans la région Nord, Dourges par exemple,
- PACA : terminal autour de Marseille,
- RA : terminal autour de Lyon....

GRUPE	PAYS	POINT AF / COMMENTAIRES
Allemagne + Lorraine + Alsace	Allemagne	LA. Non comptabilisé : échanges Alsace Lorraine avec Allemagne (mais même point de regroupement)
Scandinavie	Suède, Norvège, Finlande, Danemark	LA (intégré au groupe Allemagne)
Benelux + Nord France	Belgique, Pays-Bas, Luxembourg	ND. Non comptabilisé : Nord et Picardie avec Benelux (mais même point de regroupement)
Péninsule Ibérique	Espagne, Portugal	BI et LP (le volume Transit mesuré à Biriadou en entrée/sortie France est comptabilisé sur Le Perthus pour une entrée/sortie par l'Italie). Non comptabilisé : Aquitaine, Midi-Pyrénées, Languedoc-Roussillon avec Péninsule Ibérique
Europe centrale	Autriche, Pologne, Rep. Tchèque, Hongrie, Slovaquie, Slovénie	Non comptabilisé dans le transit sauf l'Autriche comptabilisé en entrée/sortie sur l'Italie
Europe du Sud	Malte, Chypre, Grèce	Non comptabilisé
Europe de l'Est	Estonie, Lituanie, Lettonie	Non comptabilisé
UK	Royaume Uni, Irlande	UK (modélisation via Eurotunnel). Non comptabilisés : Nord et Picardie avec UK
Suisse	Suisse	Non comptabilisé
Italie	Italie	Italie. Non comptabilisés : échanges avec les départements 73/74/38/04/05/06
Afrique du Nord	Maroc, Tunisie	PACA (Le flux Nord Sud est supposé s'arrêter au point PACA pour prendre un navire)

### 7.1.2.4 Les axes à potentiel (en terme de transfert rail – route)

La méthode utilisée pour cartographier les axes potentiels est synthétisée ci-dessous.

Elle repose sur:

- La définition des terminaux de chargement/déchargement a priori,
- La définition de suites séquencées de terminaux entre une origine et une destination.

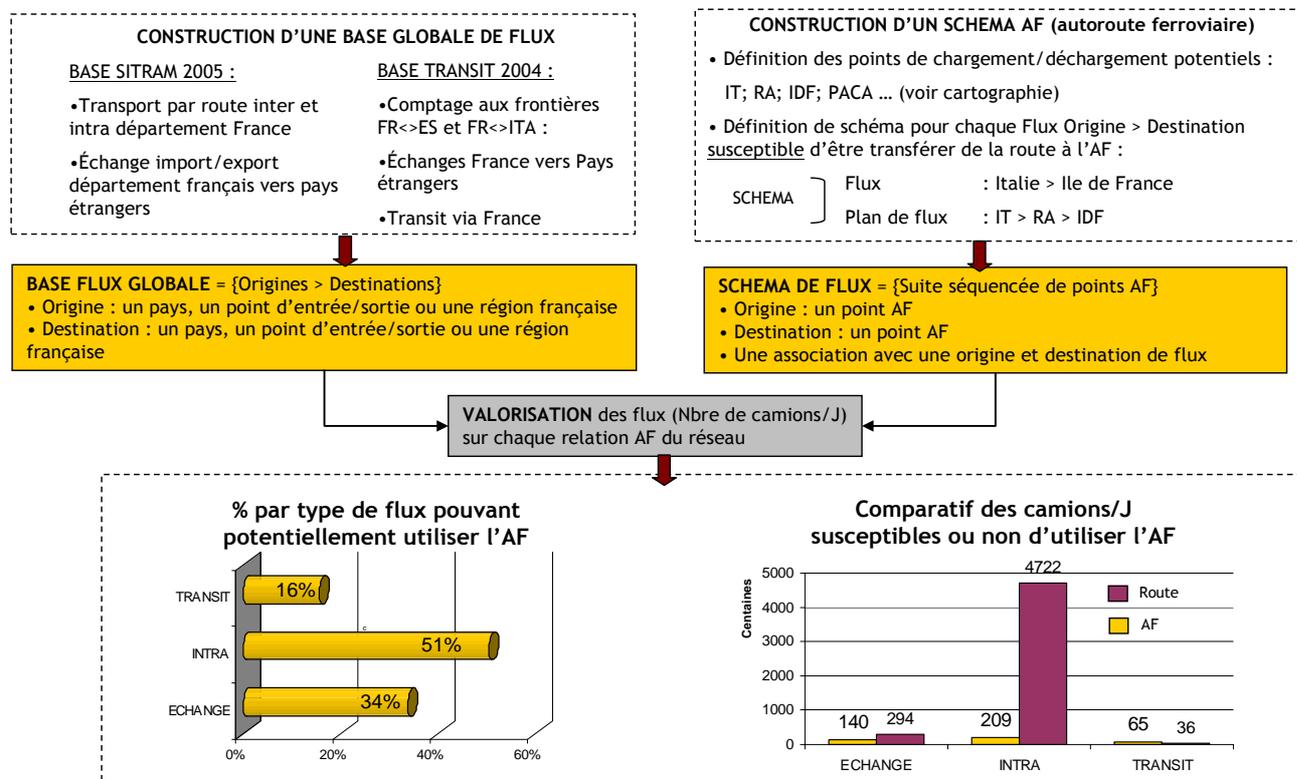
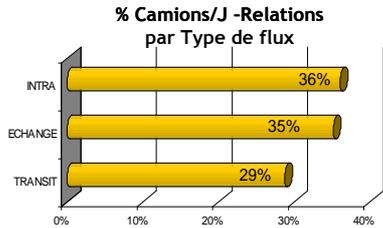


Figure 7 : Synoptique d'analyse des flux captables par R-shift-R

Les axes potentiels identifiés sont représentés sur la cartographie ci-dessous selon deux hypothèses :

- Hypothèse 1 (en bleu): le flux Rhône Alpes <-> Nord/Benelux est suffisant pour éviter un passage par l'IDF.
- Hypothèse 2 (en rouge): le flux Rhône Alpes <-> Nord/Benelux transite par un terminal situé en IDF.

Le détail des matrices origines/destinations utilisées est disponible en annexe 4.



Volumes par segments :

DEPART	ARRIVEE	ECHANGE	INTRA	TRANSIT	Total
AQ	BI	642	0	1241	1883
	CE	1083	617	1083	2783
BI	AQ	629	0	1083	1712
BPL	IDF	320	1182	0	1502
CE	AQ	919	631	1241	2791
	IDF	1518	1930	1083	4531
IDF	BPL	773	3072	0	3845
	CE	1338	1483	1241	4062
	LA	973	1654	502	3129
	ND	2284	1829	1365	5479
	RA	1239	2606	676	4521
IT	PACA	212	0	503	715
	RA	1052	0	429	1481
LA	IDF	1616	1841	486	3942
	RA	664	680	794	2138
LP	PACA	638	0	1537	2175
ND	IDF	3693	2475	1607	7775
	UK	1031	0	680	1711
PACA	IT	287	0	463	751
	LP	605	0	1685	2290
	RA	823	2442	1094	4359
RA	IDF	1401	2425	784	4611
	IT	1060	0	278	1338
	LA	702	654	739	2095
	PACA	611	2448	1190	4249
UK	ND	1124	0	455	1579
Total		27235	27968	22242	77445

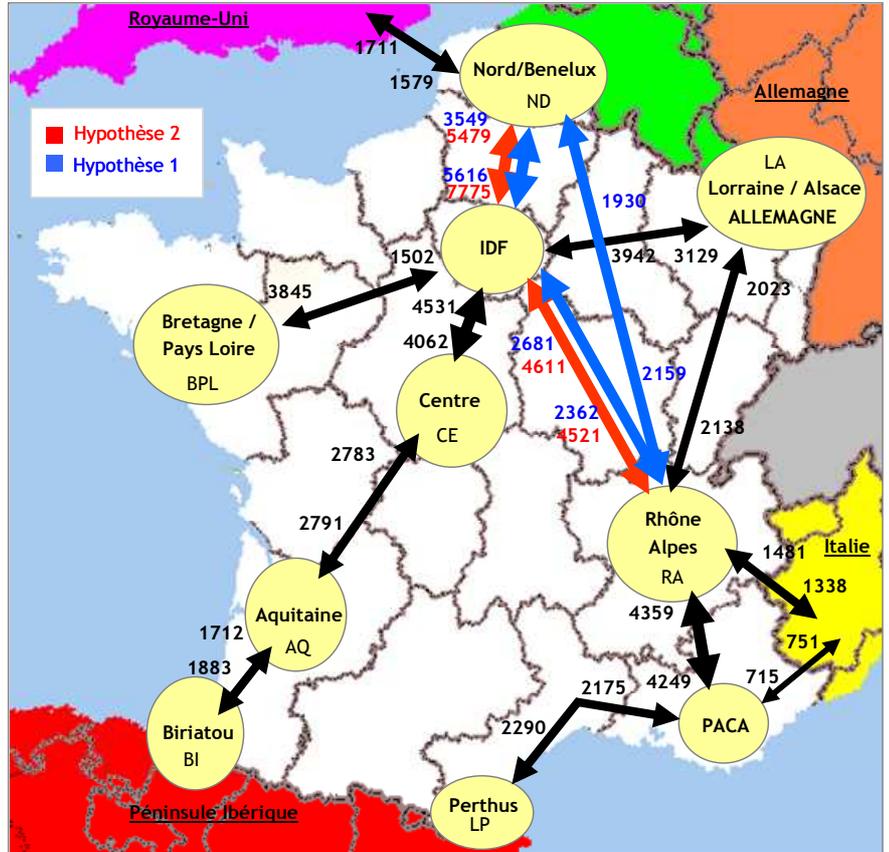


Figure 8 : Principaux axes pour R-shift-R

### 7.1.3 LES CARACTERISTIQUES ATTENDUES DES AUTOROUTES FERROVIAIRES

#### 7.1.3.1 L'élargissement de l'Union Européenne

L'élargissement européen impacte directement le marché des transports routiers de marchandises. L'entrée de pays comme la Pologne, la Hongrie, l'Estonie, la Lituanie, la Lettonie, la Slovaquie, la Slovénie, la République tchèque a aiguisé la concurrence entre pavillons de transport routiers européens. Les transporteurs français ne jouent pas à jeu égal sur le plan de la compétitivité liée au facteur social car la profession française affiche le plus fort coût unitaire de temps de conduite.

Le pavillon français de transport routier a perdu d'importantes parts de marché au profit des étrangers depuis 1999. Le phénomène va s'accroître dans les prochaines années. Aux frontières France – Espagne et France – Italie, le pavillon Espagnol est prédominant (37%), avec une présence de plus en plus importante de pavillons des pays de l'Est (8,5%).

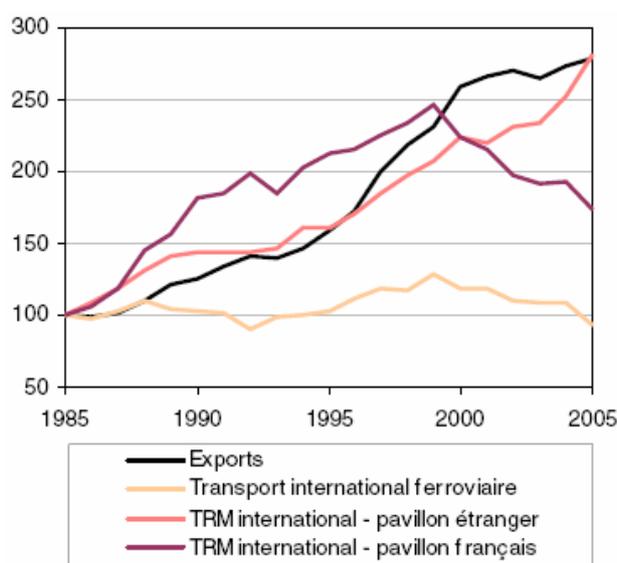


Figure 9 : Evolutions des transports (source SESP, fév. 2006)

#### 7.1.3.2 L'adaptation des entreprises de transport

Les grandes entreprises de transport routier françaises et européennes voient dans ce glissement du centre de gravité de l'Europe vers l'Est une opportunité bien plus qu'un danger. Elles s'implantent chez les "nouveaux entrants" pour offrir leurs services aux nouvelles industries "délocalisées" ou non qui se créent dans ces pays. Il s'agit pour ces entreprises d'accompagner leurs clients et d'effectuer pour leur compte des transports longue distance entre les nouveaux pays membres et les anciens. Mais aussi de capitaliser sur leur savoir-faire et conquérir des parts de marché dans le transport national de ces pays et vers des pays tiers comme la Russie.

### 7.1.3.3 Le renforcement de l'industrialisation du transport

Dans ce nouvel environnement concurrentiel, renforcé au plan national par une pression réglementaire et sociale soutenue. Les grandes entreprises de transport routier françaises renforcent plus que jamais des modes d'organisation privilégiant des tractions sur de courtes distances (de 150 à 300 Km). Les plans de transport établis par les grands prestataires de services à l'échelle du territoire national et européen donnent désormais la préférence à des organisations en "relais conducteurs" au détriment des conducteurs longue distance. L'aspect stratégique et rémunérateur pour eux n'est pas (ou plus) le transport mais bien le pilotage des flux et tous les services logistiques connexes tels que le stockage, la préparation de commandes, le co-packing, le kiting,...

Les chaînes de transport de type "relais" sont formées de plusieurs maillons matérialisés par un couple "conducteur-camion" - chaque maillon représentant 4h30 de conduite (soit de l'ordre de 350 Km parcourus) et bornés par 45 minutes de temps de coupure obligatoire. A la fin de chacun des temps de parcours, les semi-remorques sont dételées et échangées entre un conducteur "montant" et un conducteur "descendant", chacun d'eux rebroussant alors chemin de telle sorte qu'à l'échelle d'une journée de travail, le temps de conduite d'un conducteur n'excède pas les 9 heures réglementaires et n'induit pas de frais de découché dans la mesure où il rejoint sa base d'origine. L'avantage de cette organisation en relais est double, à savoir mettre le transporteur en conformité avec la réglementation (sociale, routière) en vigueur sur le territoire français et d'améliorer la productivité des moyens de production. Sur ce deuxième point, il est à noter par exemple qu'un tracteur affecté à une organisation de type relais va effectuer entre 1.000 et 1.200 Km par jour tandis qu'un tracteur confié à un "grand routier" n'excédera pas les 600 Km journaliers. Les frais de découchés attribués à un conducteur "grand routier" seront économisés. Au plan opérationnel, les relais conducteurs vont également permettre des temps d'acheminement plus courts ainsi que des départs quotidiens ; ce qui peut être onéreux (démultiplication des moyens), voire impossible, dans le cadre d'une organisation "grand routier".

Ce type d'organisation de transport ne peut cependant s'appliquer qu'à des échanges réguliers et "planifiables". Tout ce qui relève de transports "spot" n'est pas concerné.

S'agissant de l'organisation du système d'exploitation utilisant le service d'autoroute ferroviaire, on peut identifier trois types de rayons d'action autour des points de chargement/déchargement (définissant les pré et post-acheminements) dont les deux premiers paraissent plus particulièrement pertinents :

- *Rayon d'action à courte distance (60 à 80 Km) de pré acheminement*

Il s'agit préférentiellement d'un service non accompagné, l'accompagné n'ayant dans ce cas que peu de pertinence économique. Les professionnels se focalisent alors sur l'intensification de la rotation des tracteurs routiers. Dans une telle configuration, c'est le temps d'attente sur terminal qui oriente la productivité. Ils souhaitent dès lors une fréquence élevée du service d'autoroute ferroviaire (avec un seul tracteur, plusieurs remorques sont déposées ou reprises dans la journée). Ici, le retour à vide peut être accepté dans la mesure où le différentiel d'activité dans le temps s'équilibre, l'équilibrage étant davantage recherché à l'échelle de la semaine.

- *Rayon d'action entre 250 et 350 Km de pré acheminement*

Selon le réseau routier utilisé, cette distance peut être équivalente aux 4h30 de conduites réglementaires avant une première période de repos obligatoire. Il s'agit là encore d'un service "non accompagné". Dans ce cas, le retour à vide est difficilement accepté. Il faut donc qu'il y ait un équilibre des flux (une dépose de remorque doit entraîner une reprise) ou une capacité de récupérer du fret à proximité du point de chargement/déchargement, des triangulaires/repositionnements doivent être recherchées.

- *Rayon d'action situé au-delà de 350 Km*

Un service d'autoroute ferroviaire perd beaucoup de son intérêt puisqu'il ne s'inscrit pas dans les schémas logistiques classiques du transport routier de marchandises (gestion des temps de coupure, temps de conduite, relais conducteurs, recherche systématique de triangulaires pour des trafics non réguliers ou déséquilibrés,...). Il reste néanmoins pertinent dans le cas de passage d'obstacles naturels.

Le recentrage du métier de transporteur sur la courte distance est donc cohérent avec la mise en œuvre d'un système d'autoroute ferroviaire et plus particulièrement tel que R-shift-R où la distance conventionnelle des 600 kms pour le tronçon ferroviaire pourrait être envisagée à 200 kms, voire moins. En effet, des fréquences de départs de rame élevées avec des vitesses commerciales élevées offriraient la possibilité de « mettre au fer » les camions en se rapprochant de la facilité de les « mettre à la route ». Les différentes interviews réalisées dans le cadre du projet avec des acteurs du transport ont néanmoins montré que le repositionnement des chauffeurs sur la courte distance n'est pas toujours souhaité.

Les transporteurs réalisent différents types de transport par couple tracteur-semi remorque:

- Lots (> 70%) : marché le plus favorable, un service d'autoroute ferroviaire est bien adapté,
- Frigo (env. 10%) : captable par un service d'autoroute ferroviaire, mais avec des semi-remorques standards,
- Messagerie (< 5%) : captable par un service d'autoroute ferroviaire uniquement si le service est fiable,
- Autres : bennes, citernes, plateaux (total env. 15%) : captable par un service d'autoroute ferroviaire.

Les sociétés concernées sont aussi bien les petites que les grosses entreprises de transport. Les pavillons des transporteurs sont fonction de l'axe concerné (pavillons bilatéraux, majoritaire souvent celui à plus bas coût, voire pavillons tiers).

Les intérêts des chargeurs et des transporteurs peuvent se rejoindre dans la mesure où le choix du mode de transport se fait principalement selon le coût de transport de bout en bout, ainsi que sur la fiabilité et la régularité du service (mais très peu encore sur l'aspect environnement car pas ou peu de contraintes aujourd'hui). Leurs motivations peuvent néanmoins être différentes. Pour les chargeurs, l'image « développement durable » a davantage de poids. Pour les transporteurs, ces derniers veulent être assurés que leur remorque arrivera dans le délai imparti.

#### **7.1.4 LES AXES DE TRANSPORT SOUHAITES**

Les axes de transport souhaités par les différents acteurs rencontrés concernent :

- Le franchissement d'obstacles naturels, avec des prolongements vers les grands pôles d'activité :
  - Transmanche,
  - Transalpin,
- La longue distance (traversée de la France, entre grands pôles d'activité) :
  - Bretagne et Pays de la Loire <> Ile De France (IDF)
  - Nord (Benelux, Royaume-Uni, Allemagne, régions au nord de France, au-dessus de l'IDF)
  - Echanges Sud-Est (Lyon / Marseille, possibilité de rejoindre l'Italie et l'Espagne)
  - Echanges Sud-Ouest (Bordeaux, possibilité de rejoindre l'Espagne et le Portugal)

## 7.1.5 LES SYSTEMES D'AIDE

Les aides possibles au lancement d'un pilote R-shift-R peuvent être nationales et Européennes.

### 7.1.5.1 Les aides Européennes

#### 7.1.5.1.1.1.1 MARCO POLO

Le programme MARCO POLO (2003 – 2006) a financé trois types d'actions :

- Aide au démarrage de nouveaux services de fret non routier devant être viables à moyen terme. Les coûts de création d'un nouveau service pouvaient être cofinancés à hauteur de 30 %,
- Soutien au lancement de services ou de systèmes d'intérêt stratégique pour l'Europe : par exemple, la création d'autoroutes maritimes ou de services internationaux de fret ferroviaire de qualité. Ces actions devaient modifier la manière de pratiquer le transport de fret non routier et d'exploiter les réseaux transeuropéens de transport ou les corridors paneuropéens. Le montant maximal de l'aide était de 35 %,
- Stimulation de comportements de coopération sur le marché de la logistique du fret. Le montant maximal était de 50 %.

Le programme MARCO POLO 2 (2007 – 2013) a été lancé par un premier appel à proposition le 28 Mars 2007.

L'enveloppe du programme, de l'ordre de 400 M€ suivra une répartition comme suit :

- Autoroute de la mer : 39 %,
- Innovation : 21 %,
- Autres opérations favorisant le report modal : 19%,
- Développement de synergies entre le rail et les autres modes : 13%,
- Le reste est dédié à la dissémination des résultats et à la communication.

#### 7.1.5.1.1.1.2 FEDER

Le Fonds européen de développement régional (FEDER) est un des quatre fonds structurels de l'Union européenne.

La Communauté doit, afin de renforcer la cohésion économique et sociale dans l'Union européenne, réduire l'écart entre les niveaux de développement des diverses régions et le retard des régions ou des îles les moins favorisées, y compris les zones rurales et ce, notamment par l'octroi d'aides financières accordées par l'intermédiaire du FEDER. En effet, la mission essentielle de ce fonds est de « contribuer à la correction des principaux déséquilibres régionaux dans la Communauté » (article 160 C TCE) en soutenant financièrement : les objectifs prioritaires régionaux n°1 et 2 des fonds structurels fixé par le Conseil (article 2 §2 du règlement n°1260/1999 du 21 juin 1999 portant dispositions générales sur les fonds structurels publié au JO L 161 du 26 juin 1999, p. 43) :

- Certaines initiatives communautaires,
- Des actions innovatrices.

Les actions innovatrices sont prévues par l'article 4 du règlement du FEDER. Ce sont des projets pilotes ou des stratégies innovantes décidés et gérés par la Commission européenne. Elles jouent le rôle de laboratoire d'idées pour le développement régional en permettant l'expérimentation, à une petite échelle, de voies nouvelles dans ce domaine. Lorsque cette expérimentation s'avère concluante, les projets peuvent être généralisés en étant repris dans les stratégies des objectifs prioritaires. Pour la période 2000-2006, elles portaient sur trois thèmes stratégiques :

- L'économie régionale fondée sur la connaissance et l'innovation technologique,
- L'e-Europe : la société de l'information au service du développement régional,
- L'identité régionale et le développement durable.

Cinquante huit programmes d'actions innovatrices ont ainsi été approuvés par la Commission dans douze Etat membres. Le montant de leur financement pour la période 2002-2004 s'est élevé à 150 millions d'euros.

### 7.1.5.2 Les aides Nationales

#### 7.1.5.2.1.1.1 La réduction de la taxe à l'essieu

Cette réduction est en vigueur depuis 1998. Les véhicules de 12 tonnes et plus de PTAC utilisant un système mixte rail-route peuvent bénéficier d'une réduction de la taxe à l'essieu de 75%. Cette aide s'applique également aux camions empruntant l'autoroute ferroviaire.

#### 7.1.5.2.1.1.2 Mesures réglementaires en faveur du transport combiné

Autorisation du PTAC 44 tonnes depuis 1986. Il s'agit d'une dérogation (44 tonnes au lieu de 40 tonnes) accordée aux camions effectuant des pré et post acheminement.

#### 7.1.5.2.1.1.3 La subvention d'exploitation à la SNCF

Supprimée en 2003 pour être remplacé par une aide fournie directement aux opérateurs, cette dernière est accordée par l'état depuis 1995. Cette subvention a pour objectif de compenser le différentiel de coût externe entre la route et le transport combiné.

#### 7.1.5.2.1.1.4 La subvention à l'exploitation de l'AFA

Cette subvention de 12 M€ par an couvrait la phase d'expérimentation jusqu'en 2006.

#### 7.1.5.2.1.1.5 La subvention d'exploitation et au démarrage

Cette subvention, valable jusqu'en 2007, constitue un système d'aide aux opérateurs de transport combiné (ferroviaire, fluvial, cabotage maritime). Le montant était en 2005 de 12 €TTC par « coup de pince ».

#### 7.1.5.2.1.1.6 Les aides à l'investissement fournies par l'état

- Financements d'études préliminaires ou avant projets dans les ports autonomes,
- Accompagnement de la réforme des voies ferrées,
- Extension/Modernisation/construction de chantiers de transport combiné rail route et fleuve route,
- Aide au développement des autoroutes ferroviaires.

#### 7.1.5.2.1.1.7 Aides de l'ADEME

- A la décision par le financement d'études d'opportunité
- A l'acquisition de matériels dédiés au transport combiné
- Aux opérations exemplaires ou de démonstration
- A la réalisation de diagnostics énergétiques préalables

##### 1/ Aide à la décision, sous forme d'aide financière accordée :

- Aux entreprises de transport, pour la réalisation d'études de faisabilité du passage au transport rail/route ou route/fluvial ou bien préalablement au lancement de nouvelles lignes de transport maritime courte distance (taux d'aide de 50% pour un coût des études plafonné à 75 000 euros).
- Aux chargeurs, pour leur permettre d'identifier les incidences et l'opportunité d'un passage en transport combiné (taux d'aide de 50% pour un coût des études plafonné à 75 000 euros).

##### 2/ Aides à l'investissement, sous forme d'aide financière accordée :

- Aux entreprises de transport, pour l'acquisition de matériel dédié au transport combiné rail-route (caisses mobiles, semi-remorques à prise par pince, châssis porte caisse mobile - dans la limite d'un châssis pour deux caisses mobiles -, matériel de transbordement...)
- Aux chargeurs souhaitant transférer tout ou partie des flux de fret qu'ils génèrent de la route au transport combiné rail-route ou route-fluvial, pour l'acquisition de matériel roulant dédié au transport combiné ainsi que sur les matériels de transbordement
- Soutien aux opérations de démonstration (taux de référence: 30%, taux plafond: 40%, surcoût HT de l'investissement plafonné à 5 M€) et aux opérations exemplaires de transfert modal (taux de référence: 20%, taux plafond: 30%, surcoût HT de l'investissement plafonné à 1 M€).

##### 3/ Aide à la réalisation de diagnostics énergétiques préalables

Ce type d'aide vise à favoriser la réalisation d'économies de consommation de carburant et d'énergie par les exploitants de bateaux de navigation intérieure.

Ces diagnostics concernent l'étude du groupe motopropulseur, l'hélice -gouverne, l'expertise sommaire de la coque, la gestion optimale de l'électricité, la récupération de chaleur pour le logement et l'isolation du logement.

Ces aides sont exclusivement attribuées à des PME (<250 personnes et CA annuel <40 M€, ou total du bilan annuel < 27 M€). Le taux d'aide proposé est de 50% du coût du diagnostic avec un montant de ce dernier plafonné à 30 000 euros.

La subvention s'élève à 20% pour le développement de l'activité de transport combiné (25% pour les nouveaux accédants) et est subordonnée à des engagements sur les volumes de trafic sur une période de 5 ans (dans la limite de 100 euros par tonne de carbone évitée). Le coût HT des investissements est plafonné à 1M€.

La subvention est accordée quelle que soit le mode de financement retenu (crédit-bail...) sous la forme d'une aide directement distribuée par les délégations régionales de l'ADEME, (parfois en cofinancement avec le conseil régional concerné).

#### 7.1.5.2.1.1.8 Les certificats d'économie d'énergie

Le principe des Certificats d'Economie d'Energie (CEE) repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par les pouvoirs publics sur une période donnée aux vendeurs d'énergie (électricité, gaz, chaleur, froid et fioul domestique) comme EDF, GDF et les réseaux de chaleur. La loi d'orientation sur l'énergie du 13 juillet 2005 (dite loi « POPE »), dont les décrets d'application sont parus au JO du 27 mai 2006, impose aux fournisseurs d'énergie qui vendent plus de 400 GWh par an (EDF, GDF,...) d'économiser 54 TWh cumac (milliards de kWh) sur la période allant du 1er juillet 2006 au 30 juin 2009, soit 0,8% de la consommation totale. Cette période expérimentale de 3 ans a été décidée de manière à laisser à tous les acteurs un temps « d'apprentissage ». A l'issue des 3 ans, comme le prévoit la loi, un rapport analysant les résultats sera publié. Les fournisseurs d'énergie ont trois solutions pour satisfaire à ces obligations:

- Réaliser ces économies dans leurs propres bâtiments ou installations,
- Inciter leurs clients à réaliser des économies d'énergie (par le biais par exemple d'incitations financières),
- Acheter des certificats auprès d'autres acteurs.

Si les vendeurs d'énergie ne parviennent pas à remplir leur obligation dans le temps impartie, ils devront s'acquitter d'une pénalité libératoire, basée sur un cumul de kWh non économisés, dont le montant ne pourra excéder 2 c€/kWh.

La première « opération standardisée » donnant droit à un CEE dans le transport de marchandises porte sur le combiné rail-route. Un transporteur, loueur ou opérateur faisant l'acquisition d'UTI neuves pourra déposer un dossier de demande de CEE à la DRIRE concernée sur présentation notamment des factures d'achat et d'un relevé de trafic donnant le nombre de voyages réalisés par UTI concernée au départ ou à l'arrivée d'au moins un chantier de transport combiné localisé en France, sur une période d'essai de 12 mois consécutifs (à réaliser avant le dépôt de dossier de demande de CEE). Ce dossier doit justifier au minimum 1 GWh cumac d'économie d'énergie. Ces certificats pourront ensuite être négociés directement avec les entreprises obligées (fournisseurs d'énergie) ou sur un éventuel marché d'échange de CEE. A titre indicatif, l'achat de deux grandes UTI (caisses mobiles de 13,6m), ayant réalisé chacune en moyenne 50 voyages en rail-route, pourra prétendre à la délivrance d'un certificat de 1,6 GWh (le montant de certificats est de 16000 kWh cumac par voyage pour une UTI d'une longueur  $\geq$  9m). Sur la base d'1 c€ le kWh, le certificat pourrait alors être valorisé à 16 000 € (soit 8 000 € par UTI).

#### 7.1.5.2.1.1.9 L'agence de l'innovation industrielle

L'intervention de l'Agence se déploie dans de très larges domaines. A titre d'exemples on peut indiquer la santé, les systèmes d'information et de communication et leurs applications, le bâtiment, les transports, la chimie, l'énergie et l'environnement.

L'Agence doit par son action susciter, identifier et sélectionner des Programmes Mobilisateurs pour l'Innovation Industrielle (PMII), participer à leur financement et procéder à leur contrôle et à leur évaluation périodique.

L'AII sélectionne et aide les initiatives qui viennent des entreprises, et qui ont pour objectif la conception et la production d'un produit, équipement, système ou service nouveau et innovant impliquant une rupture technologique, avec la perspective d'un marché mondial et l'ambition d'une part de marché significative.

Les aides de l'Agence visent à partager le risque pris par les entreprises lors du lancement de programmes très innovants.

L'AII vient compléter le dispositif français d'aide à la recherche et à l'innovation en orientant son action vers des programmes de grande envergure qui mobilisent autour d'un chef de file des partenaires tant privés que publics. L'AII se situe dans le paysage français de l'aide à l'innovation en aval de l'ANR, et sur des programmes significativement plus importants que ceux aidés par OSEO.

Ce caractère mobilisateur favorise la prise en compte par l'industrie des innovations issues de laboratoires publics et des PME innovantes. Pour remplir ses objectifs, l'Agence a été dotée à la fin de 2005 d'un capital de 1,7 milliard d'euros destiné à couvrir ses besoins d'intervention pour 2006 et 2007.

L'AII a mis en place un dialogue progressif et interactif qui lui permet de bien intégrer les objectifs des industriels. L'instruction des projets s'organise en trois étapes :

##### *1<sup>ère</sup> étape : présentation orale*

L'Agence demande une présentation orale du projet, lors de laquelle en sont exposées les dimensions technologique, industrielle, organisationnelle et de marché, de même que ses impacts sociaux et environnementaux. Cette présentation est menée par le chef de file et intègre les contributions des différents partenaires dont les PME et organismes de recherche impliqués. Le chef de file explique aussi en quoi l'aide de l'Agence présente pour le projet un caractère incitatif, en particulier par l'effet mobilisateur sur les partenaires et par l'accroissement de leur effort de recherche.

##### *2<sup>ème</sup> étape : soumission du dossier écrit*

Une fois l'éligibilité du projet de PMII confirmée par l'AII, en fonction du succès de la présentation orale, le chef de file soumet le dossier de demande d'aide. Il comporte une partie juridique, administrative et financière, ainsi qu'une partie technique et économique donnant la description détaillée du programme et des objectifs de marché, selon un plan-type indiqué par l'Agence. La construction d'un PMII inclut la définition d'objectifs précis et d'étapes clés, avec la possibilité de réorienter les travaux si les besoins des utilisateurs ou les contraintes technologiques évoluaient. Les conditions d'arrêt du programme en cas d'échec sont également définies. La proposition indique l'ensemble des ressources nécessaires au bon déroulement du programme, pour les étapes susceptibles d'être aidées (R&D amont,

développements expérimentaux), ainsi que celles nécessaires au déploiement industriel et commercial. Le chef de file indique également les cadres d'aides, nationaux ou européens, déjà mis à contribution par les participants au PMII : ANR, OSEO, ADEME, PREDIT, pôles de Compétitivité, PCRD, MINEFI (FCE, EUREKA, etc.), collectivités territoriales, etc.

*3<sup>ème</sup> étape : instruction de la proposition*

L'AII a mis en place les critères d'évaluation des propositions :

- Les composantes d'innovation et la position compétitive en vue,
- La qualité et la taille du marché visé,
- Le modèle d'affaires et la part de marché visée par les partenaires,
- L'incitativité de l'aide demandée,
- La qualité de l'organisation et du plan de développement,
- Les risques, leur maîtrise et le processus de validation des résultats,
- Les retombées en termes d'emplois de R&D et d'emplois industriels,
- Les lieux d'implantation de la R&D.

## 7.2 ANALYSE DE L'OFFRE

### 7.2.1 LES ACTEURS

Le secteur du transport ferroviaire est structuré autour de différents acteurs aux rôles complémentaires :

- L'entreprise ferroviaire, qui fournit les services de traction ferroviaire incluant la locomotive, le conducteur,
- L'opérateur de transport combiné rail-route qui achète des trains complets au tractionnaire ferroviaire,
- Le gestionnaire de l'infrastructure, qui assure la maintenance du réseau ferroviaire incluant notamment les voies ferrées au niveau des plates formes et gère les sillons,
- L'exploitant de plate-forme, propriétaire des équipements de chaque plate-forme rail-route pour le transport combiné, qui assure en général les opérations de manutention,
- Le commissionnaire de transport, société de transport ayant pour tâche d'organiser et de proposer à ses clients chargeurs une prestation en porte-à-porte,
- Le tractionnaire routier, qui effectue les opérations de pré et post-acheminement.

Hormis la SNCF, l'accès au réseau ferré national a été étendu :

- Aux regroupements internationaux d'entreprises ferroviaires de la Communauté européenne pour le trafic de transit, sans desserte du territoire national,
- Aux entreprises ferroviaires établies dans un Etat membre de la Communauté européenne pour l'exploitation des services de transport combiné internationaux,
- Depuis Mars 2003, aux entreprises ferroviaires du réseau Transeuropéen de fret ferroviaire (directive 2001/12/CE).

La libéralisation du transport de fret ferroviaire se traduit par l'arrivée de nouveaux acteurs sur le territoire national (tractionnaires ferroviaires dédiés au fret en particulier). En effet, Mars 2006 a marqué la fin du monopole de Fret SNCF sur les trafics. Plusieurs entreprises ont obtenu un certificat de sécurité pour circuler sur tout ou partie du réseau ferré national. C'est le cas notamment de :

- Veolia Cargo,
- Europorte 2,
- Rail4Chem,
- B-Cargo (filiale de la SNCB),
- Euro Cargo Rail (filiale de l'opérateur privé britannique EWS),
- CFL (Chemins de Fer Luxembourgeois),
- Secorail.

Entreprise ferroviaire	Date de délivrance du certificat de sécurité	Date de lancement du service commercial
EUROPORTE 2	22 octobre 2004	Pas de service commercial
VEOLIA CARGO	27 novembre 2006	13 juin 2005 (sous l'appellation CFTA-Cargo)
ECR	1er décembre 2006	13 mai 2006 (sous l'appellation EWSI)
CFL	29 mars 2006	19 décembre 2006
B-CARGO	3 février 2006	11 décembre 2006
SECO-RAIL	1er décembre 2006	8 janvier 2007
RAIL4CHEM	27 janvier 2006	Pas de service commercial

Cette libéralisation commence à se traduire dans les faits. Ainsi, la société Véolia Transport exploite des trains entiers depuis juin 2005 au départ de Dugny (Meuse) en direction d'aciéries allemandes et depuis octobre 2005 entre Golbey (Vosges) et l'Allemagne. Depuis fin 2005, des trains gérés par EWSI empruntent également le réseau national. SECO-RAIL (filiale de COLAS) a également obtenu sa licence ferroviaire. Toutefois, aucune nouvelle entreprise ferroviaire ne propose pour l'instant de service de traction destiné au transport combiné. Il semble que la lourdeur des procédures d'octroi des licences et des procédures de sécurité ralentisse les opérateurs qui désirent entrer sur le marché ferroviaire et en particulier sur celui du transport combiné. Cette situation devrait évoluer courant 2007 à la suite des appels d'offre effectués par certains opérateurs de transport combiné auprès des entreprises ferroviaires historiques et des nouveaux entrants.

D'autre part, seuls les demandeurs « autorisés », c'est-à-dire les tractionnaires, peuvent profiter de nouvelles licences de transport ferroviaire et de l'accès direct aux sillons. La mission de contrôle des activités ferroviaires réfléchit à la possibilité d'élargir, sous certaines conditions, le champ des titulaires de sillons, sans exiger de ceux-ci la réalisation directe de la traction. Plusieurs nouvelles catégories de « candidats autorisés » sont envisageables, dont les ports autonomes, les chargeurs et les opérateurs de transport combiné.

## 7.2.2 LES ORGANISATIONS

### 7.2.2.1 Le trafic ferroviaire français

Le trafic ferroviaire de marchandises français peut être décomposé à travers principalement deux modes d'organisation :

- Le transport conventionnel en trains entiers ou en wagons isolés,
- Le transport combiné.

C'est essentiellement la nuit que les trains de transport combinés circulent à des vitesses supérieures à 100 km/h. On parle souvent de « saut de nuit » pour décrire un train partant le soir et arrivant en gare de destination le lendemain matin. Les entreprises ferroviaires et les opérateurs privilégient les trains directs (complets) qui permettent notamment d'éviter les mouvements de wagons dans les gares de triage. Des wagons peuvent être ajoutés ou retirés au sein du terminal. Si la composition du train est figée, on parle alors de train-navette.

Le réseau de transport combiné s'appuie également sur des trains constitués d'envois pour deux ou trois destinations. Ces trains peuvent être qualifiés de trains de groupage. Au sein des gares de triages, des groupes de wagons sont échangés afin de constituer des trains complets vers une destination.

### 7.2.2.2 Le train complet

Le transport conventionnel en train complet constitue une liaison directe entre l'origine (terminal embranché d'une usine le plus souvent) et la destination du transport (terminal embranché desservant une usine, un port ou un chantier multimodal).

La charge d'un train entier dépend de plusieurs déterminants liés à la technique ferroviaire et à la marchandise transportée.

- Déterminants techniques :
  - La puissance des locomotives,
  - La résistance des attelages,
  - L'organisation de l'exploitation telle que la longueur des voies d'évitement,
  - Le profil des lignes sur le chemin considéré.
- Déterminants liés à la marchandise transportée :
  - La densité de la marchandise
  - Le type de conditionnement

En France, les trains entiers ont souvent une longueur limitée à 750 mètres, une charge brute de 1800 tonnes et une charge utile de 1200 tonnes. Les marchandises transportées en train entier sont essentiellement les suivantes :

- Matières pondéreuses du secteur industriel et minier tel que l'acier, ferrailles, produits métallurgiques, minerais, houille, phosphates, potasse, engrais, matériaux de construction,

- Produits industriels techniques ou complexes : automobiles, produits chimiques, ammoniac liquéfié,
- Produits énergétiques tel que pétrole et kérosène,
- Marchandises conditionnées, notamment alimentaires : boissons (bières, eaux minérales...), produits frais sous température dirigée, pièces détachées....

Le transport par train complet s'applique plus particulièrement aux envois massifs et réguliers industriels comme par exemple les flux de marchandises inter sites.

Plus aisé à exploiter que le wagon isolé, le train complet constitue l'essentiel de l'offre des opérateurs ferroviaires, notamment des nouveaux entrants.

Contrairement aux wagons isolés, les trains entiers ne font pas l'objet d'opération de triage. Ils peuvent cependant passer au sein d'une gare, qui tiendra lieu de relais, en cas de changement de conducteur ou de locomotive.

Le tronçon principal du trajet d'un train entier est réalisé par le biais d'une traction électrique, alors que les débuts et fins de trajet peuvent être opérés par traction thermique. Ceci s'explique par le fait que les embranchements industriels ne sont pas, pour la grande majorité et sauf gros industriels, raccordés électriquement. En effet, le raccordement électrique pose notamment le problème du chargement vertical des wagons qui ne peut pas être effectué s'il y a présence de caténaires.

### 7.2.2.3 *Le wagon isolé*

Assemblés au sein d'une gare de triage à partir de wagons (ou groupes de wagons) individuels, les trains sont constitués de différents envois de différents chargeurs qui unitairement ne sont pas suffisants pour former un train complet.

L'organisation mise en place vise alors à collecter des wagons pour former un train complet. L'activité principale repose sur le routage des wagons au sein des gares de triage. Les wagons isolés sont collectés en étoile depuis les gares (à proximité d'embranchements privés), principalement par le biais d'une traction diesel avant d'être acheminé vers une autre gare de triage par traction électrique.

Les triages constituent le dispositif essentiel du système d'acheminement du fret en wagons isolés, appelé aussi « lotissement ». Chaque triage dessert une zone de ramassage et de distribution d'où il reçoit les trains de desserte locale, et est en relation avec d'autres triages par des trains dits inter triage. Un wagon isolé emprunte donc successivement un train de ramassage, puis un ou plusieurs trains inter triages, et enfin un train de distribution jusqu'au client destinataire. Les wagons referont probablement à destination le cheminement symétrique.

On distingue aussi les triages primaires et secondaires. Les triages primaires sont destinés à orienter les wagons isolés vers leurs gares ou régions de destination, sans classement des wagons au sein des trains les uns par rapport aux autres. Les triages secondaires réalisent un tri des wagons en fonction des destinataires finaux et les classent les uns par rapport aux autres au sein du train.

#### 7.2.2.4 Le transport combiné

Le transport combiné se définit comme un service qui utilise au sein d'une même chaîne de transport deux modes de transport dans laquelle n'intervient pas de changement de contenant et dont la majeure partie se fait par voie ferroviaire afin que les parcours amont et aval par route soit les plus courts possibles. Les solutions de transport combiné actuelles sont caractérisées par un recours au fer sur de longues distances afin d'utiliser au maximum son aptitude à transporter de grandes quantités, ainsi que par l'utilisation optimale de la souplesse de la route, capable de collecter et distribuer des marchandises sur l'ensemble du territoire.

Chargées au départ des entrepôts ou des usines dans des conteneurs ou caisses mobiles, les marchandises sont acheminées par route vers un chantier de transbordement, puis acheminées par train jusqu'au terminal de destination.



Figure 10 : Chaîne de transport combiné

L'autoroute ferroviaire (appelé également route roulante) fait partie du transport combiné.



Figure 11 : Chaîne d'autoroute ferroviaire

La route roulante est la traduction du terme allemand Rollende Landstraße qui désigne un type particulier de navette ferroviaire transportant des camions. C'est un système de ferroutage très utilisé depuis les années 1960 dans toute l'Europe mais toujours refusé par la SNCF pour des raisons d'usure importante de la voie. Il est composé de wagons plats surbaissés reliés entre eux par des passages permettant à un camion de rouler d'un bout à l'autre de la rame. Pour assurer un chargement respectant au mieux en hauteur le gabarit ferroviaire, les wagons possèdent des bogies compacts à « petites roues » : ils comportent 4 essieux à roues de 36 cm de diamètre. Le dernier-né des systèmes concurrents franco-français est le Modalohr.

Le graphique ci-dessous révèle la difficulté que rencontrent les solutions actuelles de transport combiné rail-route pour se développer. De plus de 14 milliards de tonnes kilomètres en 2000, le rail route est passé en dessous de 10 milliards de tonnes kilomètres en 2005.

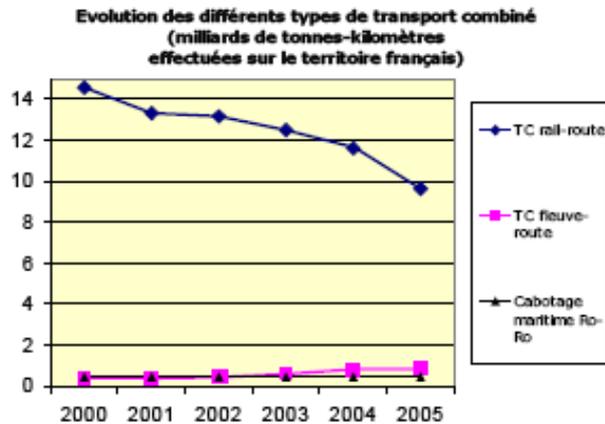


Figure 12 : Evolutions du transport combiné (source DGMT)

Le transport combiné *non accompagné* représente près de 90% du marché. Il s'agit du transport de conteneurs, caisses mobiles et semi-remorques seules. Il nécessite une organisation, des techniques et des infrastructures spécifiques ; les entreprises de transport clientes des services classiques doivent utiliser des types de contenants particuliers, préhensibles par pince, pouvant faire l'objet d'un transbordement par le biais d'une grue mobile ou d'un portique (le chargement est qualifié de vertical). Les équipements caisse mobile ou semi-remorque sont légèrement plus chers à l'achat. L'entreprise organisatrice dans tous les cas doit disposer d'un moyen permettant de reprendre le contenant sur le terminal d'arrivée. Ce type de transport combiné restera le plus utilisé à court et moyen terme.

Dans le cas du *transport accompagné*, la rame inclut un wagon dédié à accueillir les chauffeurs. Ce type de transport présente une rentabilité moindre. De plus, l'expérimentation de l'autoroute ferroviaire AFA (Aiton – Orbassano) a mis en lumière que seulement 30% des transports se faisaient en mode accompagné.

## 7.2.3 LES SERVICES

### 7.2.3.1 Les autoroutes ferroviaires

On distingue deux concepts d'autoroute ferroviaire :

- L'autoroute ferroviaire de franchissement d'obstacles naturels :
  - Navettes Eurotunnel sous la manche,
  - Liaison Aiton-Orbassano sur technique Modalohr entre la France et l'Italie,
- L'autoroute ferroviaire sur longue distance :
  - Liaison Perpignan-Bettembourg basée sur les wagons à plate forme pivotante Modalohr qui vient d'être inauguré en Mars 2007,
  - Projet Axe Atlantique entre la région Parisienne et l'Espagne qui pourrait inclure des dessertes intermédiaires.

D'autres axes sont à l'étude, notamment par Modalohr. La technologie des wagons à plate forme pivotante Modalohr est actuellement exploitée. Des solutions économiquement viables d'autoroute ferroviaire restent cependant à déployer sur les territoires français et européens.

#### 7.2.3.1.1 La Navette Transmanche Eurotunnel

1,3 millions de poids lourds ont été transportés au cours de l'année 2005 pour un tonnage de 17 millions de tonnes ; ce qui représente 13 tonnes de marchandises /camion. 60 000 traversées de la manche ont été effectuées en 2005, soit un départ toutes les 10 minutes.

Les caractéristiques de la navette transmanche sont les suivantes :

- La longueur du tronçon ferroviaire est courte : 50 km,
- La durée du trajet ferroviaire (chantier à chantier) est courte : 35 min,
- Le matériel roulant est composé de 16 navettes :
  - 7 wagons Breda-Fiat,
  - 9 wagons Arbel,
- Le service est ouvert 24 heures/24, 7 jours/7 et 365 jours/an,
- Il offre jusqu'à 6 départs par heure et par sens en période de pointe,
- Le taux de remplissage moyen des navettes est de 71%,
- Le poids maximum autorisé est de 44 tonnes,
- Le taux de fiabilité (ponctualité) annoncé est de 92,4%,

Les principaux pavillons y ayant recours sont:

- UK et Irlande avec 31%,
- France 27%,
- Benelux 22%,
- Allemagne, Autriche et Europe orientale 10%,
- Espagne 8%,

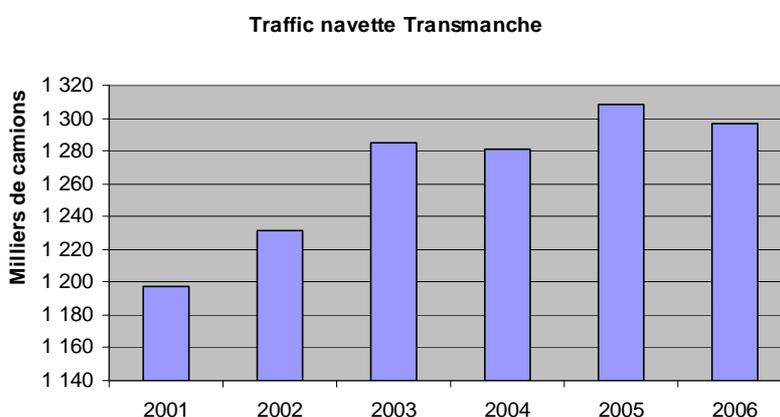


Figure 13 : Traffic navette TransManche (source Eurotunnel)

### 7.2.3.1.2 L'Autoroute Ferroviaire Alpine AFA

Pour répondre à l'engorgement des traversées alpines, 2,8 millions de poids lourds en transit en France et Italie en 2005, l'AFA (Autoroute Ferroviaire Alpine) a été mise en place en 2004:

- Entre la France (Aiton, Vallée de la Maurienne) et l'Italie (Orbassano, Turin) par le tunnel du Fréjus (175 km),
- 4 navettes par jour au total,
- Utilisation limitée aux camions citernes (gabarit réduit),
- Wagons Modalohr (mode accompagné avec chauffeur ou non),

Premiers résultats :

- 43 000 camions entre début 2004 et fin 2006, dont 20 000 en 2006,
- Taux de remplissage en forte hausse atteignant 91% en octobre 2006,
- Alternative majeure lors de l'incident du tunnel du Fréjus entre juin et sept. 2005,
- 70% de non accompagné majoritairement français. La structure plus individualisée du transport en Italie ne favorise pas la reprise en fin de parcours d'un chargement.
- 38% de 44 tonnes.
- 85 % du marché pouvant être actuellement embarqué a été capté
- 40 clients réguliers

Hypothèse d'évolution :

- Extension de la ligne jusqu'à Lyon
- Augmentation du nombre de navettes

Point à creuser :

- Limite de productivité des terminaux



Figure 14 : Tracé de l'autoroute ferroviaire Aiton-Orbassano (source Modalohr)

### 7.2.3.1.3 L'autoroute ferroviaire France Luxembourg

Démarrage prévu : juillet 2007,

- Nouvelle autoroute ferroviaire, axe Nord  $\leftrightarrow$  Sud par le sillon rhodanien, entre Le Boulou (Perpignan) et Bettembourg (Luxembourg), soit 1 050 km, temps de parcours : 14h30,
- Transport de semi-remorques standards (normes européennes) non accompagnées,
- Technique Modalohr,
- Autorisation du 44t,
- 2 trains par jour (1 dans chaque sens), 7j/7, soit une capacité d'environ 30 000 semi-remorques par an (capacité d'une navette : 40 semi-remorques),
- Horaires : départs, 17h30 – arrivées, 8h00,
- Fiabilisation des délais par l'existence d'un 2ème créneau horaire pour chaque train,
- Objectif mai 2009 : passage à 4 trains par jours (2 par sens),

Hypothèse d'évolution :

- Prolongement jusqu'aux ports de Barcelone et Tarragone
- Arrêt à Lyon et jonction avec AF Lyon  $\leftrightarrow$  Turin

### 7.2.3.2 Les liaisons de transport combiné

L'offre de transport combiné rail-route en France est composée en 2006 de :

- 28 liaisons domestiques (soit 216 trains / semaine) proposées par cinq opérateurs,
- 19 liaisons en bilatéral (soit 174 trains / semaine) proposées par huit opérateurs,
- 16 liaisons en transit (soit 129 trains / semaine) proposées par six opérateurs,
- Auxquelles viennent s'ajouter deux liaisons d'autoroutes ferroviaires (la navette transmanche et l'autoroute ferroviaire alpine).

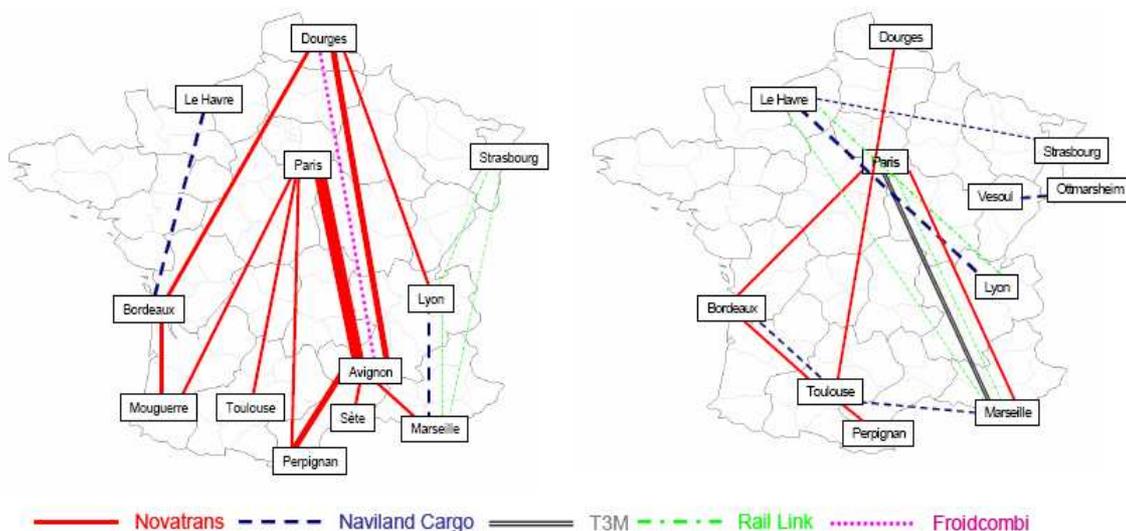


Figure 15 : Situation des liaisons de transport combiné rail-route au 30 juin 2006 - Liaisons domestiques (source Tableau de bord national du transport combiné, octobre 2006)

En juin 2006, 28 liaisons domestiques de transport combiné rail-route étaient proposées par 5 opérateurs. 3 opérateurs proposent leurs services sur Paris-Marseille, 2 opérateurs sur Douges-Avignon, Le Havre-Lyon et Lyon-Marseille. Toutes les autres liaisons sont assurées par un seul opérateur.

Le point « Paris » englobe les plates-formes de Valenton, Rungis, Noisy-le-Sec et La Chapelle.

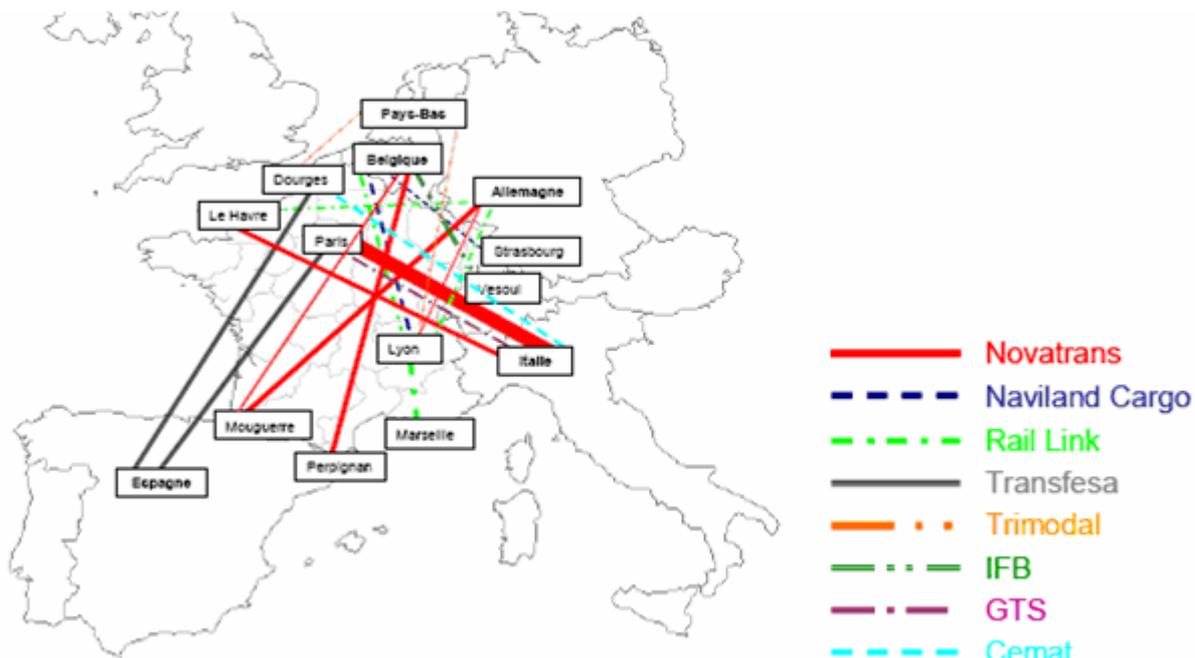


Figure 16 : Situation des liaisons de transport combiné rail-route au 30 juin 2006 - Liaisons bilatérales (source Tableau de bord national du transport combiné, octobre 2006)

En juin 2006, il existait 19 liaisons de TCRR en bilatéral soit 174 trains / semaine. Les principaux terminaux étrangers concernés sont :

- Allemagne : Duisburg, Köln, Ludwigshafen, Neuss et continuation vers les PECO et la Scandinavie
- Belgique : Anvers, Charleroi, Genk, Liège, Muizen, Oostende, Zeebrugge
- Espagne : Madrid, Valladolid
- Italie : Novare, Turin, Vercelli et continuation vers le centre et le sud de l'Italie
- Pays-Bas : Rotterdam

En juin 2006, 16 liaisons de TCRR en transit étaient opérationnelles, ce qui représente 129 trains par semaine. Les principaux terminaux étrangers concernés sont :

- Allemagne : Cologne, Eisenach, Ludwigshafen
- Angleterre : Dagenham, Hams Hall, Manchester
- Belgique : Anvers, Charleroi, Genk, Liège, Muizen, Oostende, Zeebrugge
- Espagne : Granollers, Tarragone, Silla, Saragosse
- Italie : Bologne, Milan, Piacenza, Novare, Turin, Bari

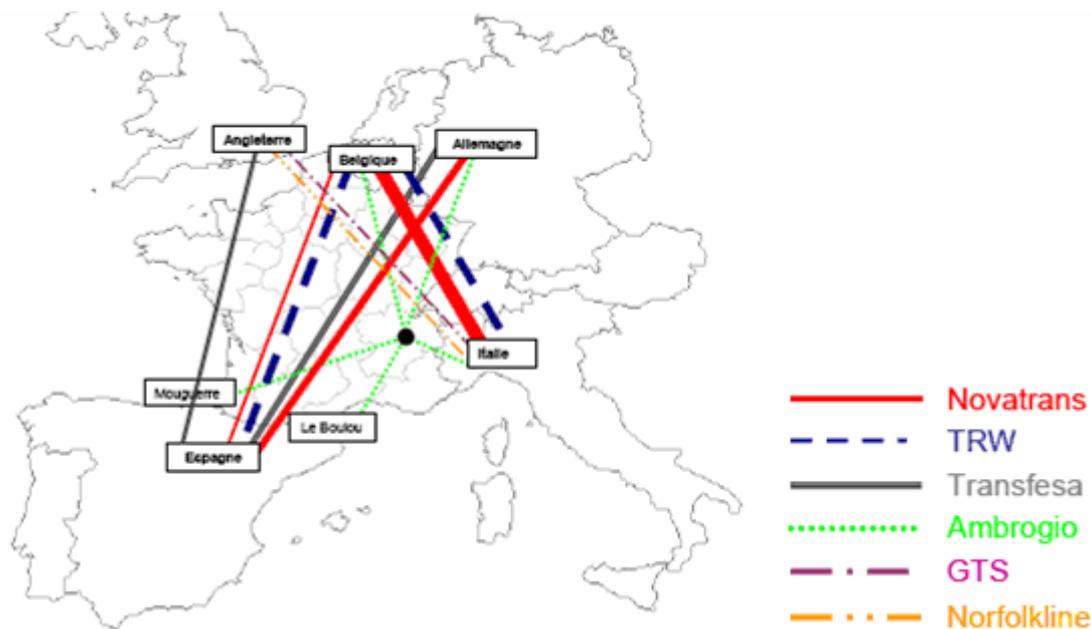


Figure 17 : Situation des liaisons de transport combiné rail-route au 30 juin 2006 - Liaisons de transit (source Tableau de bord national du transport combiné, octobre 2006)

On constate un baisse d'activité du transport combiné depuis 2002 principalement due à :

- Une augmentation importante des tarifs de traction ferroviaire,
- L'effet notoire de la grève SNCF de 2003,
- Une baisse sensible de la régularité des trains,
- La réduction significative des aides allouées au transport combiné.

Depuis mars 2006, la traction ferroviaire, aussi bien domestique, qu'internationale est ouverte à la concurrence. Les aides, initialement versées par l'état à la SNCF, sont depuis 2003 versées directement aux opérateurs. Le montant des aides a été en 2005 de 16 M€ alors qu'il s'élevait à 95 M€ en 2001-2002.

Les prix de traction ferroviaire pratiqués par la SNCF ont évolué vers une tarification au « train » au cours de l'année 2003, reportant ainsi le risque lié à leur remplissage sur les opérateurs de transport combiné.

## 7.2.4 LES TECHNIQUES ET TECHNOLOGIES

### 7.2.4.1 Le matériel roulant

Les entreprises ferroviaires possèdent des wagons spécifiques, correspondant à différents types d'unité à charger. Les sociétés de transport combiné possèdent un parc de wagons dédiés à l'activité. Ci-dessous, des exemples de wagons commercialisés par la société ARBEL sont présentés.

WAGONS-CITERNES	
<p><b>WAGON-CITERNE CHIMIQUE</b></p> <p>Capacité 87 m3            Charge utile 76 t            Tare 24 t            Poids total en charge 100 t            Vitesse maximum 100 km/h en charge            Citerne non réchauffée, non calorifugée</p>	
	<p><b>WAGON-CITERNE CHIMIQUE</b></p> <p>Capacité 70 m3            Charge utile 66,5 t            Tare 23,5 t            Poids total en charge 90 t            Vitesse maximum 100 km/h en charge            Citerne réchauffée et calorifugée</p>
<p><b>WAGON CRAIE LIQUIDE</b></p> <p>Capacité 40 m3            Charge utile 69 t            Tare 21 t            Poids total en charge 90 t            Vitesse maximum 100 km/h en charge            Citerne bi-tronconique calorifugée</p>	
	<p><b>WAGON CRAIE LIQUIDE</b></p> <p>Capacité 40 m3            Charge utile 69 t            Tare 21 t            Poids total en charge 90 t            Vitesse maximum 100 km/h en charge            Citerne bi-cylindrique calorifugée</p>
<p><b>WAGON PULVERULENT</b></p> <p>Capacité 80m3            Charge utile 69 t            Tare 21 t            Poids total en charge 90 t            Vitesse maximum 100 km/h en charge            Citerne en aluminium</p>	

	<p style="text-align: center;"><b>WAGON GLUCOSE</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Capacité</td> <td>53,5 m3</td> </tr> <tr> <td>Charge utile</td> <td>68,5 t</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>21,5 t</td> </tr> <tr> <td>Poids total en charge</td> <td>22,5 t</td> </tr> <tr> <td>Vitesse maximum</td> <td>100 km/h en charge</td> </tr> </table>		Capacité	53,5 m3	Charge utile	68,5 t	Tare	21,5 t	Poids total en charge	22,5 t	Vitesse maximum	100 km/h en charge
Capacité	53,5 m3											
Charge utile	68,5 t											
Tare	21,5 t											
Poids total en charge	22,5 t											
Vitesse maximum	100 km/h en charge											
<p style="text-align: center;"><b>WAGON GAZ LIQUEFIE</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Capacité</td> <td>120 m3</td> </tr> <tr> <td>Charge utile</td> <td>54,5 t</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>35,5 t</td> </tr> <tr> <td>Poids total en charge</td> <td>90 t</td> </tr> <tr> <td>Vitesse maximum</td> <td>100 km/h en charge</td> </tr> </table>	Capacité	120 m3	Charge utile	54,5 t	Tare	35,5 t	Poids total en charge	90 t	Vitesse maximum	100 km/h en charge		
Capacité	120 m3											
Charge utile	54,5 t											
Tare	35,5 t											
Poids total en charge	90 t											
Vitesse maximum	100 km/h en charge											

<p style="text-align: center;"><b>WAGONS MULTIMODAUX</b></p>																
<p style="text-align: center;"><b>WAGON PORTE-AUTOS FERME</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Longueur utile</td> <td>30 m 700</td> </tr> <tr> <td>Largeur utile</td> <td>30 m 140</td> </tr> <tr> <td>Hauteur</td> <td>1 m 746</td> </tr> <tr> <td>Capacité</td> <td>11 voitures type Monospace</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>31 tonnes</td> </tr> <tr> <td>Charge maximum</td> <td>15 tonnes/essieu</td> </tr> </table>	Longueur utile	30 m 700	Largeur utile	30 m 140	Hauteur	1 m 746	Capacité	11 voitures type Monospace	Tare	31 tonnes	Charge maximum	15 tonnes/essieu				
Longueur utile	30 m 700															
Largeur utile	30 m 140															
Hauteur	1 m 746															
Capacité	11 voitures type Monospace															
Tare	31 tonnes															
Charge maximum	15 tonnes/essieu															
	<p style="text-align: center;"><b>WAGON MEGAFRET</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Longueur utile</td> <td>2 x 16 m 105</td> </tr> <tr> <td>Largeur utile</td> <td>2 m 600</td> </tr> <tr> <td>Hauteur de chargement</td> <td>825 mm</td> </tr> <tr> <td>Capacité</td> <td>89 tonnes</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>39 tonnes</td> </tr> <tr> <td>Charge maximum</td> <td>16 tonnes/essieu</td> </tr> <tr> <td>Vitesse maximum</td> <td>140 km/h</td> </tr> </table>		Longueur utile	2 x 16 m 105	Largeur utile	2 m 600	Hauteur de chargement	825 mm	Capacité	89 tonnes	Tare	39 tonnes	Charge maximum	16 tonnes/essieu	Vitesse maximum	140 km/h
Longueur utile	2 x 16 m 105															
Largeur utile	2 m 600															
Hauteur de chargement	825 mm															
Capacité	89 tonnes															
Tare	39 tonnes															
Charge maximum	16 tonnes/essieu															
Vitesse maximum	140 km/h															
<p style="text-align: center;"><b>WAGON MULTIFRET</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Longueur utile</td> <td>2 x 16 m 580</td> </tr> <tr> <td>Largeur utile</td> <td>2 m 600</td> </tr> <tr> <td>Hauteur de chargement</td> <td>945 mm</td> </tr> <tr> <td>Capacité</td> <td>124 tonnes</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>36 tonnes</td> </tr> <tr> <td>Charge maximum</td> <td>20 tonnes/essieu</td> </tr> <tr> <td>Vitesse maximum</td> <td>100 km/h</td> </tr> </table>	Longueur utile	2 x 16 m 580	Largeur utile	2 m 600	Hauteur de chargement	945 mm	Capacité	124 tonnes	Tare	36 tonnes	Charge maximum	20 tonnes/essieu	Vitesse maximum	100 km/h		
Longueur utile	2 x 16 m 580															
Largeur utile	2 m 600															
Hauteur de chargement	945 mm															
Capacité	124 tonnes															
Tare	36 tonnes															
Charge maximum	20 tonnes/essieu															
Vitesse maximum	100 km/h															

	<b>WAGON 60'</b>	
	Longueur utile	18 m 300
	Largeur utile	2 m 500
	Hauteur de chargement	1090 mm
	Capacité	70 tonnes
	Tare	20 tonnes
	Charge maximum	22,5 tonnes/essieu
	Vitesse maximum	120 km/h
<b>NAVETTES FRET EUROTUNNEL</b>		
<b>CHARGEUR</b>		
Longueur utile	25,2 m	
Largeur utile	4 ,38 m	
Hauteur utile	3,575 m	
Tare	54 t	
Vitesse maximum	140 km/h	
Bogies	Eurobogies 22,5 t/essieu	
<b>PORTEUR</b>		
Longueur utile	20 m	
Largeur utile	4,12 m	
Hauteur utile	5,6 m	
Charge utile	1 camion de 44 t	
Tare	34 t	
Vitesse maximum	140 km/h	
Bogies	Eurobogies 22,5 t/essieu	
		

<b>AUTRES WAGONS</b>		
<b>WAGON-TREMIE</b>		
Capacité	68 m3	
Charge utile	64,5 t	
Tare	25,5 t	
Poids total en charge	22,5 t	
Vitesse maximum	100 km/h	
	<b>WAGON TOMBEREAU</b>	
	Longueur utile	14,9 m
	Largeur utile	2,56 m
	Hauteur utile	2,26 m
	Capacité	81 m3
	Charge utile	65 t
	Tare	25 t
	Poids total en charge	90 t
Vitesse maximum	120 km/h	

WAGON TRANSPORT DE MATIERE RADIOACTIFS	
Longueur utile	8 m
Charge utile	123 t à 22,5 t/essieu 143 t à 25 t/essieu
Diamètre utile	2990 mm hors gabarit 2800 mm dans gabarit
Tare	57 t
Charge maximum	25 t/essieu
Vitesse maximum	100 km/h

	WAGON TRANSPORT DE ROULEAUX DE TÔLES	
	Longueur utile	Entre parois 10,8 m
Largeur utile	2,4 m dans les berceaux	
Charge utile	77,2 t	
Tare	22,8 t	
Charge maximum	25 t/essieu	
Vitesse maximum	100 km/h	

CONTENEURS-CITERNES													
<p style="text-align: center;"><b>IMO 1</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Capacité totale</td> <td>23 000 l</td> </tr> <tr> <td>Poids total</td> <td>30 480 kg</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>3475 kg</td> </tr> <tr> <td>Pression d'épreuve</td> <td>6 bar</td> </tr> <tr> <td>Pression de service</td> <td>4 bar</td> </tr> <tr> <td>Dimensions</td> <td>20'x8'x8'6"</td> </tr> </table>	Capacité totale	23 000 l	Poids total	30 480 kg	Tare	3475 kg	Pression d'épreuve	6 bar	Pression de service	4 bar	Dimensions	20'x8'x8'6"	
Capacité totale	23 000 l												
Poids total	30 480 kg												
Tare	3475 kg												
Pression d'épreuve	6 bar												
Pression de service	4 bar												
Dimensions	20'x8'x8'6"												
	<p style="text-align: center;"><b>IMO 5</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Capacité totale</td> <td>22 500 l</td> </tr> <tr> <td>Poids total</td> <td>34 000 kg</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>8 000 kg</td> </tr> <tr> <td>Pression d'épreuve</td> <td>35.75 bar</td> </tr> <tr> <td>Pression de service</td> <td>27.5 bar</td> </tr> <tr> <td>Dimensions</td> <td>20'x8'x8'6"</td> </tr> </table>	Capacité totale	22 500 l	Poids total	34 000 kg	Tare	8 000 kg	Pression d'épreuve	35.75 bar	Pression de service	27.5 bar	Dimensions	20'x8'x8'6"
Capacité totale	22 500 l												
Poids total	34 000 kg												
Tare	8 000 kg												
Pression d'épreuve	35.75 bar												
Pression de service	27.5 bar												
Dimensions	20'x8'x8'6"												
<p style="text-align: center;"><b>IMO 5</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Capacité totale</td> <td>20 000 l</td> </tr> <tr> <td>Poids total</td> <td>34 000 kg</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>8 350 kg</td> </tr> <tr> <td>Pression d'épreuve</td> <td>46 bar</td> </tr> <tr> <td>Pression de service</td> <td>27.5 bar</td> </tr> <tr> <td>Dimensions</td> <td>20'x8'x8'6"</td> </tr> </table>	Capacité totale	20 000 l	Poids total	34 000 kg	Tare	8 350 kg	Pression d'épreuve	46 bar	Pression de service	27.5 bar	Dimensions	20'x8'x8'6"	
Capacité totale	20 000 l												
Poids total	34 000 kg												
Tare	8 350 kg												
Pression d'épreuve	46 bar												
Pression de service	27.5 bar												
Dimensions	20'x8'x8'6"												
	<p style="text-align: center;"><b>IMO 5</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Capacité totale</td> <td>20 000 l</td> </tr> <tr> <td>Poids total</td> <td>34 000 kg</td> </tr> <tr> <td>Tare</td> <td>8 600 kg</td> </tr> <tr> <td>Pression d'épreuve</td> <td>44.72 bar</td> </tr> <tr> <td>Pression de service</td> <td>34.4 bar</td> </tr> <tr> <td>Dimensions</td> <td>20'x8'x8'6"</td> </tr> </table>	Capacité totale	20 000 l	Poids total	34 000 kg	Tare	8 600 kg	Pression d'épreuve	44.72 bar	Pression de service	34.4 bar	Dimensions	20'x8'x8'6"
Capacité totale	20 000 l												
Poids total	34 000 kg												
Tare	8 600 kg												
Pression d'épreuve	44.72 bar												
Pression de service	34.4 bar												
Dimensions	20'x8'x8'6"												

### 7.2.4.2 Les terminaux

Le transfert des unités de chargement de la route sur le rail (et inversement) et leur stockage se réalisent au sein de terminaux (appelés également chantier) et nécessitent des moyens de manutention adaptés. On citera notamment les RMG, RTG, cavaliers ou reach stakers.

Un embranchement privé est une installation ferroviaire destinée à desservir une usine, un entrepôt, une zone industrielle ou portuaire, pour les raccorder au réseau ferroviaire principal afin de permettre le transport des marchandises sans rupture de charge. Cette installation comprend schématiquement :

- Une première partie, propriété du gestionnaire du réseau, jusqu'à la limite des emprises du chemin de fer,
- Une seconde partie, située dans le prolongement de la précédente qui se trouve dans les emprises privées et qui comprend une longueur de voie variable. En général, elle est équipée de systèmes de manutention (grues, quais, portiques, silos) et selon son importance peut être dotée de moyens de traction internes (locotracteurs).

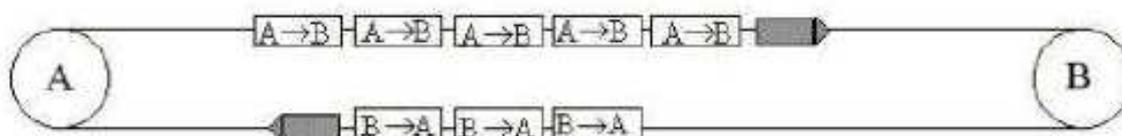
Le principal problème que pose ce type de raccordement (qui se trouve généralement dans des zones urbaines fortement sollicitées par les trafics TER et grande lignes) est lié à la disponibilité des sillons, qui interdit pratiquement le passage des trains de marchandises pendant la journée. De même se pose le problème du regroupage des wagons isolés entre les lieux de productions/consommations et les centres de regroupage de ces wagons pour la constitution des convois : zone urbaine de Grenoble, contournement Lyon ...

### 7.2.4.3 L'exploitation des rames

Les caractéristiques d'exploitation d'une ligne ferroviaire sont fortement liées aux modalités d'équipement des terminaux de transbordement. Cela est d'autant plus vrai dans le cas de concepts visant à fonctionner à haut débit tel que R-shift-R. Les résultats du projet Européen IMPULSE ont notamment démontré que les concepts basés sur de fortes composantes technologiques (afin d'obtenir des temps et des coûts de transbordement faibles) nécessitaient des modes d'exploitation ferroviaire avancés et innovants. Ainsi, quatre modes d'exploitation (sans compter le wagon isolé) d'une ligne de fret ferroviaire peuvent être définis :

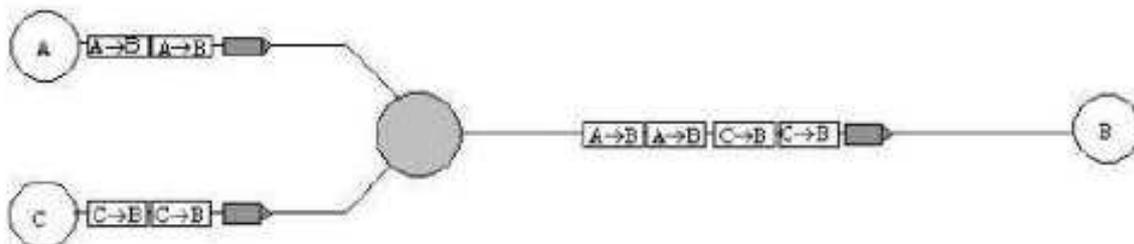
- **Le train direct**

Il s'agit du mode d'exploitation le plus répandu en Europe, une liaison A-B directe entre deux terminaux. Le train peut être un train bloc ou un train shuttle. Dans le cas d'un train bloc, le nombre de wagons est variable et dépend de la demande ; alors que dans le cas d'un train shuttle, la rame est indéformable et comprend toujours le même nombre de wagon (que ces derniers soient vides ou chargés). Une dernière variante est le mode d'exploitation shuttle-shuttle qui se caractérise par une composition fixe de wagons différente pour les deux sens.



• **Le train groupé**

Ce mode d'exploitation vise à consolider des groupes de trains venant de plusieurs origines en vue de réaliser un train complet sur la plus grande partie du trajet. Ce mode d'exploitation est utilisé dans le cas où la demande n'est pas assez forte pour exploiter en train direct.



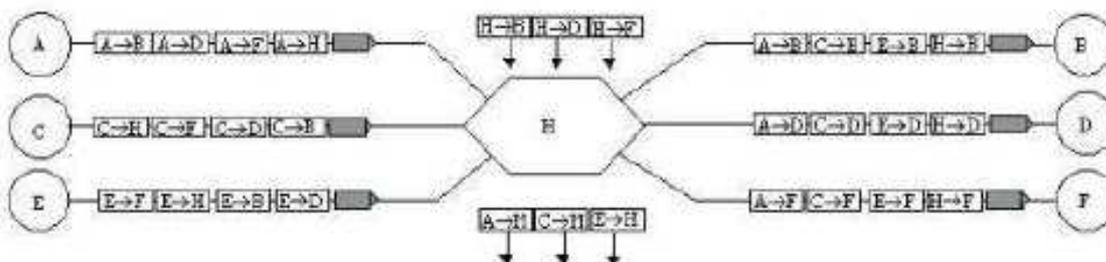
• **Le train en ligne**

Le train en ligne passe par des positions intermédiaires pour charger et décharger. Il doit offrir un service régulier de passage sur les terminaux et permet d'intégrer des points de passage où la demande est relativement faible. Ce mode d'exploitation repose sur une composition fixe des wagons constitutifs de la rame et sur une prédétermination des wagons qui feront l'objet de chargement/déchargement sur les points intermédiaires.



• **Le système « Hub and Spoke »**

Ce mode d'exploitation repose sur un "hub" centrale où convergent des trains de différentes origines afin d'être réassemblés en de nouveaux trains pour de nouvelles destinations. L'idée d'un tel système est de proposer des connections importantes entre terminaux de faible et moyen volume. L'enjeu est dans la réduction du temps de transbordement des contenants au sein du hub, c'est-à-dire le temps de décomposition et de recombinaison des trains.



Chacun des modes d'exploitation induit des caractéristiques sur les terminaux, la distribution et l'organisation. Le tableau ci-dessous identifie les principaux impacts :

Principaux impacts des modes d'exploitation ferroviaire sur les terminaux, la distribution et l'organisation				
Mode d'exploitation		Terminal	Distribution	Organisation
Train direct	Les couts reposent sur l'utilisation optimale de la capacité disponible et sur la vitesse de la rame	Des pics de chargement et dechargement. Necessite des surfaces au sol importantes, convient pour des terminaux importants et moyens	Les distances de distribution doivent être importantes. Des stocks importants de contenants (caisses mobiles et conteneurs) sur terminal	Convient davantage pour des trains et terminaux privés. Organisation dédiée à un trafic
Train groupé	Couts d'exploitation plus élevés	Moins de pics de volumes sur terminal. Trains moins longs dans les terminaux	Distance de distribution moins importantes	
Train en ligne	Induit des temps de trajet plus longs et des fréquences de rame plus importantes.	Des temps de chargement/déchargement courts. L'accès aux terminaux doit être soigné. Les terminaux doivent être à proximité des bassins de production et de consommation.	Des distances courtes sont envisageables. Le stockage est sur une période plus courte à priori. Améliore la desserte.	Le réseau de plate forme doit être exploiter par un seul et même opérateur
Hub and Spoke	Les couts d'exploitation sont importants. Permet de réduire les risques de sous utilisation des capacités en augmentant les destinations desservies	Offre la possibilité d'intégrer des terminaux de taille variée	Plus de terminaux et par conséquent desserte améliorée	Organisation hautement qualifiée

Tableau 2: Impacts des modes d'exploitation sur les terminaux

Le cadencement en réseau au sens strict du terme existe dans différents pays d'Europe occidentale, comme la Suisse ou les Pays-Bas. Ce mode d'exploitation ferroviaire va bien au-delà du simple départ des trains à la même minute dans les principaux terminaux.

Un réseau de transport ferroviaire est cadencé et coordonné lorsque :

- Les trains sont regroupés dans des « familles » (ex : intercités, périurbain, longues distances au niveau nationale et européenne...) caractérisées par :
  - Les mêmes itinéraires,
  - Les mêmes politiques d'arrêt,
  - Les mêmes temps de parcours... dans les deux sens de circulation,
- Les trains circulent à intervalles réguliers (par exemple tous les ¼ h, toutes les ½ h, toutes les heures, toutes les 2h ou même toutes les 4h),
- L'horaire est coordonné pour tout le réseau, ce qui permet la création de correspondances régulières dans les terminaux (dans les deux sens).

La lisibilité de l'horaire et de la desserte ainsi que l'optimisation et la systématisation des correspondances sont les deux principaux avantages du système pour l'utilisateur (le transporteur routier). En effet, le cadencement permet de réaliser de manière simple et efficace des correspondances optimisées grâce à l'organisation de « rendez-vous ».

Les avantages pour l'exploitation sont :

- L'optimisation de l'utilisation des infrastructures grâce à une organisation structurée des sillons ferroviaires
- La systématisation de l'exploitation : simplification de la production grâce à des cycles répétitifs et fiabilisation (situations de perturbation standards permettant une systématisation de leur gestion)
- La réduction des coûts unitaires d'exploitation grâce à une rationalisation des ressources en personnel et matériel roulant

## 7.2.4.4 Les techniques de transbordement sur terminal

### 7.2.4.4.1 Introduction

Dans la suite, différents concepts étudiés et/ou développés au niveau Européen ces dernières années sont décrits.

Deux types de systèmes de transbordement sur terminal peuvent être définis :

- Les systèmes de transbordement rail-route horizontaux permettant de charger/décharger des semi remorques par exemple :
  - Cargo Speed (issu du concept initial Shwople Train)
  - Cargo Beamer
  - Cargo roo
  - Flexiwagon
  - G-2000
  - Modalohr
- Les systèmes de chargement/déchargement verticaux de contenants sur des terminaux ferroviaires par exemple :
  - ARBEL
  - Commutor
  - Krupp Fast Handling
  - Noell Mega-Hub
  - Noell Fast Transshipment
  - Transmann Handling
  - RoadRailer
  - Compact Terminal Tuchschnid
  - Cargo Sprinter

### 7.2.4.4.2 CARGO SPEED

Le concept Cargo Speed, roll on-roll off (Ro-Ro) repose sur un système de levage rotatif (dit mécanisme « pop up ») incorporé dans la ligne, entre les rails.

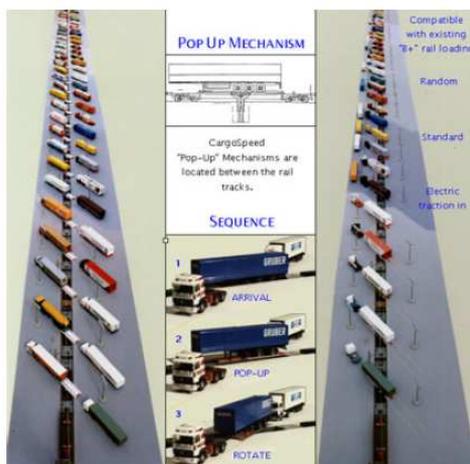
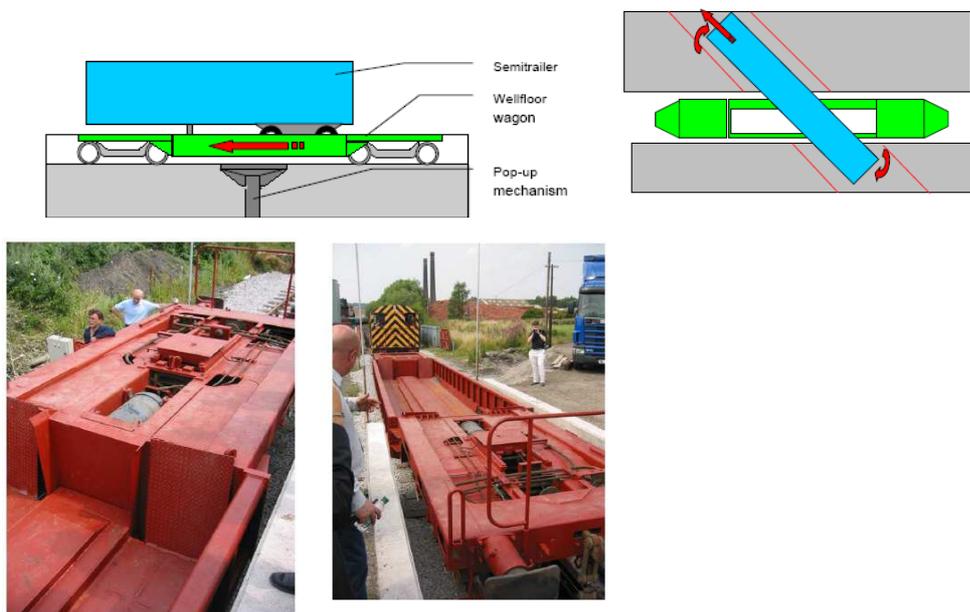


Figure 18 : Présentation du concept Cargospeed

La solution est orientée vers les semi remorques qui ne peuvent pas être manutentionnés verticalement par préhension. Le wagon est d'un nouveau type équipé de bogie standard Est proposé un système automatisé de fixation de la sellette et un fond de wagon interchangeable qui peut être soulevé par un système « pop up » se trouvant dans la voie. Le terminal est par conséquent dédié à la solution et peut permettre de charger en parallèle 30 semi remorques sans équipement de manutention additionnel. Une démonstration de la solution a été faite en présence de son concepteur Mr Jack Brown à Barrow Hill, au royaume uni durant l'été 2004. Le wagon cargo speed est un wagon poche qui peut être chargé en présence de caténaire. La tolérance de positionnement longitudinal sur terminal du wagon est fixée à +/- 35 cm. Le système est conçu pour supporter une charge (excentrée au maximum de 1,75 m) de 45 tonnes.



Le système standard où l'on peut voir le fond du wagon détachable. Le système de fixation de la sellette est manuel avec une version automatique.

Le système avec absorption de chocs



Les temps annoncés de chargement/déchargement complet d'un train varient de 17,5 minutes à 22,75 minutes pour 30 wagons selon le fait que le chargement se fasse avec 10 tracteurs jockeys ou avec 2\*30 tractions (chargement/déchargement simultané).

La longueur des semi remorque acceptées est au maximum de 13,6 m de long pour une charge maximum de 38,5 tonnes.

DESIGNATION DU SYSTEME : CARGO SPEED					
<b>FONCTION</b>	Fournir un wagon de ferroutage				
<b>DESCRIPTION</b>	Système de levage rotatif (dit mécanisme « pop up ») incorporé dans la ligne, entre les rails				
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>					
Niveau de développement	opérationnel <input type="checkbox"/>		prototype <input checked="" type="checkbox"/>		concept <input type="checkbox"/>
Unités de transport traitées	Semi remorque standard sans équipement de préhension particuliers				
Utilisation	Manuelle <input type="checkbox"/>		semi-automatique <input checked="" type="checkbox"/>		automatique <input type="checkbox"/>
Personnel de conduite nécessaire	oui		Qualification		Chauffeur routier
Énergie d'alimentation					
Aspect sécuritaire	insuffisant <input type="checkbox"/>		moyen <input checked="" type="checkbox"/>		bon <input type="checkbox"/>
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>					
Zone routière	Zone de manutention				
Zone stockage temporaire					
Travées					
Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier - pas de donnée sur le sujet – <b>semblable au Modalohr...</b>					
<b>PERFORMANCES</b>					
Vitesse de la rame	Standard ferroviaire				
Délai de traitement d'un train	Entre 17,5 mn et 22,75 minutes fonction de l'équipement en tracteur sur terminal pour 30 wagons (30 contenants)				
Temps d'arrêt sur terminal	Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon				
Valeur de pente franchissable	Standard ferroviaire				
<b>OPTIONS</b>	Automatisation de la fixation de la sellette du semi sur le wagon				
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>					
Coût d'acquisition	Pas de donnée	M€	Coût de maintenance	Pas de donnée	M€
Coût par unité d'œuvre	Pas de donnée	€	Coût de maintenance	Pas de donnée	€
<b>FACILITE DE MISE EN ŒUVRE</b>					
Homologation	basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input checked="" type="checkbox"/>		haute <input type="checkbox"/>
Complexité technique	basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input checked="" type="checkbox"/>		haute <input type="checkbox"/>
Présence d'un marché suffisant	basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/>		haute <input checked="" type="checkbox"/>

Tableau 3: Fiche signalétique solution Cargo Speed

#### 7.2.4.4.3 CARGO BEAMER

Le système Cargo Beamer est conçu pour embarquer aussi bien les semi remorques (30) que les caisses mobiles et les conteneurs. Il repose sur la présence d'un plateau (1) sur lequel est déposé le contenant. Ce plateau (1) fait l'objet d'un transfert entre le quai et le wagon (20) (d'un type nouveau) grâce à la présence d'une rampe aménagée spécialement sur le quai. L'embarquement du contenant sur le plateau peut être plus ou moins automatisé et ne nécessite pas la présence du train. Fonction de l'équipement et de la taille du terminal, l'opération de chargement/déchargement peut être réalisée en parallèle. Le dispositif de contrôle de la bonne réalisation du chargement peut être au sol ou embarqué. Le dispositif de manutention est un composant du terminal.

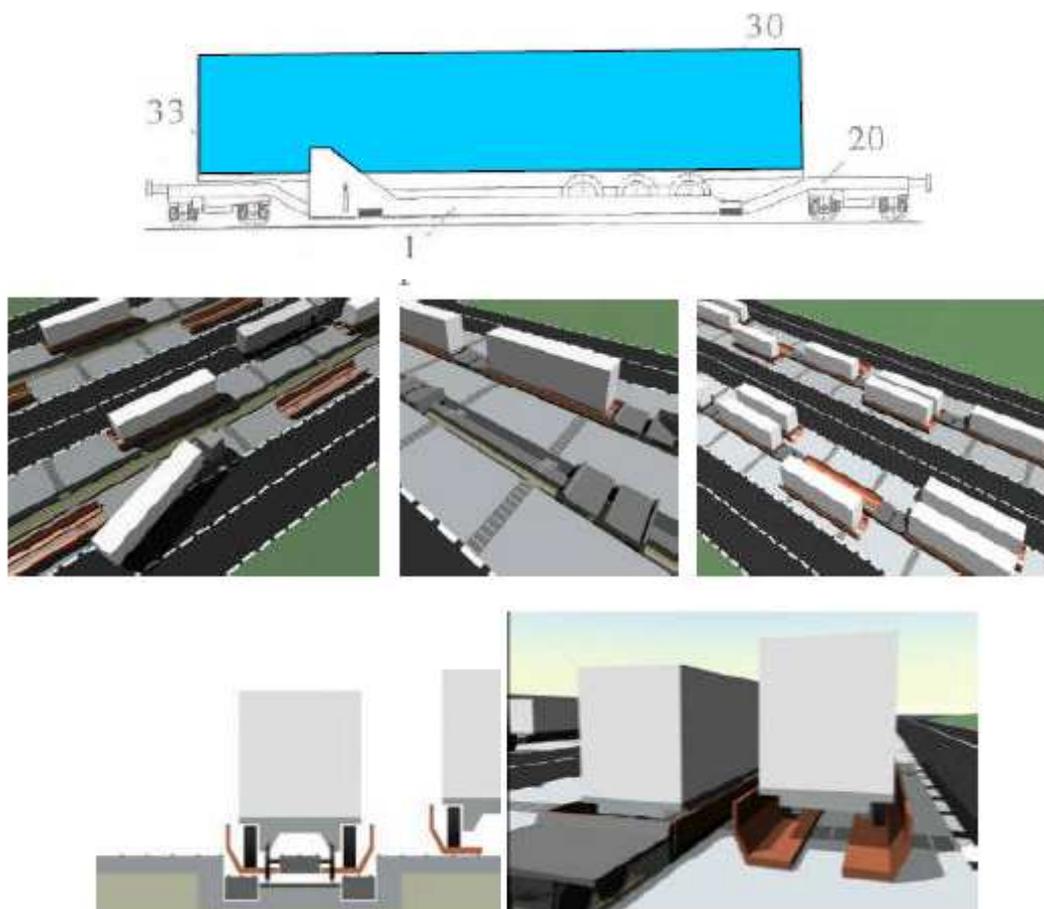


Figure 19 : Présentation du concept Cargo Beamer

DESIGNATION DU SYSTEME : CARGO BEAMER					
<b>FONCTION</b>		Fournir un wagon de ferroutage, ainsi que le système de transbordement			
<b>DESCRIPTION</b>		Système de transfert de contenants à partir d'un plateau sur lequel repose le contenant séparant ainsi les opérations d'embarquement (contenant sur plateau) et de chargement (plateau chargé sur wagon)			
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>					
Niveau de développement		opérationnel <input type="checkbox"/>		prototype <input type="checkbox"/> concept <input checked="" type="checkbox"/>	
Unités de transport traitées		Caisse mobile, conteneur, semi remorque			
Utilisation		Manuelle <input type="checkbox"/>		Semi-automatique <input checked="" type="checkbox"/> automatique <input checked="" type="checkbox"/>	
Personnel de conduite nécessaire		oui		Qualification Non spécifié mais dédié et formé nécessairement	
Énergie d'alimentation					
Aspect sécuritaire		insuffisant <input checked="" type="checkbox"/>		moyen <input type="checkbox"/> bon <input type="checkbox"/>	
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>					
Zone routière		Zone de manutention			
Zone stockage temporaire					
Travées					
Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier - pas de donnée sur le sujet – <b>semblable à R-shift-R...</b>					
<b>PERFORMANCES</b>					
Vitesse de la rame		Standard ferroviaire			
Délai de traitement d'un train		Pas de donnée			
Temps d'arrêt sur terminal		Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon			
Valeur de pente franchissable		Standard ferroviaire			
<b>OPTIONS</b>		Automatisation des embarquements et des chargements, système de contrôle de chargement sur terminal ou embarqué			
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>					
Coût d'acquisition		Pas de donnée M€		Coût de maintenance Pas de donnée M€	
Coût par unité d'oeuvre		Pas de donnée €		Coût de maintenance Pas de donnée €	
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>					
Homologation		basse <input checked="" type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/> haute <input type="checkbox"/>	
Complexité technique		basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/> haute <input checked="" type="checkbox"/>	
Présence d'un marché suffisant		basse <input checked="" type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/> haute <input type="checkbox"/>	

Tableau 4: Fiche signalétique solution Cargo Beamer

#### 7.2.4.4.4 CARGO ROO

Le système Cargo Roo est issu du système ALS – Automatic Loading System, Kölker-Thiele-System. Il repose sur une technologie de transbordement embarqué sur le wagon. Le terminal se veut standard sans équipement spécifique. Le wagon poche est quand à lui spécifique à la solution et est équipé de deux systèmes de transbordement appelés « lafettes » conçues pour assurer le transfert d'un semi remorque selon un mode horizontale. Supportant une charge de 41 tonnes, les trains sont prévus pour circuler à la vitesse de 120 km/h.

Les équipements de transbordement sont réduits aux « lafettes » (2 par wagon), intégrant un système électro-hydraulique (alimenté par la locomotive) et pesant chacune 1500 kg. Le système de pilotage permet la gestion simultanée de 10 wagons. La solution propose une tolérance de positionnement du wagon en gare de 4 cm afin de permettre le chargement/déchargement automatique des semi remorques.

Le terminal est composé de deux voies (une de chaque côté) parallèles aux rails. Les éléments de surface des terminaux sont préfabriqués et sont encastrables en fonction de la surface désirée du terminal. Il n'y a pas d'équipement fixe sur terminal nécessaire aux opérations de transbordement.

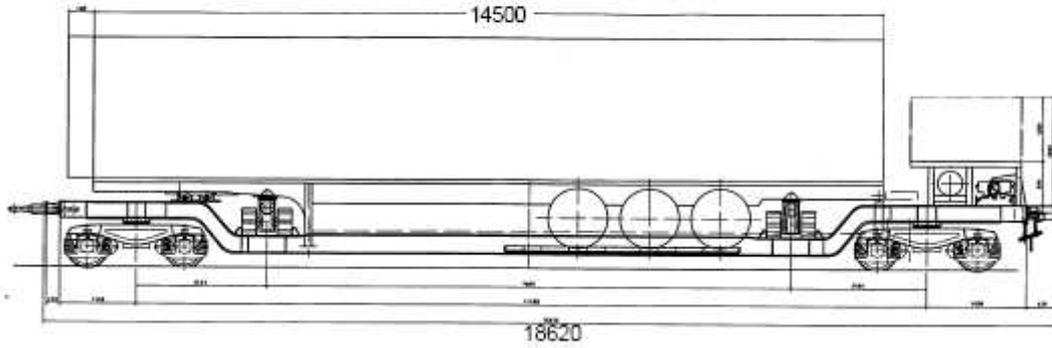
Les semi remorques doivent répondre à la norme ISO 1726 afin de ne pas gêner les « lafettes » dans leur rôle de manutention.

Les semi remorques acceptées ont une longueur comprise entre 13,6 m et 15, 1 m pour un poids compris entre 37 et 41 tonnes.

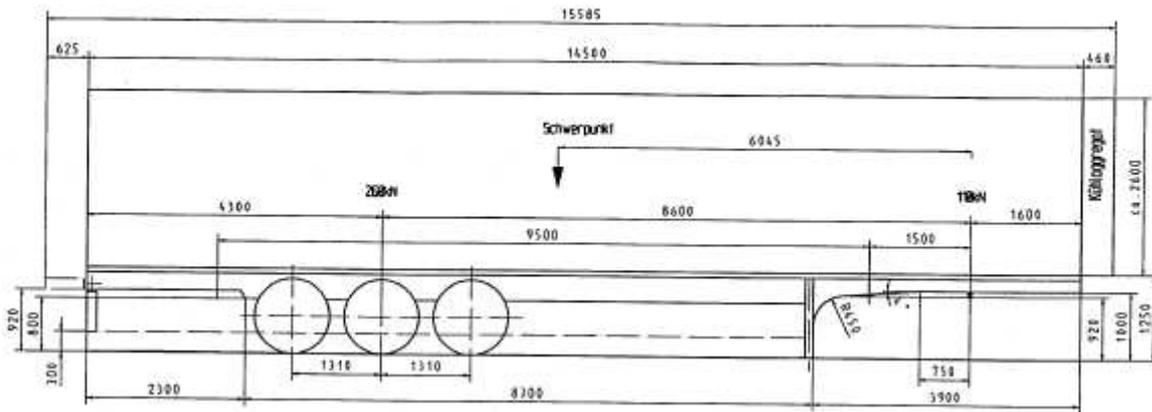


Figure 20 : Présentation du concept Cargo Roo

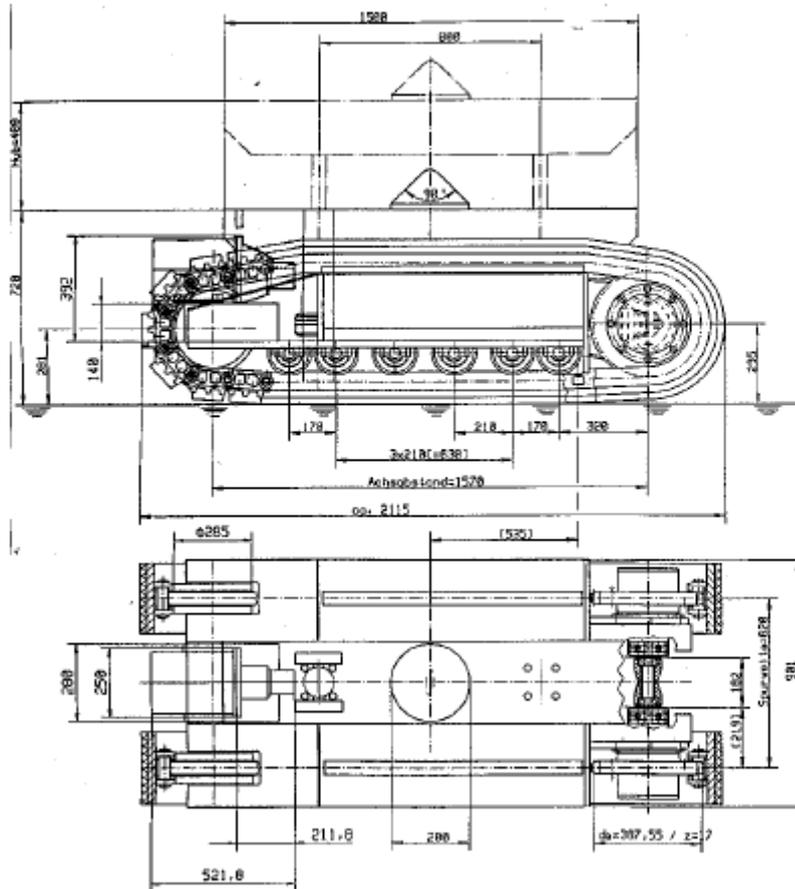
The Wagon (DRAFT):



The Containment (DRAFT):



The transfer equipment:



DESIGNATION DU SYSTEME : CARGO ROO						
<b>FONCTION</b>	Fournir un wagon de ferroutage, ainsi que le système de transbordement					
<b>DESCRIPTION</b>	Système de chargement horizontal de semi remorque sur wagon à partir d'un moyen de transbordement intégré au wagon (2 par wagon)					
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>						
Niveau de développement	opérationnel	<input type="checkbox"/>	prototype	<input type="checkbox"/>	concept	<input checked="" type="checkbox"/>
Unités de transport traitées	semi remorque					
Utilisation	Manuelle	<input type="checkbox"/>	Semi-automatique	<input type="checkbox"/>	automatique	<input checked="" type="checkbox"/>
Personnel de conduite nécessaire	oui		Qualification	Non spécifié mais dédié et formé nécessairement		
Énergie d'alimentation						
Aspect sécuritaire	Insuffisant	<input checked="" type="checkbox"/>	moyen	<input type="checkbox"/>	bon	<input type="checkbox"/>
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>						
Zone routière	Zone de manutention					
Zone stockage temporaire						
Travées						
Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier - pas de donnée sur le sujet – une voie spécifique de chaque coté du rail						
<b>PERFORMANCES</b>						
Vitesse de la rame	Standard ferroviaire					
Délai de traitement d'un train	Pas de donnée					
Temps d'arrêt sur terminal	Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon					
Valeur de pente franchissable	Standard ferroviaire					
<b>OPTIONS</b>						
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>						
Coût d'acquisition	Pas de donnée	M€	Coût de maintenance	Pas de donnée	M€	
Coût par unité d'œuvre	Pas de donnée	€	Coût de maintenance	Pas de donnée	€	
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>						
Homologation	Basse	<input checked="" type="checkbox"/>	moyenne	<input type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>
Complexité technique	Basse	<input checked="" type="checkbox"/>	moyenne	<input type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>
Présence d'un marché suffisant	Basse	<input type="checkbox"/>	moyenne	<input checked="" type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>

Tableau 5: Fiche signalétique solution Cargo Roo

#### 7.2.4.4.5 FLEXIWAGON

Le Flexiwagon est un wagon surbaissé permettant de charger et décharger des semi remorque sans l'assistance d'un équipement particulier de transbordement (chargement horizontal en épis). Le mode de chargement déchargement est semblable au Modalohr. Ce système convient bien pour une exploitation de la rame en ligne avec des flux faibles ou moyens.

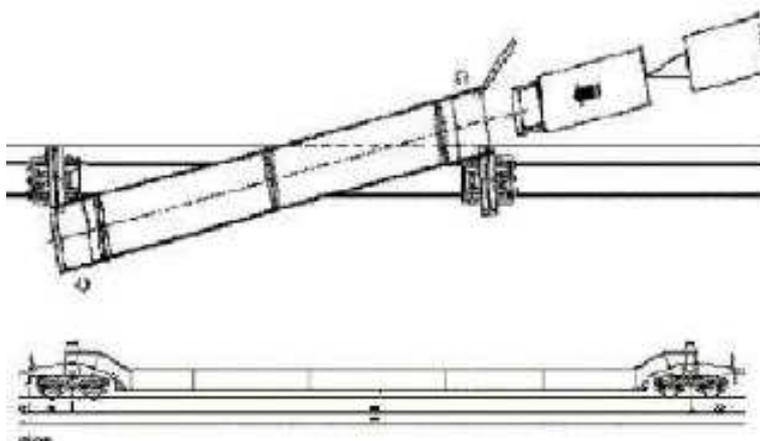


Figure 21 : Présentation du concept Flexiwagon

DESIGNATION DU SYSTEME : FLEXIWAGON						
<b>FONCTION</b>	Fournir une solution facilitant l'accès des semi remorque au train					
<b>DESCRIPTION</b>	Système de transfert Ro Ro intégrant un wagon surbaissé pour chargement semi remorque sans équipement spécifique					
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>						
Niveau de développement	opérationnel	<input type="checkbox"/>	prototype	<input checked="" type="checkbox"/>	concept	<input type="checkbox"/>
Unités de transport traitées	Semi remorque					
Utilisation	Manuelle	<input checked="" type="checkbox"/>	Semi-automatique	<input type="checkbox"/>	automatique	<input type="checkbox"/>
Personnel de conduite nécessaire	oui		Qualification	Chauffeur		
Énergie d'alimentation						
Aspect sécuritaire	insuffisant	<input type="checkbox"/>	moyen	<input checked="" type="checkbox"/>	bon	<input type="checkbox"/>
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>						
Zone routière	Zone de manutention					
Zone stockage temporaire						
Travées						
Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier - pas de donnée sur le sujet – <b>semblable à Modalohr...</b>						
<b>PERFORMANCES</b>						
Vitesse de la rame	Standard ferroviaire					
Délai de traitement d'un train	Chargement d'un semi en moins de 5 minutes					
Temps d'arrêt sur terminal	Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon					
Valeur de pente franchissable	Standard ferroviaire					
<b>OPTIONS</b>						
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>						
Coût d'acquisition	Pas de donnée	M€	Coût de maintenance	Pas de donnée	M€	
Coût par unité d'oeuvre	Pas de donnée	€	Coût de maintenance	Pas de donnée	€	
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>						
Homologation	basse	<input type="checkbox"/>	moyenne	<input checked="" type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>
Complexité	basse	<input type="checkbox"/>	moyenne	<input checked="" type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>
Présence d'un marché suffisant	basse	<input type="checkbox"/>	moyenne	<input type="checkbox"/>	haute	<input checked="" type="checkbox"/>

Tableau 6: Fiche signalétique solution Flexiwagon

#### 7.2.4.4.6 G-2000

Le G-2000 repose sur un concept de wagon fermé pour des raisons aérodynamiques. Le chargement se fait latéralement comme dans le cas de Flexiwagon.

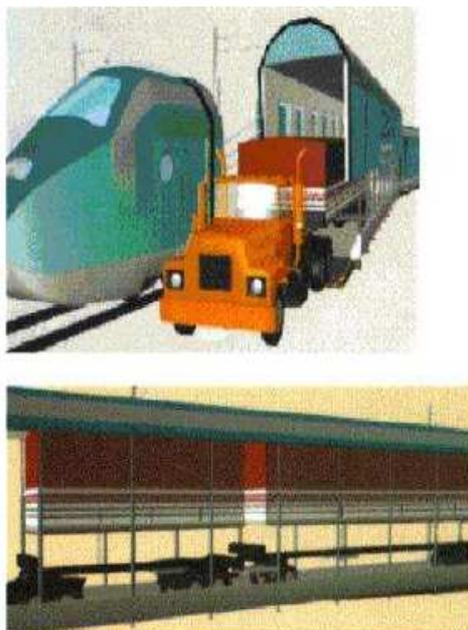


Figure 22 : Présentation du concept G-2000

DESIGNATION DU SYSTEME : G 2000						
<b>FONCTION</b>	Pas d'information pour remplir la fiche					
<b>DESCRIPTION</b>						
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>						
Niveau de développement	opérationnel	<input type="checkbox"/>	prototype	<input type="checkbox"/>	concept	<input type="checkbox"/>
Unités de transport traitées	Semi remorque					
Utilisation	Manuelle	<input type="checkbox"/>	Semi-automatique	<input type="checkbox"/>	automatique	<input type="checkbox"/>
Personnel de conduite nécessaire	oui		Qualification	Chauffeur		
Énergie d'alimentation						
Aspect sécuritaire	insuffisant	<input type="checkbox"/>	moyen	<input type="checkbox"/>	bon	<input type="checkbox"/>
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>						
Zone routière	Zone de manutention					
Zone stockage temporaire						
Travées						
<b>PERFORMANCES</b>						
Vitesse de la rame						
Délai de traitement d'un train						
Temps d'arrêt sur terminal						
Valeur de pente franchissable						
<b>OPTIONS</b>						
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>						
Coût d'acquisition	Pas de donnée	M€	Coût de maintenance	Pas de donnée	M€	
Coût par unité d'oeuvre	Pas de donnée	€	Coût de maintenance	Pas de donnée	€	
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>						
Homologation	basse	<input type="checkbox"/>	moyenne	<input type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>
Complexité	basse	<input type="checkbox"/>	moyenne	<input type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>
Présence d'un marché suffisant	basse	<input type="checkbox"/>	moyenne	<input type="checkbox"/>	haute	<input type="checkbox"/>

Tableau 7: Fiche signalétique solution G-2000

#### 7.2.4.4.7 COMMUTOR

L'objectif du projet COMMUTOR était de substituer, par un traitement automatisé, un système d'échanges de caisses mobiles routières ou conteneurs maritimes de train à train au triage plus classique des wagons. A partir de rames navettes circulant entre les chantiers terminaux, sans remaniement dans la gare de correspondance, COMMUTOR visait non plus à trier des wagons, mais des caisses.

Les trains sont reçus par groupes (« pulsations ») d'une dizaine, dans un temps court (quelques minutes). Les transbordeurs réalisent les permutations d'UTI entre les trains et également la dépose et la reprise, dans une zone de stockage, d'UTI ayant été acheminées par un autre groupe de train.

Pour atteindre les performances visées, il est nécessaire d'automatiser totalement le fonctionnement de la gare de correspondance. Il s'agit de prendre, déplacer, reposer automatiquement tout type d'UTI sur un wagon ou sur un emplacement de stockage. Ceci implique l'utilisation d'une pièce intermédiaire assurant le positionnement et le maintien des conteneurs ou des caisses sur les wagons et permettant d'autre part leur préhension.

La gare de correspondance est composée de travées identiques selon le schéma ci après et fonctionne comme suit :

- Un train de 36 wagons est reçu sur une voie de transbordement.
- Chaque train prévu dans une pulsation doit avoir bien évidemment sa voie de traitement, soit de 8 à 12 voies pour le transbordement, et chaque wagon composant le train doit avoir son transbordeur, soit de 30 à 36 ponts travaillant perpendiculairement aux voies.
- Le train s'immobilise à trois mètres près de la position optimale,
- Un dispositif installé dans la voie permet d'ajuster le positionnement des wagons par rapport aux portiques correspondants à moins de 15 centimètres près. Il y a un dispositif semblable tous les 100 m environs.
- La caténaire est escamotée.
- Une information sur la destination des caisses est lue par un procédé permettant son traitement informatique, cette information comprend le numéro du train, du wagon et de la caisse à charger.
- Après avoir reconnu ces éléments d'informations, le transbordeur correspondant s'avance à la verticale du wagon, prend la ou les caisses à décharger et les dépose sur un train si la correspondance directe dans cette même travée peut être effectuée, ou sur la zone de stockage (une dizaine de voies) si la correspondance doit être effectuée dans cette même travée mais sur un wagon non disponible pour l'instant, ou sur une navette permettant un transfert longitudinal.
- Les navettes sont des wagons automoteurs robotisés circulant sur 2 voies affectées à ce transfert longitudinal, 6 navettes devant circuler sur chaque voie.

- Un plan optimisé pour chaque train est prévu, assuré par un système d'information centrale, en charge de la réservation de place. Ce plan de chargement optimal tient compte des mouvements d'UTI qui doivent être réalisés dans la gare de correspondance.
- Lorsque tous les trains d'une pulsation ont été déchargés de leurs caisses et rechargés des caisses des trains en correspondance ou en attente des pulsations précédentes, les caténaires sont remises en place et les trains peuvent repartir vers leur destination finale.

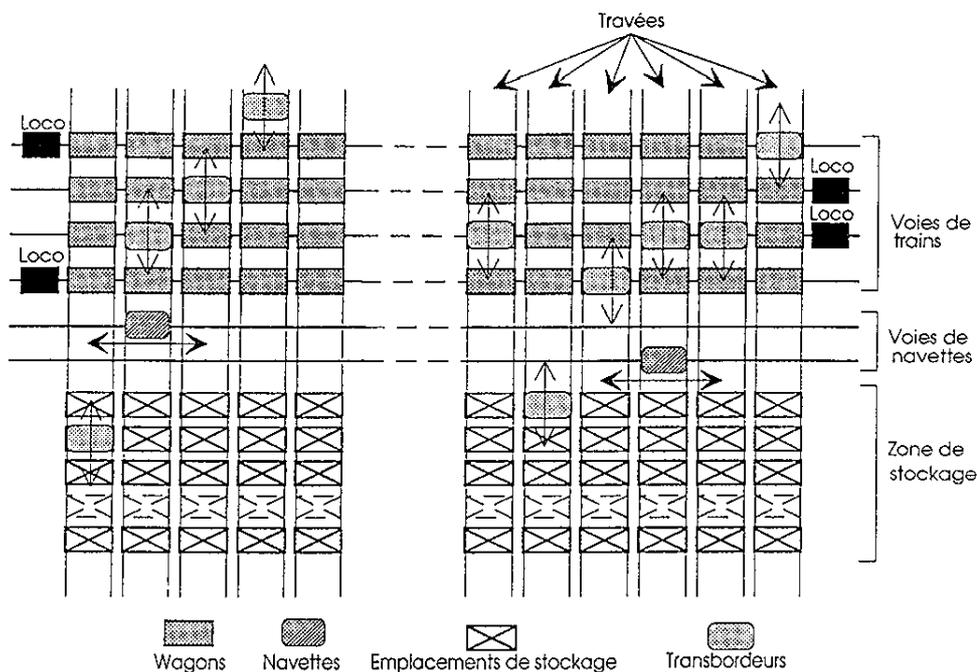


Figure 23 : Photographie d'un transbordeur pilote et plan d'un chantier COMMUTOR

DESIGNATION DU SYSTEME : COMMUTOR					
<b>FONCTION</b>	Solution « hub and spoke » avec forte automatisation				
<b>DESCRIPTION</b>	Système d'échange de caisses mobile en lieu et place d'un triage de wagon				
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>					
Niveau de développement	opérationnel <input type="checkbox"/>		prototype <input checked="" type="checkbox"/>		concept <input type="checkbox"/>
Unités de transport traitées	Caisse mobile, conteneur				
Utilisation	Manuelle <input type="checkbox"/>		Semi-automatique <input type="checkbox"/>		automatique <input checked="" type="checkbox"/>
Personnel de conduite nécessaire	oui		Qualification		Forte
Énergie d'alimentation					
Aspect sécuritaire	insuffisant <input type="checkbox"/>		moyen <input checked="" type="checkbox"/>		bon <input type="checkbox"/>
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>					
Zone routière	Zone de manutention				
Zone stockage temporaire					
Travées	Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier - pas de donnée sur le sujet				
<b>PERFORMANCES</b>					
Vitesse de la rame	Standard ferroviaire				
Délai de traitement d'un train	60 trains par nuit avec 9 rames en parallèle				
Temps d'arrêt sur terminal	Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon = 1,5 h				
Valeur de pente franchissable	Standard ferroviaire				
<b>COMMENTAIRES</b>	Un prototype a été développé à Noisy, trop cher, trop d'investissement dans des nouveaux wagons et pas assez de trafic				
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>					
Coût d'acquisition	Pas de donnée	M€	Coût de maintenance	Pas de donnée	M€
Coût par unité d'oeuvre	Pas de donnée	€	Coût de maintenance	Pas de donnée	€
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>					
Homologation	basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input checked="" type="checkbox"/>		haute <input type="checkbox"/>
Complexité	basse <input checked="" type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/>		haute <input type="checkbox"/>
Présence d'un marché suffisant	basse <input checked="" type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/>		haute <input type="checkbox"/>

Tableau 8: Fiche signalétique solution Commutor

#### 7.2.4.4.8 Le wagon de ferroutage polyvalent AFR

La société ARBEL a travaillé sur le lancement d'un prototype de wagon polyvalent capable d'embarquer n'importe quel type de remorque, des conteneurs et des caisses mobiles. L'investissement initial pour la réalisation d'un prototype de 3 millions d'euros a été cofinancé à 50 % par les fonds FEDER.

#### **Description de la solution ARBEL wagon corbeille rail-route, contenant semi remorque**

Etape 0 : Corbeille vide avant chargement,



Etape 1 : Le semi remorque recule afin de prendre position sur la corbeille,



Etape 2 : Béquillage de la semi remorque et retrait du tracteur,



Etape 3 : Mise en place et verrouillage de l'interface sellette sur le pivot de la semi-remorque à l'aide d'un chariot à fourche. Remontée des béquilles,



Etape 4 : Le chariot à fourche recule l'ensemble semi-remorque / interface dans la corbeille jusqu'à obtention du verrouillage de l'interface sur la corbeille.



Etape 5 : Retrait du chariot à fourche. Semi remorque arrimée sur la corbeille.



Etape 6 : Levage de la corbeille par une autogreue conventionnelle (ou par un portique). La semi remorque est solidaire de la corbeille. La manutention ne génère par d'effort dans la remorque.



Etape 7 : Transfert de la corbeille par l'autogrupe vers le wagon.



Etape 8 : Dépose de la corbeille sur le wagon.



Etape 9 : En fin de dépose, l'interface se verrouillera sur le châssis du wagon, sécurisant l'ensemble semi-remorque / corbeille / châssis du wagon.



### *Caractéristiques du Wagon Polyvalent ARBEL*

#### Trains

- Longueur 420 m
- 20 Semi remorques par train

#### Wagon

- Longueur : 20,080 m
- Distance entre les centres d'essieu : 15,500 m
- Tare du wagon : 22 tonnes +/-2%
- Tare avec corbeille et outillage : 28 tonnes
- Attelage standard

### Corbeille

- Longueur : 12,885 m

### Bogies

- 2 bogies AFR22 auto-freïnés 18 tonnes à 120 km/h
- 22,5 tonnes/essieu à 100 km/h
- Roues au diamètre 920 mm

Suivant le contenant manipulé, trois modes d'utilisation sont proposés :

#### Mode semi remorque :

- Utilisation de la corbeille et de l'outillage sellette
- Semi remorque positionnée dans la corbeille
- Outillage de la sellette bridé sur la corbeille pendant le levage et aussi sur le wagon pendant le transport

#### Mode conteneur

- Incorporation de traverse de reprises des appuis de conteneurs sur le wagon équipé de sa corbeille

#### Mode caisse mobile

- Utilisation de traverses de reprise des appuis de caisse positionnés sur le wagon en lieu et place de la corbeille

La corbeille n'est pas universelle pour tous les types de contenants. Le processus de chargement est donc spécifique pour chaque type de contenant.

Le gabarit acceptable est le gabarit GB1 avec dérogation pour la partie basse.

Les contenants suivants sont acceptés :

- Semi remorque
  - tout type 34 tonnes
  - 13,7 m/ 14 m frigo
- Conteneur 40' 36 tonnes
- 2 conteneurs 20'
- Caisse Mobile 40'/45' 36 tonnes
- Préhension par pinces
- Sans la corbeille et sans dérogation partie basse

### *Exemple d'application*

Une application d'utilisation du wagon polyvalent a été étudiée sur la plate forme de Dourges. Les principaux éléments constitutifs de cet exemple d'application sont repris ci après.

Le processus de fonctionnement repose sur une préparation du chargement en l'absence du train :

- Phase 1 « routier » réalisé en l'absence du train : le semi-remorque est abandonné ou récupéré sur le parking par les routiers.
- Phase 2 « corbeille » réalisé par le personnel de la plate-forme :
  - Entrée/Sortie de la semi-remorque dans la corbeille définie à 8 mn par ARBEL.
  - Pose/dépose des outillages de sellettes sur le semi-remorque.
  - Clipsage/déclipsage de l'outillage dans la corbeille, les deux étapes sont définies à 3 mn.
- Phase 3 « auto grue » réalisé par le personnel de la plate-forme, qui consiste à déplacer la corbeille chargée d'une semi-remorque entre le parking et la zone de chargement/déchargement par auto grue sur pneus. Cette étape est définie à 5 mn
- Phase 4 « train » réalisé par le personnel de la plate forme : une fois le train arrivé, le transfert train/zone de chargement est réalisé par portique ou auto grue. Cette étape est définie à 3 mn.

Soit un total du cycle défini à 19 minutes par semi-remorque.

Le personnel nécessaire est composé par:

- 1 conducteur de tracteur routier,
- 1 conducteur d'auto grue,
- 1 conducteur de chariot élévateur.

Ces trois personnes peuvent traiter un train de 20 wagons toutes les 3 heures.

Cette durée de 19 mn ne définit pas le temps d'immobilisation de la rame en gare ; il regroupe des fonctionnalités différentes. Il convient de lui ajouter les temps de groupage /dégroupe de la motrice électrique pour s'accoupler à une traction diesel car le système de chargement par-dessus impose l'absence de caténaire.

### ***Synthèse des caractéristiques de la solution ARBEL***

Le chargement des contenants est vertical. La solution est polyvalente et permet l'incorporation du wagon dans un fonctionnement classique de transport combiné :

- Utilisation en route roulante,
- Incorporation des wagons dans des trains de porte-conteneurs.

La phase de transition peut aisément accompagner une montée en puissance progressive en fonction du marché :

- Utilisation des plates formes existantes,
- Investissement réduit sur les chantiers,

- Démarrage de l'activité dès la fourniture des wagons.

Le wagon est rustique avec un châssis robuste monobloc dont l'utilisation semble aisée car ne nécessite pas de positionner les wagons avec précision.

**Se pose le problème de recyclage des nacelles après une prise en charge, par exemple, d'une remorque dans le sens montant et le chargement d'un conteneur dans le sens descendant.**

Peut peser sur ce concept les contraintes liées aux difficultés de monter en puissance quand la fréquence des rames devient inférieure au temps d'immobilisation d'une rame pour réaliser son chargement/déchargement.

DESIGNATION DU SYSTEME : ARBEL					
<b>FONCTION</b>	Wagon de ferroutage polyvalent				
<b>DESCRIPTION</b>	Wagon corbeille rail route par chargement vertical des contenants				
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>					
Niveau de développement	opérationnel <input type="checkbox"/>		prototype <input checked="" type="checkbox"/>		concept <input type="checkbox"/>
Unités de transport traitées	Caisse mobile, conteneur, semi remorque				
Utilisation	Manuelle <input checked="" type="checkbox"/>		Semi-automatique <input type="checkbox"/>		automatique <input type="checkbox"/>
Personnel de conduite nécessaire	oui		Qualification		Standard
Énergie d'alimentation					
Aspect sécuritaire	insuffisant <input type="checkbox"/>		moyen <input checked="" type="checkbox"/>		bon <input type="checkbox"/>
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>					
Zone routière	Zone de manutention				
Zone stockage temporaire					
Travées					
Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier - pas de donnée sur le sujet					
<b>PERFORMANCES</b>					
Vitesse de la rame	Standard ferroviaire				
Délai de traitement d'un train					
Temps d'arrêt sur terminal	Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon = 19 min sans le temps de reconfiguration de la rame (présence caténaire)				
Valeur de pente franchissable	Standard ferroviaire				
<b>COMMENTAIRES</b>					
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>					
Coût d'acquisition	Pas de donnée	M€	Coût de maintenance	Pas de donnée	M€
Coût par unité d'oeuvre	Pas de donnée	€	Coût de maintenance	Pas de donnée	€
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>					
Homologation	basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/>		haute <input checked="" type="checkbox"/>
Complexité	basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/>		haute <input checked="" type="checkbox"/>
Présence d'un marché suffisant	basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/>		haute <input checked="" type="checkbox"/>

Tableau 9: Fiche signalétique solution Arbel

#### 7.2.4.4.9 Le wagon pivotant surbaissé Modalohr

Le système Modalohr consiste en un wagon surbaissé, équipé d'un plateau central structurel pivotant qui sert de rampe d'accès aux véhicules routiers. A la différence du transport combiné classique, ni grue, ni portique ne sont nécessaires.

##### Les principales caractéristiques :

- Le chargement des véhicules se fait en simultané et peut être réalisé par les chauffeurs eux-mêmes sans avoir recours à du personnel spécialisé. Les opérations de chargement peuvent être réalisées par un traitement parallèle et non pas séquentiel.
- La combinaison de rampe métallique ou en maçonnerie avec des engins de levage gerbeur induit un dispositif d'infrastructure au sol simple permettant de charger les véhicules latéralement/transversalement par rapport à la plate forme de roulement.
- La possibilité de charger simultanément des camions complets avec tracteurs et remorques (sur deux plates-formes différentes) ou remorques seules.
- Une conception surbaissée offrant la possibilité de charger une large partie des véhicules en circulation.
- Le système Modalohr est à rapprocher des initiatives Flexiwagon, G-2000 et Shwople Train.
- Pas de désaccouplement, le chargement peut se faire sous les caténaires.



Figure 24 : Synoptique du système Modalohr (source Modalohr)

##### Le gabarit

Le plan de chargement du wagon Modalohr est à 220 mm au dessus de la surface du rail. Cette hauteur permet de transporter des poids lourds de 4 m de haut (soit 85% du parc routier actuel) en s'inscrivant dans le gabarit ferroviaire GB1.

##### Le chargement et le déchargement

Le chargement des poids lourds sur les wagons Modalohr se fait horizontalement, à l'aide d'un tracteur routier classique. Le chargement ne nécessite par conséquent aucun engin de manutention. Le chargement du wagon est latéral (la coque du wagon Modalohr s'ouvre en épis). Le chargement se fait wagon par wagon et peut être parallélisé. Le chargement ou déchargement d'un wagon en milieu de rame est possible sans pénaliser les autres véhicules. Modalohr permet le chargement ou le déchargement simultané de plusieurs camions à la fois.

#### Le matériel accepté au chargement

Le wagon Modalohr ne nécessite pas de « contenant » adapté à la technique. Les semi-remorques standard sont acceptées. Il est à noter néanmoins que seuls les ensembles routiers (semi remorque et tracteur) peuvent être chargés sur les wagons Modalohr. Les trains routiers (camion et remorque attelé), très utilisés en Suisse, en Autriche, en Allemagne et dans les pays de l'Est, ne peuvent être chargés. Modalohr ne peut pas prendre en charge les conteneurs et caisses mobiles

#### L'absence de moyen de manutention lourd

Le wagon Modalohr a innové dans son mode de chargement horizontal utilisable directement par le chauffeur routier lui-même et à l'aide de son tracteur. La plate forme Modalohr s'affranchit de la mise en œuvre d'infrastructure (longrines, rails de roulement, chaussée renforcée) imposée par les engins de manutention conventionnels tels que des portiques ou des stackers. Le (dé)chargement est réalisé par des équipements incorporés dans le sol.

#### Le système d'ouverture et de fermeture du wagon

Le wagon Modalohr est composé de deux plate-formes ou coques. La coque est l'élément pivotant permettant le chargement du wagon. Tous les autres éléments concourants à l'opération de (dé)chargement sont au sol. L'ensemble dynamique est donc au sol (positionnement du wagon en face des rampes d'accès, levage de la coque, alimentation des moteurs pour la rotation de la coque) et fonctionne de façon indépendante pour chaque wagon. Il est ainsi possible d'ouvrir et de fermer soit la rame complète simultanément, soit wagon par wagon, selon les besoins de l'exploitation. Cette souplesse de chargement permet d'envisager des relations comportant des correspondances et d'ainsi optimiser le taux de remplissage des navettes Modalohr.

#### Les différentes étapes de l'opération de chargement et de déchargement

*Phase 1 : La rame est livrée sur le chantier.*

*Phase 2 : Les opérateurs alimentent chaque wagon en énergie pneumatique et hydraulique.*

*Phase 3 : Le positionnement final de la rame en face des rampes d'accès est réalisé par l'intermédiaire de vérins positionnés au sol entre les rails.*

*Phase 4 : La coque est ouverte :*

- Déverrouillage de la coque: les vérins situés sous le wagon entre les rails viennent soulever la coque afin de la désaccoupler de la structure fixe du wagon
- Rotation de la coque : une fois soulevée, la coque pivote sous l'effet des galets moteurs qui déplacent l'ensemble coque et chargement sur les galets de réception de la rampe d'accès.

- Mise en position de la coque sur la rampe d'accès : un ensemble de capteur permet d'ajuster la position de la coque sur la rampe d'accès. Lorsque celle-ci est positionnée, on a alors un accès direct au chargement.

*Phase 5 : Le déchargement et chargement du véhicule routier sont effectués par le chauffeur :*

- Déchargement d'un tracteur : ayant rejoint son tracteur (750 m à parcourir pour le plus éloigné), le chauffeur met son camion en condition de marche, le sort de la coque pour venir se positionner en marche arrière face à sa remorque. Dans certains cas il peut avoir à faire le tour du train.
- Déchargement d'une semi remorque : dégagement du gerbeur, mise en place du tracteur, accouplement de la remorque, relevage de la suspension pneumatique de la remorque, relevage des béquilles, départ.
- Chargement d'une semi remorque : Avant de désaccoupler sa remorque, ce dernier s'assure d'avoir ajusté les béquilles qui maintiennent la semi-remorque. Après avoir enlevé le tracteur, l'opérateur ajuste le gerbeur. Cet élément vient centrer la remorque et assurer une reprise d'effort de la charge et ainsi soulager les béquilles. La mise en place de cet élément se fait par une « table » solidaire du châssis du wagon qui encastre dans la rampe d'accès. La mise à niveau se fait grâce à un système de vérins hydrauliques.
- Chargement d'un tracteur : une plate-forme permet de recevoir un seul tracteur ou deux tracteurs en enfilade. Le premier tracteur est mis en lieu et place dans le logement prévu pour la semi-remorque et repose intégralement sur le plancher du wagon. Pour le second tracteur, il y a nécessité d'avoir l'essieu arrière gerbé afin de pouvoir passer au-dessus du bogie. Cette action est rendue possible grâce au gerbeur utilisé dans sa deuxième fonction.

*Phase 6 : Une fois le chargement réalisé, l'opérateur actionne la fermeture des coques :*

- Rotation de la coque : la coque pivote sous l'effet des galets moteurs qui déplacent l'ensemble coque et chargement sur les galets de réception situés entre les rails sous le wagon.
- Mise en position de la coque sur la structure fixe du wagon : un ensemble de capteurs permet d'ajuster la position de la coque et son chargement afin d'encasturer la coque dans la structure fixe du wagon. Une bielle vient alors assurer la fermeture de l'ensemble et sécuriser le verrouillage.

*Phase 7 : Une vis située sur la partie fixe du wagon, pilotée par un moteur hydraulique embarqué, vient reprendre l'effort du gerbeur pendant le transport.*

*Phase 8 : Les alimentations hydraulique et électrique sont déconnectées et les contrôles de départ effectués.*

### Le système de roulage

Le système de roulage du wagon Modalohr est classique. Les bogies et les roues de taille standard sont ceux de wagons de transport combiné classiques. Les bogies utilisés pour le wagon Modalohr (Y33 et Y 25) sont déjà référencés par la SNCF. Ceci a fortement facilité la phase d'homologation.

Les wagons de la route roulante à petites roues ont un coût d'entretien du système de roulage élevé du à la rapidité d'usure de la bande de roulement, et engendre une usure des voies ferrées et des aiguillages importants.

#### La superficie des plates formes

La technique de chargement spécifique au wagon Modalohr impose une emprise au sol importante. Le chargement s'effectue horizontalement et latéralement. Cela nécessite une superficie importante autour de la voie de chargement dégageant l'espace nécessaire pour permettre l'accès aux wagons et les manœuvres des poids lourds.

La plate forme de Bourganeuf Aiton a une superficie de 22 hectares comprenant le contrôle d'accès, l'aire de chargement et l'aire de stationnement.

#### Les infrastructures au sol

La technologie Modalohr requiert une infrastructure au sol pour ouvrir et fermer les wagons. Le wagon Modalohr n'étant pas équipé de système d'ouverture embarqué, l'installation d'équipements au sol se révèle indispensable à la rotation des coques du wagon.

#### Une plateforme dédiée

Une des contraintes majeures liées au mode de chargement Modalohr est l'existence de rampes permanentes indispensables au chargement et au déchargement des véhicules routiers. Ces rampes d'accès aux wagons contiennent des éléments techniques reliés aux installations au sol indispensables au système d'ouverture des coques.

DESIGNATION DU SYSTEME : Wagon Modalohr					
<b>FONCTION</b>		Fournir un wagon de ferroutage			
<b>DESCRIPTION</b>					
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>					
Niveau de développement		opérationnel <input checked="" type="checkbox"/>		prototype <input type="checkbox"/> concept <input type="checkbox"/>	
Unités de transport traitées		Caisse mobile, conteneur, semi remorque			
Utilisation		Manuelle <input checked="" type="checkbox"/>		Semi-automatique <input type="checkbox"/> automatique <input type="checkbox"/>	
Personnel de conduite nécessaire		oui		Qualification Standard	
Énergie d'alimentation					
Aspect sécuritaire		insuffisant <input type="checkbox"/>		moyen <input checked="" type="checkbox"/> bon <input type="checkbox"/>	
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>					
Zone routière		Zone de manutention			
Zone stockage temporaire					
Travées					
Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier - pas de donnée sur le sujet					
<b>PERFORMANCES</b>					
Vitesse de la rame		Standard ferroviaire			
Délai de traitement d'un train					
Temps d'arrêt sur terminal		Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon			
Valeur de pente franchissable		Standard ferroviaire			
Distance moyenne entre terminal					
Impacts environnementaux		Standard ferroviaire			
<b>COMMENTAIRES</b>					
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>					
Coût d'acquisition		Pas de donnée M€		Coût de maintenance Pas de donnée M€	
Coût par unité d'œuvre		Pas de donnée €		Coût de maintenance Pas de donnée €	
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>					
Homologation		basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input checked="" type="checkbox"/> haute <input type="checkbox"/>	
Complexité		basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input checked="" type="checkbox"/> haute <input type="checkbox"/>	
Présence d'un marché suffisant		basse <input type="checkbox"/>		moyenne <input type="checkbox"/> haute <input checked="" type="checkbox"/>	

Tableau 10: Fiche signalétique solution Modalohr

#### 7.2.4.4.10 Le concept R-shift-R

##### Considérations générales à l'origine du concept

Dans tout système de ferroutage, l'immobilisation de la rame sur terminal est en partie imputable à la mise en place du contenant sur le wagon. Afin de dépasser cette contrainte, R-shift-R avance la notion de *praticable*, fondamentale dans le fonctionnement du concept.

Le praticable n'a aucune fonction structurelle dans la construction du wagon. Il n'est pas une exigence du wagon à la différence du plateau pivotant de la technologie Modalohr. Le praticable ne fait pas partie du sous-système wagon, mais du sous système terminal.

Il permet notamment de :

- Dissocier dans le mode opératoire la fonction d'embarquement/débarquement de la fonction de chargement/déchargement sur/ou le/du wagon, ce qui autorise/implique la multiplication des postes d'embarquement/débarquement ;
- Rendre uniforme le profil bas des contenants roulants, ce qui rend possible la manutention sur terminal par le même système de portage.

Ce mode de travail « en séries/parallèle » permet d'obtenir, pour toutes les séquences du cycle, un même temps élémentaire de travail: l'action incompressible et indissociable la plus courte.

R-shift-R repose sur l'idée d'une rame indéformable, dont la configuration n'est pas modifiable (comme la rame d'un TGV). Elle est capable d'évoluer aussi bien sur terrain plat que sur des pentes pouvant atteindre 3,5 %. Ceci implique, afin d'assurer une adhérence suffisante dans toutes les phases de roulage, de *répartir la motorisation sur chaque wagon ou groupe de deux wagons*.

Pour que le développement du combiné rail route ne soit pas contraint pas les problèmes de gabarit des ouvrages jalonnant le réseau ferré Européen, ainsi que par la hauteur des semi-remorques (aujourd'hui à 4,2 m), le concept R-shift-R intègre une fonctionnalité d'adaptation de la hauteur de roulage aux contraintes de l'infrastructure. *Un abaissement de rame est intégré dans la conception des bogies*.

R-shift-R se propose donc de dépasser les contraintes actuelles du transport combiné par le biais technologique :

- Développer une solution d'abaissement de rame en vue de faire circuler en zone contrainte (tunnel) un train à 50 mm de la surface du rail,
- Développer une solution de rame à motorisation répartie permettant de gravir tout type de pente sans reconfiguration et dans des conditions optimales d'usure de la voie,
- Développer une solution de train de fret pouvant circuler à des vitesses semblables aux trains de voyageur afin d'optimiser la gestion des sillons et la mixité fret/voyageur sur le réseau ferré existant,
- Développer une solution de terminal exploitable automatiquement pour les phases de (dé)chargement en vue de pouvoir réduire la distance entre terminal sans pénaliser les temps de trajet, tout en captant davantage de trafic plus diffus.

Une rame R-shift-R repose par conséquent sur les fondamentaux suivants :

- La présence d'un praticable,
- La puissance répartie,
- L'abaissement de la rampe au passage des zones contraintes par le gabarit haut.

### Description du wagon R-shift-R et de son environnement

Le wagon R-shift-R est un wagon monobloc nommé wagon coque. Il ne nécessite pas la présence d'un praticable pendant les déplacements à vide de la rame ou pour l'embarquement des conteneurs de 40 et 45 pieds.

La rame est d'une composition « classique » de deux plate-forme se partageant trois bogies.



**Figure 25 : Schéma d'une rame R-shift-R**

Les contenants acceptés par le système R-shift-R sont les suivants :

- Une remorque routière de 14,6 m de long, de 4,2 m de haut et de 2,6 m de large,
- Un conteneur de 40 pieds de longueur, 2,55 m de largeur,
- Un conteneur de 5 à 10 m de longueur, 2,55 m de largeur,
- Une caisse mobile européenne de 40/45 pieds,
- Un tracteur routier de 7 m ou 2 de 5 m,
- Tous véhicules de 0 à 10 mètres,

Le chargement de 2 conteneurs de 20 pieds ou 2 tracteurs de plus de 5 m n'est pas accepté.

Le wagon R-shift-R est un wagon double de deux fois 14,05 mètres de long reposant d'un côté tête-bêche sur un bogie commun, l'autre extrémité sur un bogie qui lui est propre. L'ensemble est relié, au groupe suivant, par une attache de 3,400 mètres de long.

Cela donne au final un pas de wagon de 15,750 mètres. Ces valeurs donnent pour une rame de 750 mètres 46 wagons de chargement s'encastant entre 2 éléments de conduites, qui peuvent être considérées comme les motrices. La largeur retenue est d'environ 2,960 mètres et une hauteur au-dessus du rail permettant l'embarquement d'une remorque de 4,200 mètres.

### Configuration des terminaux

Les caractéristiques principales du concept R-shift-R qui définissent le fonctionnement des terminaux sont les suivants :

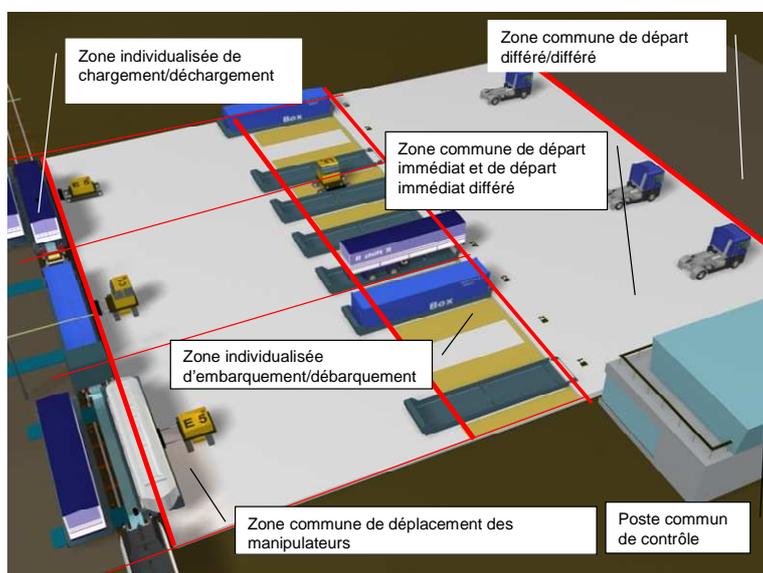
- Un temps d'arrêt de la rame sur terminal pour réaliser les transbordements en 6 mn.
- Un cadencement des sillons par sens devient possible à la fréquence de 15 mn.
- Le temps d'arrêt et le cadencement sont rendus possibles par l'introduction du praticable. Le wagon peut indifféremment prendre en charge tous les types de conditionnements actuellement utilisés par la route.

### Structure d'un terminal

Un terminal est constitué d'unités qui se reproduisent, suivant le niveau d'utilisation, en égalité de nombre avec les wagons qui constituent une rame ; ils sont nommés « modules ». Ces modules sont organisés de façon à permettre la réalisation de l'ensemble des opérations nécessaires au transbordement d'une charge routière sur une rame ferroviaire cela, éventuellement, sur un même quai quel que soit le sens de roulage des rames.

Aux rames de 46 wagons correspondront donc 46 modules. L'organisation du travail nécessite pour fonctionner des séquences manuelles et automatiques.

Un terminal s'édifie autour d'un wagon, d'un module et de deux sens de déplacement.



**Figure 26 : Structure d'un terminal R-shift-R**

Suivant le niveau de l'activité des terminaux, certaines fonctionnalités de même nature, pourront être partagées entre plusieurs modules, d'autre ne pas être installées. Comme par exemple les terminaux d'extrémité qui disposeront systématiquement d'un seul quai qui assurera les deux sens de déchargement/chargement.

La vue ci-dessus, symbolisant 3 modules, schématise l'ensemble des différentes zones nécessaires au fonctionnement d'une gare dédiée R-shift-R. Sans entrer dans les types de configurations qui seront nécessairement différentes suivant le lieu d'implantation, les éléments indispensables au fonctionnement d'un module peuvent être décrits.

Chaque module « R-shift-R » se décompose en trois zones d'action, qui s'accouple individuellement à deux zones secondaires communes au terminal qui sont asservies par un passage obligé au poste de contrôle.

Pour partie ces zones secondaires peuvent se situer en dehors du terminal lui-même.

Les zones de travail sont strictement séparées les unes des autres et répondent chacune à une seule et unique fonctionnalité.

L'organisation se développe suivant deux axes :

- Le premier transversalement par le découpage de la gare en « modules » répétitives,
- Le second longitudinalement par un découpage des activités en fonctions élémentaires et homogènes et communes que nous appelons « Zones ».

Le découpage en modules et le découpage en zones se font en fonction de l'activité de chaque gare.

Ils permettent :

- Une sécurité accrue pour les personnels,
- L'intégration d'automatismes pour certaines zones sans contraintes particulières sur les fonctionnalités des zones avoisinantes,
- Une gestion autonome de chacune zone.

Cette organisation permet, éventuellement, l'affectation de l'activité entre plusieurs acteurs, concessionnaires ou intervenants avec une définition précise des responsabilités. Ces affectations distinctives sont rendues envisageables par la seule présence du « praticable » qui introduit une répartition du travail en zones différenciées et homogènes aptes à assurer une bonne gestion des infrastructures.

Le praticable n'est pas une revendication propre au wagon mais une nécessité propre au fonctionnement des gares.

### Structuration générale d'une gare

Les différentes représentations et animations (3D) permettent de se faire une idée assez précise de la gare. Dans la suite, le cas général du fonctionnement d'un module est abordé, sans se préoccuper du niveau de sollicitation de la gare.

La première partie du mode opératoire consiste à placer, face à chaque wagon, une zone d'embarquement/débarquement des charges (camion, remorque, conteneur, caisse européenne) composé de trois alvéoles alignées perpendiculairement au rail.

La seconde consiste, avec un ensemble mécanique « manipulateur ou automanipulateur » accouplé à un système de gestion des déplacements, à assurer et contrôler le transfert du porte-praticable entre les deux extrémités de sa zone d'action. Les deux parties du cycle fonctionnent de manière asynchrone, l'une, l'embarquement/débarquement, étant gérée par la présence des conditionnements à embarquer/débarquer, l'autre, le chargement/déchargement par la présence de la rame. Ces fonctionnalités se regroupent au sein de « modules », constituant la base commune à toutes les gares.

### Dimensionnement d'un module

Dans chaque module, se regroupent les éléments et équipements propres à assurer les fonctions nécessaires à son exploitation comme les lignes de guidage ou les éléments de manutention entre la rame et ces points d'attentes (les porte-praticables et l'automanipulateur de transfert). La surface de ce module est fixée par sa largeur, définie par le pas des wagons soit 15,750 mètres (second intérêt d'un wagon court) que multiplie la distance nécessaire aux manipulations des charges soit environ 40 mètres. Chaque module d'une surface d'environ 600 m<sup>2</sup> permet de traiter journalièrement 96 (24\*4) wagons soit de manipuler 192 (24\*4\*2) conditionnements.

### Composants du module de base

Pour simplifier le raisonnement, il n'est considéré qu'un seul module de transfert face à une position d'arrêt d'un wagon. La séquence se répétera autant de fois qu'il y aura de wagons à décharger/charger de/sur la rame ou de postes prévus dans une gare pour assurer les transferts.

L'utilisation d'un système de filoguidage a été retenue en première approche pour le contrôle des déplacements. Cependant, d'autres techniques pourraient être envisagées. Tout comme le terme d'automanipulateur signifie un principe de manipulation des praticables, et non pas un système spécialement défini (et notamment un cycle semi-automatique voire manuel pourrait être envisagé pour cette séquence de fonctionnement).

Pour récapituler un module R-shift-R comporte :

- 3 alvéoles de préparation à l'embarquement/débarquement, perpendiculaires à la voie et équipées d'autant de porte-praticables que de praticables,
- 1 ligne A de guidage (unique sur toute la longueur de la gare) qui permet au moyen de manutention de passer d'un module à l'autre,
- 3 lignes B de guidages transversales qui définissent sur la ligne A, les points de retournement des porte-praticables,
- 1 manipulateur des porte-praticables,
- 1 fosse pour le passage de la rame,
- 1 système de relevage des praticables au-dessus de la fosse,
- 1 système d'obturateur de fosse « palettes chariots ».

Certain de ces composants pouvant desservir plusieurs modules.

La fiche signalétique du concept R-shift-R est fournie au paragraphe 7.2.6.

DESIGNATION DU SYSTEME : R-shift-R					
<b>FONCTION</b>	Fournir une solution de rupture pour le ferroutage				
<b>DESCRIPTION</b>	R-shift-R s'organise autour de wagon avec bogie à motorisation répartie et système de monte-et-baisse, des praticables sur lesquels sont déposés les contenants acceptables, des porte-praticables pour les transférer, et des systèmes au sol.				
<b>SPECIFICATIONS GÉNÉRALES</b>					
Niveau de développement	opérationnel <input type="checkbox"/> prototype <input type="checkbox"/> concept <input checked="" type="checkbox"/>				
Unités de transport traitées	Caisse mobile, conteneur, semi remorque				
Utilisation	Manuelle <input checked="" type="checkbox"/> Semi-automatique <input checked="" type="checkbox"/> automatique <input checked="" type="checkbox"/>				
Personnel de conduite nécessaire	Fonction du degré d'automatisation Qualification Standard				
Énergie d'alimentation	électrique				
Aspect sécuritaire	insuffisant <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> bon <input checked="" type="checkbox"/>				
<b>CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES</b>					
Zone routière	Zone de manutention				
Zone stockage temporaire					
Travées					
<i>Ces éléments sont fonction de l'activité prévue sur le chantier.</i>					
<b>PERFORMANCES</b>					
Vitesse de la rame	Standard ferroviaire, 15 mn de cadence				
Délai de traitement d'un train	6 mn				
Temps d'arrêt sur terminal	Délai de traitement d'un train + temps de contrôle ferroviaire + reprise d'un sillon				
Valeur de pente franchissable	3,5%				
Distance moyenne entre terminal	Faible (type TER)				
Impacts environnementaux	Faible (électrique)				
<b>COMMENTAIRES</b>					
<b>DONNEES ECONOMIQUES</b>					
Coûts d'acquisition:					
Tracteur de quai	250	Manipulateur praticable	150		
Praticable	21 k€	Transfert de voie	180	k€	
Porte praticable	65	Rame (46 wagons)	21600		
		Gare (génie civil/module)	1000		
Coût MO annuel ( <i>chiffrage pour une version manuelle</i> )	42 k€	Coût de maintenance	6	%	
<b>FACILITE DE MISE EN OEUVRE</b>					
Homologation	basse <input type="checkbox"/> moyenne <input type="checkbox"/> haute <input checked="" type="checkbox"/>				
Complexité	basse <input type="checkbox"/> moyenne <input type="checkbox"/> haute <input checked="" type="checkbox"/>				
Présence d'un marché suffisant	basse <input type="checkbox"/> moyenne <input type="checkbox"/> haute <input checked="" type="checkbox"/>				

Tableau 11: Fiche signalétique solution R-shift-R

#### 7.2.4.4.11 Comparaison des techniques étudiées

La comparaison des différentes solutions de ferroutage étudiées est difficile dans la mesure où les enjeux auxquels répondent chaque solution diffèrent fortement. R-shift-R reconfigure complètement le paysage ferroviaire du fret par son fonctionnement TER et l'hypothèse que la demande sera présente alors que toutes les autres solutions s'appuient sur l'exploitation ferroviaire actuelle sans la remettre en cause.

Le tableau qui suit synthétise les principales caractéristiques de 5 techniques de transport combiné.

	R-shift-R	ARBEL	Modalohr	Route/roulante	Transport Combiné classique	
Hauteur du plan de chargement	Variable de 250 mm à 50 mm	n.c.	220 mm	450 mm	Wagon poche : 330 mm	Wagon surbaissé : 825 mm
Types de contenant acceptés	Semi, caisse mobile, conteneur	Semi, caisse mobile, conteneur	Semi, camion	Ensemble articulé, camion	Semi, caisse mobile, conteneur	
Motorisation	Répartie	Standard	Standard	Standard	Standard	
Pente sans reconfiguration de la rame	3,5%	1,25%	1,25%	1,25%	1,25%	
Abaissement de hauteur de rame	Oui	Non	Non	Non	Non	
Dissociation des fonctionnalités embarquement/chargement	Oui	Oui	Non	Non	Non	
Diamètre des roues	920 mm	920 mm	Idem TC	360 mm	Bogie extrémité : Y33, 840 mm Bogie central : Y25, 920 mm	
Mode chargement	Horizontal	Vertical	En épi	En file indienne	Vertical	
Rupture de la rame (due à la présence de caténaire)	Non	Oui	Non	Oui	Oui	

Configuration haut débit	Facile	Difficile	Difficile	Possible	Possible
Temps déchargement / chargement	6 mn	n.c.	45 mn	n.c.	n.c.
Temps débarquement / embarquement disponible	45 mn	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.
Temps d'immobilisation sur quai	15mn	106 mn	60/70 mn	96 mn	n.c.
Nombre de wagon par rame de 750 m	46	35	36	n.c.	n.c.
Capacité journalière en nombre de contenants (24 h) d'un quai, rame 750 m	4416	450	864	n.c.	n.c.
Surface chantier par quai en m <sup>2</sup> hors stockage	68250	99360	82350	n.c.	n.c.
Largeur du terminal (m)	65	270	61	n.c.	n.c.
Longueur du terminal (m)	1050	368	1350	n.c.	n.c.
Longueur du wagon (m)	15,75	20,08	21	n.c.	n.c.
Vitesse de rame (km/h)	160	140	120	100	n.c.
Nombre de quais par sens pour 1000 embarquements par jour	0,226	2,22	1,16	n.c.	n.c.

Tableau 12: Comparaison des techniques étudiées

## 7.2.4.5 Les systèmes d'information

### 7.2.4.5.1 Introduction

Aux flux physiques des marchandises et des matériels de transport, correspond inéluctablement un flux d'informations dont l'importance est de plus en plus souvent mise en exergue et le traitement fiable et rapide est considéré comme un critère indispensable à la bonne gestion.

Toutes les entreprises qui utilisent le ferroviaire comme mode de transport n'échappent pas, d'évidence, à cette nécessité. Nécessité qu'elles ont d'ailleurs prise en compte depuis de nombreuses années par un recours constant à l'informatique. Toutefois, depuis un certain temps, le contexte a considérablement évolué, qu'il s'agisse du volume d'activité ou des moyens de nature informatique pouvant être mis en œuvre.

Le plus souvent, les systèmes d'information, liés à la gestion et/ou l'exploitation des parcs wagons, sont des applications spécifiques, développées branche par branche sans lien direct, en interne, ou confiées à des sociétés de services en informatique pas toujours spécialisées.

A côté de ces systèmes d'information, on constate aussi que des solutions événementielles sont mises en place.

Il est également possible de suivre l'état des commandes et l'acheminement des marchandises directement sur Internet en accès sécurisé, c'est un plus, mais là encore, on est en dehors du système d'information de l'entreprise.

Comme il n'y a pas de lien entre ces différents systèmes, la gestion globale se complique, nécessite davantage de ressources, et la fiabilité s'en ressent.

En effet, les progiciels spécialisés sont peu nombreux, et prennent rarement en compte la totalité des besoins des entreprises. Certaines ont leurs spécificités, et les adaptations sont donc nécessaires.

Toutes les branches de l'activité sont couvertes, mais la précision dans certains domaines n'est pas parfaite. En revanche, un produit modulaire, adossé à un système de navigation largement ouvert facilite la gestion, économise des ressources et fiabilise davantage l'exploitation.

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) sont peu employées, et pourtant il y a un vaste champ d'application. Dans ce domaine, comme dans la plupart des autres, on constate que beaucoup de systèmes d'information sont en fin de cycle. Avec le développement des nouveaux systèmes (déjà en cours pour certains), les nouvelles technologies, bien éprouvées maintenant, seront largement utilisées.

### 7.2.4.5.2 Les données utilisées dans la gestion des wagons

Selon les types de données, les supports sont généralement différents. Un même type de données peut aussi se trouver sur un support différent.

Les normes ne sont pas toujours utilisées, et, quand elles le sont, selon l'acteur ce ne sont pas toujours les mêmes. De ce fait, certains doivent mettre en œuvre toutes les normes utilisées par les uns et les autres, ce qui complique fortement la mise en œuvre, et augmente d'autant les coûts d'achat et de maintenance de ces produits.

En premier lieu, les informations liées à la commande peuvent être fournies sous forme de fax, de mail, d'envoi électronique en EDI. Plus rarement et depuis peu, la saisie directe par le client via des applications Web, mises à disposition des clients, voit le jour.

Pour le suivi opérationnel et le positionnement des wagons, ce sont généralement les Réseaux Ferroviaires qui fournissent les informations. Dans certaines activités, les chargeurs et les destinataires fournissent aussi des informations. Là encore il n'y a pas de normalisation, aussi bien sur la forme que sur le fond.

En France, les informations fournies par FRET SNCF (informations du système NAW (Nouvel Acheminement Wagons), du nouveau système de gestion des commandes DEF) et du système de facturation sont nombreuses, riches, et mises à disposition de ses clients par un système de vacation qui selon le paramétrage peut descendre jusqu'à l'heure. On peut penser que cela est suffisant pour assurer une gestion correcte.

Hélas, deux constats sont à faire :

- Le premier concerne des retards dans la distribution de ces informations, retard plus ou moins important selon le type d'événement,
- Le second porte sur le manque et le retard de saisie.

Il faut aussi noter qu'il y aura toujours un faible taux incompressible d'anomalies.

Cet état de fait a pour conséquence un affaiblissement de leur fiabilité quand elles sont utilisées en exploitation pendant la phase opérationnelle.

Il s'agit d'informations systématiques dont la saisie est réalisée sur le lieu ou proche du lieu où s'est produit l'événement, enrichi par le système d'information qui la traite.

C'est ainsi que l'on a connaissance des événements suivants :

- Départ du point expéditeur avec indication de la date d'arrivée prévue,
- Arrivée au point destinataire,
- Arrivée différée au point destinataire,
- Livraison sur l'installation terminale embranchée (ITE),
- Restitution à la gare,
- Sortie du territoire (Passage Frontière Export),
- Entrée sur le territoire (Passage Frontière Entrée),
- Entrée en atelier,
- Sortie d'atelier,
- Aléas du transport.

On remarque dans ce dispositif qu'entre le départ et l'arrivée l'information est quasi inexistante. Cependant, un système de «Quest» - « où est mon wagon, où est mon train » - existe. Son utilisation est manuelle via Internet. Une expérimentation d'automatisation a été réalisée avec succès, mais compte tenu de l'importante consommation en ressources informatiques elle n'a pas été généralisée.

Malgré tout, avec l'utilisation d'outils de contrôle de la base événementielle, présents dans la plupart des systèmes, on obtient la restitution des anomalies détectées qui permet les corrections utiles, afin de disposer d'une matière fiable pouvant être utilisée jusqu'à la facturation des transports.

En Europe, les Réseaux Ferroviaires adhérant au système HERMES, peu nombreux, peuvent fournir des informations pour tout wagon parti de France vers l'étranger, ou à destination de la France en provenance de l'étranger, ou encore en transit via la France. Ces informations sont fournies via FRET SNCF comme vu ci avant. Le résultat n'est pas excellent. En dehors d'HERMES, il est très difficile d'obtenir des informations au delà des Réseaux qui jouxtent la France.

Mis à part la SNCB qui fonctionne presque comme FRET SNCF (informations systématiques), et délivre ses informations au fil de l'eau, les autres Réseaux fournissent des informations de positionnement dont la présence et la qualité ne sont pas exemplaires. C'est mieux que rien, mais très nettement insuffisant pour assurer une gestion efficace. Quant aux réseaux des pays nouvellement entrés dans l'Union européenne, il y a énormément à faire, mais on peut penser que le retard sera comblé dans un délai raisonnable.

Au plan des communications, il y a beaucoup de diversités. Certains déposent les informations dans une boîte à lettres, et l'utilisateur doit aller les chercher, d'autres les déposent directement dans la boîte à lettres de l'utilisateur qui n'a plus qu'à la vider. D'autres encore procèdent par transfert directement intégré au processus d'extraction des informations, lancé par l'utilisateur à partir d'un poste de travail.

Il n'existe pas de format commun, encore moins de norme.

Des systèmes de balises au sol qui détectent le passage des convois et identifient les matériels existent, mais les installations ne sont pas significatives. Là aussi chaque réseau a son système, sa norme. Dans ces conditions, une harmonisation des systèmes ne se fera pas avant longtemps, et l'utilisation du GPS pour positionner les matériels devrait s'imposer à court terme. Aujourd'hui, les résultats obtenus avec la solution GPS/GPRS et en secours GSM sont très satisfaisants et encourageants pour le futur. De plus avec un tel système, d'autres informations peuvent être remontées par installation de capteurs sur les matériels, ce qui apporte un plus pour la gestion.

Cependant, ces seules informations ne sont pas suffisantes. Elles apportent certes un complément précieux, mais doivent être associées aux bases de données de gestion de parcs pour satisfaire pleinement l'attente des utilisateurs.

#### 7.2.4.5.3 Les systèmes de gestion (exploitation) des wagons

Le fait générateur du transport est généralement la commande client. Cette commande a pour but un voyage en charge, qui est donc le pivot de toute la chaîne logistique mise en œuvre pour le réaliser. Cependant, il ne peut être traité isolément, tout voyage en charge nécessitant la mise à disposition de wagons vides. Ces derniers peuvent être pris sur le lieu de déchargement pour être rechargés sur place, mais toutes les marchandises ne s'inscrivent pas dans ce cas de figure. Certains facteurs doivent être pris en compte (catégorie de wagons liée au produit, nettoyage des wagons avant rechargement, ...), voire d'autres contraintes. Il est donc indispensable d'associer l'acheminement des wagons vides (l'approche) sur le lieu de chargement, au traitement du voyage en charge. Dans ces conditions, il est indispensable

d'avoir une bonne vision sur l'ensemble des matériels vides disponibles ou en prévision de disponibilité pour être livrés à la bonne date sur le lieu de chargement. Bien évidemment la maintenance technique doit être prise en compte pour le recensement de cette population. Le positionnement précis de chaque matériel est d'une importance capitale dans ce dispositif.

D'une manière générale, on trouve toujours la commande du client comme support de gestion du transport de la marchandise (le voyage en charge). Elle nourrit le portefeuille commandes qui constitue le planning de réalisation dans le temps. C'est vraiment le cœur de tout système d'exploitation d'un parc wagons.

La composition non exhaustive de ses annexes est détaillée ci-dessous :

- La gestion des documents (envoi de documents aux différents intervenants dans la chaîne logistique).
- La traçabilité de la marchandise.
- Le recueil de tous les événements émis ou reçus dans la phase pré opérationnelle puis opérationnelle.
- La commande des wagons vides pour approvisionner le lieu de chargement.
- Les conditions commerciales et financières globales et détaillées pour l'achat de prestations, la vente du transport et l'écart qui correspond à la marge de l'affaire.
- Les wagons retenus, nommément désignés avec l'historique des derniers produits transportés.
- Le suivi de l'acheminement pour les wagons vides dans le cas où il n'y a pas de disponibilité sur place, dès lors que l'on est entré dans la phase opérationnelle (départ vers le lieu de chargement).
- Le suivi de l'acheminement du transport en charge dès que les wagons ont été remis à l'entreprise ferroviaire retenue pour la traction, en phase opérationnelle.
- La prévision de réaffectation des matériels après déchargement.

L'utilisation de la lettre de voiture électronique (e-LV) se généralise maintenant, c'est un facteur important en gain de temps, fiabilité et sécurité pour tous les acteurs concernés.

#### 7.2.4.5.4 Les outils d'aide à la décision

Ils ne sont pas présents dans tous les systèmes utilisés, et pourtant ces outils offrent une aide précieuse aux utilisateurs et permettent d'abaisser les coûts d'acheminement des wagons vides sur les points de chargement et de retenir le matériel le mieux adapté au transport de la marchandise. Ils peuvent aussi servir dans le choix des ateliers pour effectuer des réparations en proposant celui qui est le mieux placé par rapport à la position du wagon. Le troisième cas d'utilisation est celui de l'envoi sur un site de stationnement (chômage) en attendant une future utilisation.

Bien évidemment, selon le besoin, acheminement vers un lieu de chargement, envoi en atelier ou envoi en chômage, les critères retenus sont différents et plus ou moins nombreux. Tous ne sont pas conçus pour prendre en charge les différents cas de figure exposés ci avant.

Certains intègrent bien ces notions ; ils sont construits en faisant appel à un paramétrage à géométrie variable. Il est utilisé dans la phase d'extraction des données à mettre au jeu qui expriment les besoins (commandes clients ou atelier) et pour les ressources (stocks disponibles (chômage, sortie atelier), restitutions des clients) dans la phase de calcul pris en charge par le moteur d'optimisation (Solveur), puis dans la phase de restitution des résultats. Résultats qui constituent autant de scénarii que l'optimisation a été recalculée en faisant varier le paramétrage. L'utilisateur choisit alors le résultat qu'il juge le meilleur.

L'utilisation de ces outils prend toute son importance à la condition d'avoir toute liberté dans le choix des déplacements à vide d'une part, et que d'autre part les acheminements en charge ne soient pas défaillants. Aujourd'hui, on constate qu'en France cette liberté n'est plus aussi large que dans un passé récent. Sur certains axes, la faveur donnée aux navettes, pour le moment, ne nécessite pas l'utilisation des systèmes d'optimisation. Mais dans ce cas, ils peuvent être utilisés pour faire la comparaison entre le choix libre des déplacements et l'option navette, sans oublier la prise en compte du facteur coût/temps.

#### 7.2.4.5.5 *Les systèmes de Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) et les outils de diagnostic*

Toujours présents dans les systèmes d'information des principaux gérants de parc, ils ne sont pas toujours reliés à la gestion de l'exploitation commerciale, et vont plus ou moins loin dans l'approche de la gestion de la maintenance pour laquelle il faut distinguer plusieurs volets.

Un volet prend en charge la gestion des révisions wagons qui s'inscrit dans un cadre réglementé, un autre correspond à la gestion de la visite préventive wagon (VPW), un troisième traite les réparations accidentelles (RA).

Dans le premier volet, le système GMAO fabrique le plan de révision de la période considérée et le présente au service technique qui peut y apporter toutes les modifications utiles. Après validation, il est valorisé à partir de la table des travaux qui inclut le coût de ces derniers ainsi que le coût des matières associées. Il peut aussi être complété de coûts globaux estimés.

A ce stade, il représente le budget technique du plan de révision.

Avec ces éléments, le service technique possède une bonne visibilité du programme de révision. Le gestionnaire du service technique, à partir de ce programme voit sa tâche simplifiée pour réaliser les attributions ateliers pour chaque matériel du programme.

A partir de ce moment, le système de gestion de l'exploitation est informé en permanence de la date d'envoi prévue et de l'atelier désigné.

Au plan du suivi des opérations de maintenance, on constate que la plupart des ateliers sont équipés en systèmes d'information. Ils fournissent aux gestionnaires techniques toutes les informations, très détaillées, pour nourrir leur base de données technique en faisant largement appel à la copie électronique via Internet. Comme pour la gestion de l'exploitation, il n'y a pas de normalisation depuis que la copie électronique a remplacé le papier.

Il est bon de rappeler que l'AFWP (Association Française de Wagons de Particulier) depuis longtemps a joué un rôle fédérateur qui a permis de normaliser tous les formulaires papier. Avec la montée en puissance de la copie électronique, il paraît nécessaire de reprendre les travaux de normalisation sur ces nouvelles bases. Chaque gestionnaire technique a son propre

format et demande à tous les ateliers avec lesquels il travaille de le respecter scrupuleusement. Seuls les ateliers SNCF fournissent leur propre format, et il faut s'adapter.

Par ailleurs, certains gestionnaires ont mis en ligne, sur leur site Internet, un système de constat d'avarie qui permet au client, au chargeur, voire à d'autres intervenants de signaler les défaillances constatées sur le wagon par simple usage de la souris et quelques cases à cocher.

Ces précieuses informations sont mémorisées directement dans la base de données du système GMAO. Le gestionnaire technique est informé de ce constat par l'envoi automatique d'un courriel qui peut être adressé en copie à différents destinataires. C'est un progrès important.

A noter que les entreprises ferroviaires auront l'obligation de fournir le formulaire renseigné. On peut penser qu'une normalisation sera mise en place dans le cadre de son informatisation.

La mise en place du Contrat Uniforme d'Utilisation (CUU), remplaçant du RIV apporte lui aussi son lot d'implémentations nouvelles qui devront être prises en compte.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ce pan de l'activité wagon a bien suivi l'évolution technologique et les quelques progiciels présents sur ce marché n'y sont pas étrangers. Néanmoins, des progrès sont encore possibles, et comme pour les systèmes de gestion de l'exploitation, les nouveaux outils permettront naturellement de les réaliser.

#### 7.2.4.5.6 Les systèmes de géo-localisation

Bien que déjà connu voire utilisé par nombre d'entreprises depuis quelques années, le transport ferroviaire en est encore aujourd'hui aux balbutiements. De nombreux tests ont été faits, certains sont encore en cours de validation. Quelques entreprises commencent à s'y intéresser, mais ne sont pas encore prêtes à se lancer. Si tout le monde s'accorde à dire qu'avec ces nouvelles technologies il y a un réel et grand progrès au bout du chemin, un doute subsiste quant à la fiabilité des matériels. Ce doute porte souvent sur la résistance dans un environnement hostile et sur la capacité énergétique pour donner la plus grande autonomie possible afin de rendre le système totalement indépendant des moyens de traction. A cela, s'ajoute le financement qui, malgré la baisse conséquente des coûts de l'électronique et des communications, représente encore des sommes importantes. Mais, il doit être mis en adéquation avec les gains de productivité qui peuvent être obtenus avec un tel dispositif. De plus, dès lors que les wagons quittent le réseau Français, il devient très difficile de les suivre. Comme déjà dit, le système HERMES est loin de restituer des informations de qualité et quand il le fait ce n'est que sur un petit nombre de réseaux avec des conditions très restrictives. Par ailleurs, les nouveaux systèmes d'information centralisés, basés sur la délivrance des messages systématiques ne sont pas encore totalement opérationnels. Et, de toute façon ils risquent de ne pas permettre à tous les maillons de la chaîne logistique d'avoir droit aux informations recueillies.

Au plan technique, les balises ont beaucoup évolué. Les évolutions significatives portent sur :

- L'alimentation électrique des balises qui après être passée par les batteries rechargeables, les piles jetables, utilise aujourd'hui l'énergie renouvelable produite par des capteurs photovoltaïques,
- La durée de vie (e.g. 20 ans pour des systèmes à énergie solaire),
- La localisation (GSM, GPS, futur Galiléo) et la transmission des informations (GSM, GPRS),

- L'encombrement et le poids des balises, qui ont été réduits de manière très significative,
- Leur étanchéité (typiquement de niveau IP65) et la tolérance aux changements de températures (e.g.  $-25^{\circ}\text{C}$  à  $+65^{\circ}\text{C}$ ),
- La fixation sur les wagons, qui peut se faire :
  - Soit par vissage, ce qui nécessite un passage en atelier, et donc un coût,
  - Soit par plots magnétiques (de deux à quatre (30Kg pour chacun) avec éventuellement quatre points de colle). Cette opération se réalise sans passage en atelier.

Différentes options sont envisageables, elles portent sur :

- Le calcul de la distance réellement parcourue,
- L'état du wagon, vide ou chargé,
- L'intensité des chocs avec communication du lieu, de la date et de l'heure à laquelle il s'est produit, ainsi que la mesure de l'intensité,
- La détection de boîte chaude,
- La mesure de la température pour certains produits,

Au plan financier, les coûts ont diminué et sont maintenant abordables. Il faut distinguer trois types de coûts :

- L'investissement à réaliser pour l'acquisition des balises,
- Les coûts de communications des différents opérateurs,
- Le coût du service qui accompagne la fourniture des données.

## 7.2.4.6 Quelques expériences réalisées et meilleures pratiques

### 7.2.4.6.1 IAV (identification automatique des véhicules)

Les entreprises ferroviaires aux Etats-Unis (membres de l'ARR Association of American Railroads) ont équipé leurs wagons de « tags » d'identification automatique des véhicules (IAV). Ces « tags » permettent d'éviter la saisie manuelle des diverses informations concernant le wagon. Quand le wagon passe devant des bornes, dont la fonction est d'interroger les tags, l'information est transmise automatiquement au système d'information. Celui-ci permet donc de suivre et de contrôler les wagons tout en étant plus performant et plus fiable. Ce système de transmission automatique peut aussi être utilisé comme vecteur d'informations en rapport avec l'état du wagon, comme la température, l'état d'ouverture des portes, l'historique des chocs...

### 7.2.4.6.2 Shortlines

Les « shortlines » au Canada sont opérées par des sociétés de chemin de fer indépendantes qui travaillent sur des distances relativement courtes. Ces sociétés louent la totalité de l'infrastructure ou même la rachètent au réseau national. Ces types de ligne existent pour une des trois raisons :

- La première est liée aux industries. Certains centres industriels fonctionnent exclusivement avec une mine ou une carrière proche. Les échanges sont symétriques et exclusifs, donc simples à opérer.
- La seconde raison est de pouvoir relayer les opérateurs nationaux surdimensionnés et peu efficaces pour les courtes distances.
- Enfin, la dernière raison vise à mieux coordonner les trafics régionaux de voyageurs avec les trafics régionaux de fret et les petites structures sont plus flexibles pour cela.

Cette mutation du réseau ferroviaire a vraiment démarré en 1996 avec 1 674 kilomètres de voie abandonnés et 3 915 autres kilomètres vendus à des exploitants privés de lignes ferroviaires locales. De plus, des lignes sont exploitées par des filiales de trafic régional de l'opérateur historique. Cette régionalisation a permis de densifier le réseau car en moins de deux ans les opérateurs privés ont mis en place ou réhabilité plus de 3 000 kilomètres de voies supplémentaires.

### 7.2.4.6.3 Espagne

La RENFE a mis en place depuis plus d'un an une tarification équilibrée vide/chargée sur le secteur de l'automobile (distribution et approvisionnement d'usines). Ce rééquilibrage ne s'est pas fait par une modification de la tarification publique mais par des contrats cadres avec les commissionnaires logisticiens et les chargeurs pour éviter les effets de bord (sur des trafics équilibrés, la RENFE aurait perdu trop de recettes). Si on donne un indice de prix à 100 pour le chargé au départ, on peut considérer que le vide était taxé à 10. Le prix équilibré s'est donc trouvé dans la plupart des cas à 55 pour le transport à vide et le transport à charge.

La mesure a été accueillie très favorablement par le secteur de l'automobile et les effets sur les choix de trafic ont été sensibles. Les triangulaires devenant de plus en plus intéressantes, les chargeurs et les logisticiens se sont arrangés pour les mettre en place même si des modifications importantes ont dû s'opérer. Ceci a aussi permis de redonner de la valeur au transport à vide et donc une priorité plus importante. Cette expérimentation a été pérennisée et devrait être étendue dès cette année à d'autres secteurs.

#### 7.2.4.6.4 Belgique

Pour se préparer à la venue d'acteurs privés sur le marché de la traction ferroviaire, B-Cargo s'est orientée sur deux axes de développement. D'une part, ils ont mis en place des navettes régulières entre Antwerpen et plusieurs zones d'activités importantes (Duisburg, Zeebrugge, la région de Charleroi,...) avec une desserte capillaire à proximité du terminal d'Antwerpen.

D'autre part, ils développent la polyvalence des conducteurs sur les dessertes locales. Ils les forment aux actions de manutentions pour diminuer les coûts d'exploitation. Ce dernier projet se heurte à une pression sociale très forte. Il est donc mené avec prudence dans la durée. Le choix entre la sous-traitance (privée ou avec une filiale) et la différenciation des postes dans B-Cargo entre les conducteurs de lignes nationales et de lignes locales n'a pas encore été fait.

## 7.2.5 L'INFRASTRUCTURE

### 7.2.5.1 Le réseau ferré Européen

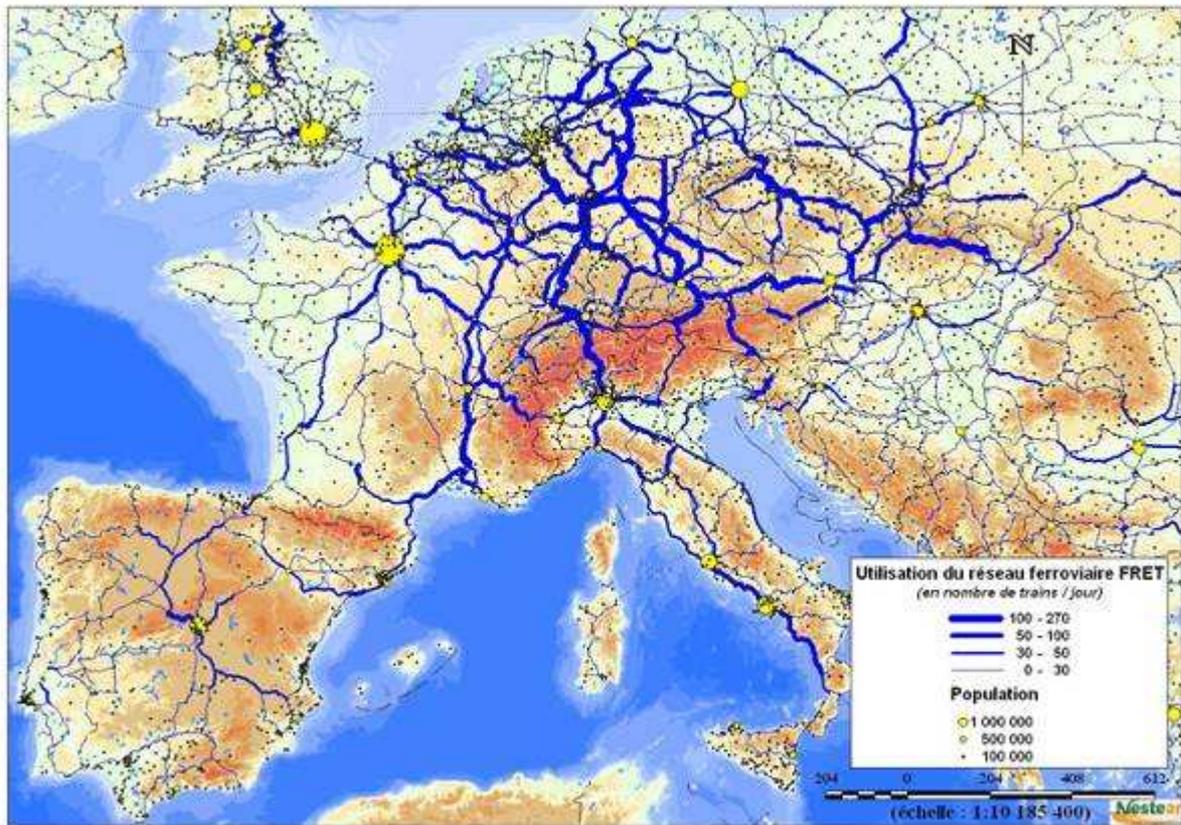


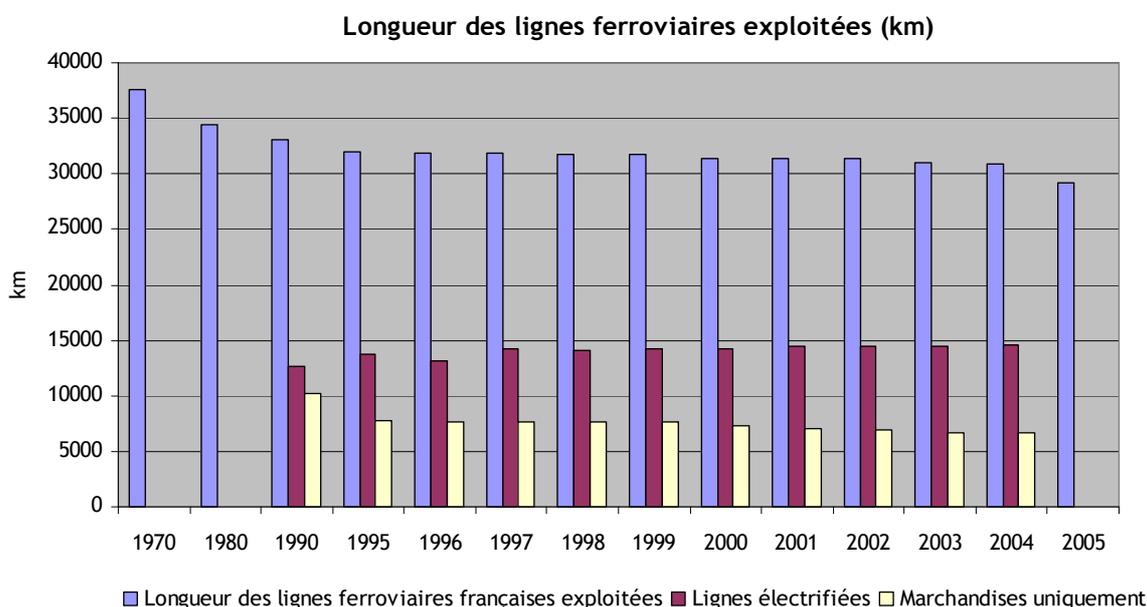
Figure 27 : Utilisation du réseau ferroviaire FRET européen (source Nestear, 2005)

### 7.2.5.2 Le réseau ferré Français

Le réseau ferré français s'étend sur 29 000 kilomètres ouverts à l'exploitation commerciale, répartis comme suit :

- Lignes à grande vitesse (LGV) : 1.550 km
- Lignes à deux voies et plus : 16.104 km
- Lignes électrifiées : 14.778 km
  - En 1.500 volts continu : 5 885 km
  - En 25.000 volts alternatif : 8 771 km
  - Par troisième rail et autres : 122 km

En tout, 819 km de voies de desserte fret existent en France et 52.990 km de voies ferrées principales sont en exploitation.



**Figure 28 : Evolution de la longueur des lignes ferroviaires françaises exploitées (source Faits et Chiffres 2006 – Statistiques du transport en France, UFR, 2006)**

### 7.2.5.3 L'articulation du réseau entre le transport fret et voyageurs

Si la plupart des lignes du réseau sont mixtes (voyageurs / fret), certaines sont dédiées à une seule activité :

- Les lignes TGV, RER et certaines lignes régionales ne sont ouvertes qu'au trafic voyageur,
- Plus de 6.000 kilomètres de lignes sont réservées au trafic fret. Il s'agit principalement de lignes d'embranchement desservant uniquement des sites industriels.

La différence de vitesse entre trafic fret et voyageurs pose des problèmes d'écoulement sur les lignes mixtes les plus chargées. Toutes les futures lignes nouvelles n'ont plus forcément vocation à être dédiées au seul trafic TGV. Faute de potentiel suffisant pour utiliser toute la capacité, certaines de ces lignes nouvelles seront mixtes. Là où le trafic est suffisant pour occuper la capacité de la ligne et la rentabiliser, le principe d'une ligne dédiée aux voyageurs sera pertinent.

#### 7.2.5.4 L'articulation diesel / électricité

Aujourd'hui, deux modes de traction sont utilisés sur le réseau français : la traction diesel et celle basée sur l'électricité.

Les modes de traction des locomotives sur le réseau national sont indiqués sur la carte ci-dessous :

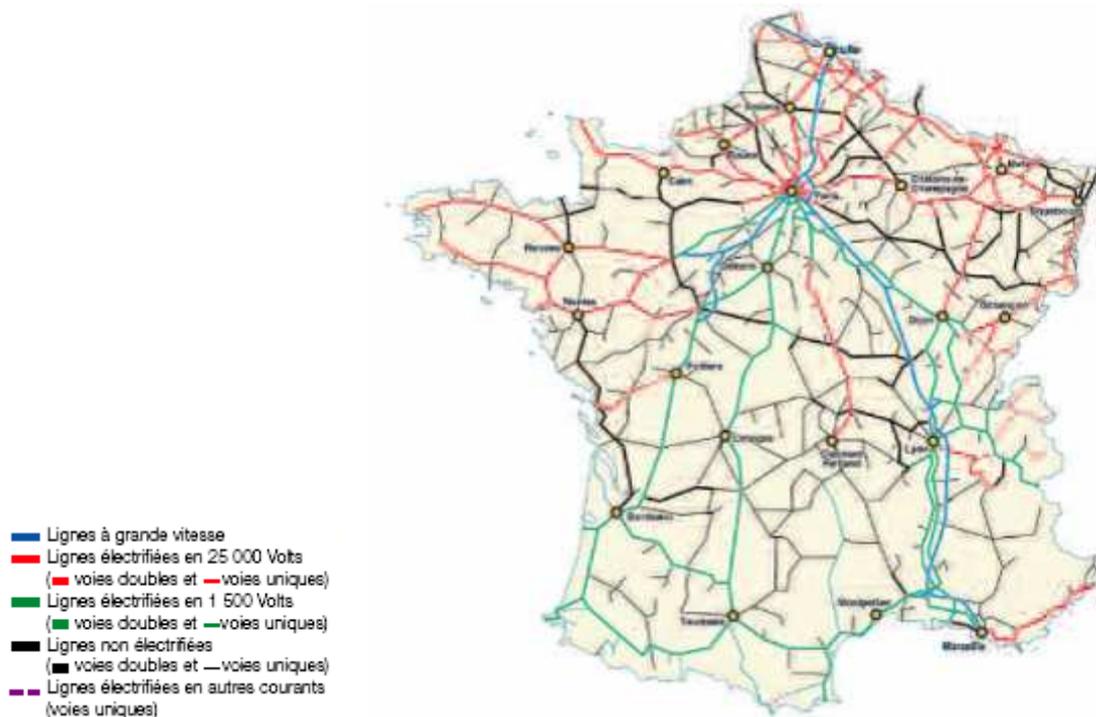


Figure 29 : Modes de traction ferroviaires (source RFF, 2005)

#### 7.2.5.5 Les systèmes d'électrification du réseau

Une ligne aérienne de traction électrique est qualifiée de :

- Ligne de contact lorsqu'elle ne comporte qu'un ou deux fils de contact,
- Caténaire lorsqu'elle est constituée d'un ou de deux fils de contact suspendus par des pendules à un ou deux porteurs.

La tension mécanique des conducteurs peut être maintenue constante par régulation ou non. L'ensemble est constitué de conducteurs en cuivre, destinés à l'alimentation des trains électriques.

Le réseau français comprend environ 14.500 kilomètres de lignes électrifiées. D'après RFF, plus de 85 % du trafic fret et 90 % du trafic voyageur sont traités sur la partie du réseau équipée de lignes électrifiées.

Commencée en 1900, l'électrification du réseau s'est réellement étendue à partir de 1922 avec l'adoption du courant continu à moyenne tension 1500 V. L'adoption, dès les années 1950, du

courant monophasé à 25 000 V 50 Hz a permis l'adaptation du réseau aux progrès techniques et en particulier aux lignes à grande vitesse.

Le réseau ferré français est bi-courant (1.500 et 25.000 V), ce qui nécessite des engins de traction adaptés.

L'interopérabilité des engins moteurs est rendue plus compliquée et plus coûteuse pour les liaisons avec les réseaux transfrontaliers puisque quatre systèmes d'alimentation coexistent.

D'ici 2010, plus de 1.000 kilomètres de lignes électrifiées devraient venir s'ajouter au réseau existant (électrifications programmées au titre des CPER 2000-2006, mise en service de lignes nouvelles dont la LGV Est européenne, revitalisation d'itinéraires fret...).

### Le système 1.500V

Déployé lors du début de l'électrification du réseau ferroviaire, le système 1.500V couvre aujourd'hui environ 5.900 km de lignes situées exclusivement au Sud de Paris.

Les courants importants qui circulent dans la caténaire nécessitent des conducteurs plus nombreux et de section plus importante. Coûteux, ce système a atteint ses limites techniques dès les années 1950. Le courant continu à moyenne tension présente notamment les désavantages suivants :

- Des sous-stations d'alimentation sont nécessaires tous les 12 km,
- Seule une caténaire lourde peut délivrer sans échauffement exagéré les intensités importantes requises par la puissance des engins de traction,
- Ce type de caténaire est essentiellement utilisée sur les réseaux Sud-est et Sud-ouest (à Paris : départ des lignes des gares de Lyon, Austerlitz, Montparnasse, ou du RER C).

### Le système 25 000 V

Le courant 25 kV alternatif monophasé 50 Hz s'étend aujourd'hui sur plus de 8.200 kilomètres, dont la totalité du réseau TGV. Cette alimentation sous une tension plus élevée est celle qui est dorénavant utilisée sur le réseau ferré français. Ce système présente de nombreux avantages :

- Les sous-stations sont espacées (tous les 80 kilomètres environ).
- Un simple transformateur branché sur le réseau général à 50 Hz et une caténaire plus légère suffisent puisque les intensités à véhiculer sont moindres. Il s'ensuit un coût kilométrique largement inférieur à celui de la caténaire 1.500 V.
- En revanche, au droit ou à proximité de certaines sous-stations une section de séparation de sources d'alimentation est réalisée. Cette section de séparation a pour but d'éviter le pontage de deux caténaires successives dont les alimentations présentent entre elles des différences de phases, par un ou plusieurs pantographes d'une circulation électrique.

Les réseaux 25 kV au départ de Paris se trouvent Gare du Nord, Gare de l'Est et Gare Saint-Lazare. Toutes les lignes nouvelles sont alimentées en 25 kV.

### 7.2.5.6 Les infrastructures logistiques françaises

Les infrastructures logistiques françaises comprennent :

- 1423 gares Fret réparties sur tout le territoire français,
- 21 centres de triage utilisés pour le tri de wagons par gravité,
- Des voies de service (isolées ou réunies en faisceaux), permettant notamment les opérations de formation ou de remaniement d'un train (avant le départ de sa gare origine, lors de ses arrêts en cours de route ou après l'arrivée à son terminus), le garage ou le remisage de courte et moyenne durée du matériel roulant d'une entreprise ferroviaire entre deux missions de transport, les manœuvres nécessaires aux services de transport assurées par les entreprises ferroviaires, le relais en cours de route des trains, par exemple pour changement de conducteur ou de l'engin moteur, ou encore le chargement et déchargement de wagons.
- 3675 installations terminales embranchées (ITE), gares fret au sein d'entreprises clientes reliées au réseau ferré,
- 3 500 hectares de surface de stockage reliés au réseau ferré,
- 300 000 m<sup>2</sup> d'entrepôts et de plates-formes,
- 2 points nodaux en France de concentration des flux, assurant le regroupement de trains en provenance de différents chantiers et leur reconstitution vers les chantiers de destination : le Point Nodal d'Ile-de-France (PNIF) et le Point Nodal Européen (PNEU) qui traitent respectivement 166 000 et 142 000 wagons/an.
- 29 chantiers de transbordement :

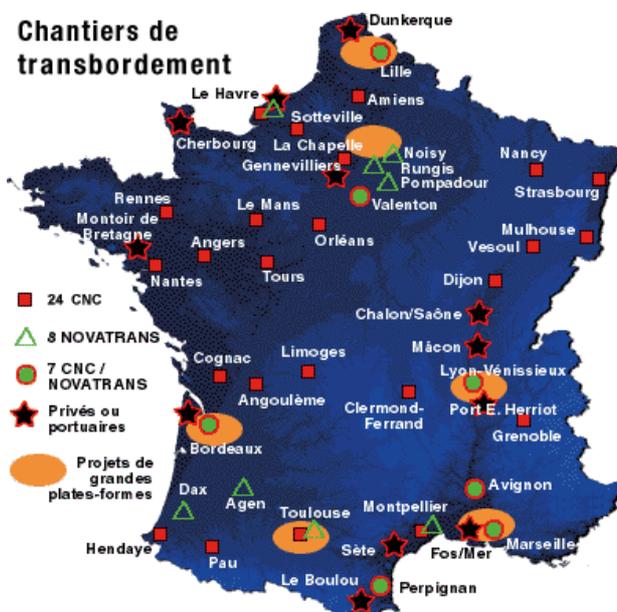


Figure 30 : Chantiers de transbordement français (source SNCF, 2006)

Les terminaux de fret conventionnel permettent le (dé)chargement de wagons ainsi que le transbordement de marchandises de la voie ferrée à un autre mode de transport et vice versa.

### 7.2.5.7 L'infrastructure du transport combiné

En juin 2006, 23 terminaux de transport combiné étaient exploités en France, dont 17 rail-route et 6 portuaires, par 12 opérateurs différents (4 opérateurs de transport combiné, 2 exploitants privés et 6 ports).

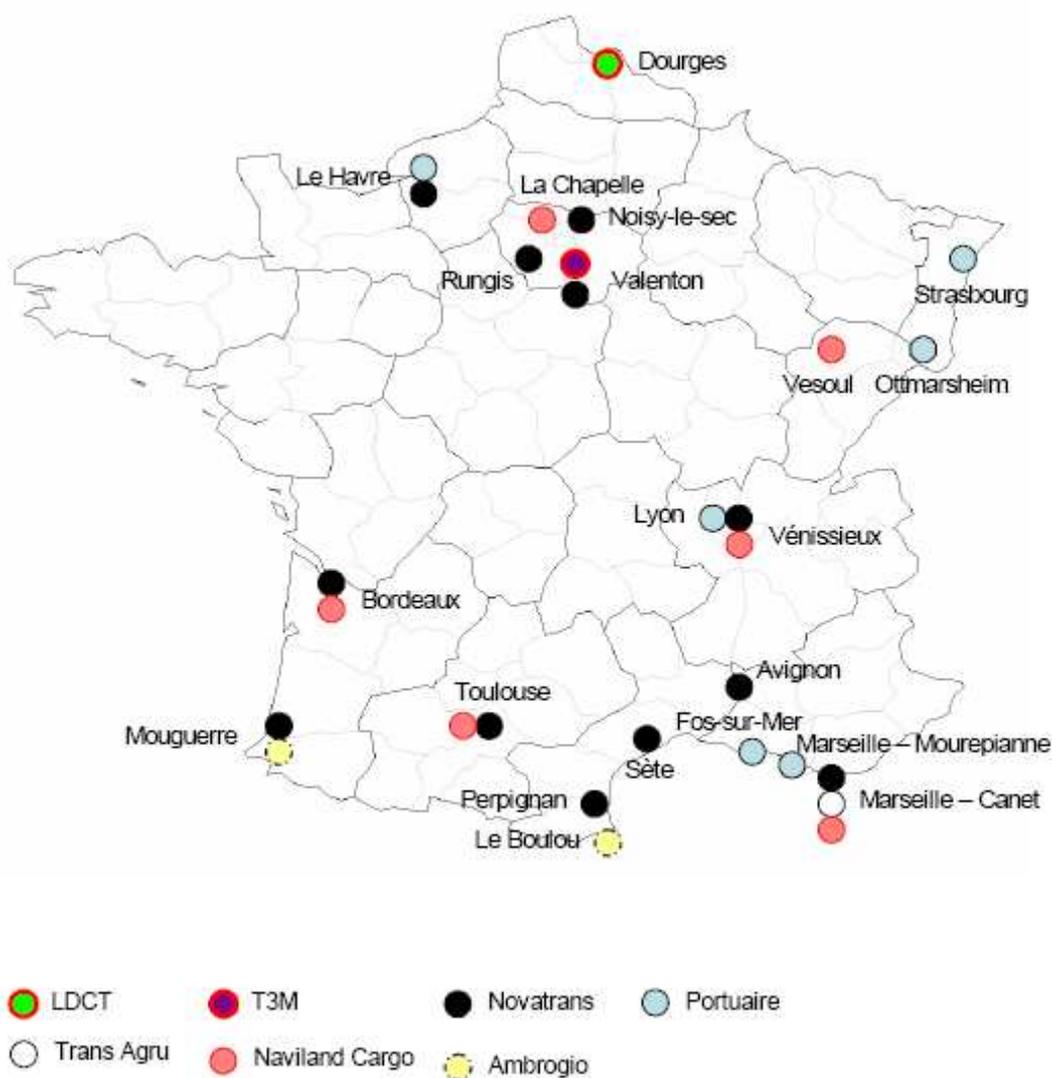


Figure 31 : Terminaux de transport combiné français (source Tableau de bord national du transport combiné, AJI-Europe / ADEME, Octobre 2006)

### 7.2.5.8 Le gabarit ferroviaire

Le gabarit ferroviaire désigne le contour transversal d'un véhicule ferroviaire. Ce contour, qui fait l'objet d'une normalisation précise, doit s'inscrire dans le gabarit des obstacles, qui est le contour qui doit être maintenu libre dans les installations ferroviaires. Le chemin de fer étant un mode de transport guidé, les véhicules circulant ne peuvent pas dévier de leur voie pour éviter tout obstacle imprévu, d'où l'importance de la notion de gabarit. L'harmonisation des gabarits est nécessaire pour permettre l'interopérabilité des réseaux ferroviaires (à l'échelle Européenne).

Le terme de gabarit désigne aussi un profil métallique qui reproduit la partie haute du gabarit de chargement et qui permet de contrôler directement le respect des cotes imposées par un chargement réalisé sur un wagon avant d'autoriser son expédition. En ce qui concerne les véhicules, l'encombrement s'apprécie à l'arrêt (gabarit statique), mais aussi en mouvement (gabarit cinématique) car, en fonction de la longueur du véhicule (voiture ou wagon) et de l'entraxe des essieux ou bogies, le gabarit des obstacles peut être engagé en largeur dans les courbes, soit au milieu vers l'intérieur de la courbe, soit aux extrémités vers l'extérieur. Il faut aussi tenir compte du jeu en hauteur des suspensions en mouvement.

En ce qui concerne la voie dite à écartement normal (1,435m), le premier gabarit international fut adopté en 1914 par la convention de Berne. Il est connu sous le nom de gabarit passe-partout international (PPI). Sa largeur est de 3,150 m, sa hauteur de 4,280 au dessus de la surface du rail. Tout véhicule ferroviaire respectant le gabarit PPI est apte à circuler sur toutes les voies normales européennes, à l'exception des voies britanniques.

L'Union Internationale des Chemins de Fer (UIC) distingue les gabarits selon une classification tenant compte de leur hiérarchie qui est reprise ci-après :

- Le gabarit G1 est le minimum garanti sur les lignes à écartement standard européen,
- Le gabarit GA est le gabarit de référence du réseau ferré national,
- Le gabarit GB existe sur plusieurs grands itinéraires du réseau ferré national,
- Le gabarit GB1 facilite l'admission des services de transport de conteneurs de grandes dimensions sur certains parcours,
- Le gabarit GC est retenu pour les lignes à grande vitesse.

En outre, un gabarit GB1 a été défini pour permettre le transport de certains conteneurs ou semi remorque de grandes dimensions.

Ces gabarits ont tous la même largeur, 3290 mm, ils ne diffèrent que dans les parties hautes, 4,35 m pour les GA et GB, 4,70 m pour le GC.

En Europe, tous les pays de l'union des chemins de fer d'Europe centrale, les réseaux nordiques et l'Allemagne ont un gabarit assez généreux qui préfigurait le GC, alors que les réseaux du sud, confrontés à un relief plus montagneux ont adopté à l'origine des gabarits plus restreints. La Grande Bretagne constitue un cas particulier car elle a conservé un gabarit réduit tant en hauteur qu'en largeur. La largeur est notamment réduite au niveau des quais, ce qui explique le profil particulier aux rames Eurostar, plus étroites en bas de caisse.

Il faut prendre en considération les contraintes basses qui sont particulièrement importantes puisque réparties sur l'ensemble du réseau. Elles sont liées à la présence des systèmes au sol. La reconfiguration du trajet Le Boulou (Perpignan) et Bettembourg (Luxembourg) en est un bon exemple, le coût global de mise en conformité est de l'ordre de 150 M€ (source RFF) dont 10% approximativement pour la mise au gabarit bas.

Certains réseaux ont choisi un gabarit encore plus généreux. Aux Etats-Unis d'Amérique ou au Canada, par exemple, les chemins de fer ont été construits dans des zones vierges sans expropriations, avec une demande forte en matériaux volumineux et pas ou peu d'autre moyen de transport. Ainsi, le gabarit choisi dans ces pays permet actuellement d'avoir des wagons double-stack (portant deux conteneurs posés l'un sur l'autre) ou des voitures à double étage spacieuses.

Les réseaux fermés, comme les métros, ont souvent adopté un gabarit différent et généralement plus réduit. Le métro de Paris a une largeur de 2,40 m, car il fut décidé à l'origine d'en faire un chemin de fer local, en y interdisant l'accès des trains des compagnies de chemin de fer.

#### 7.2.5.9 La charge à l'essieu

La classification de l'Union Internationale des Chemins de Fer distingue la masse maximale admise par essieu et la masse maximale admise par mètre courant.

Les lignes à écartement normal du réseau ferré national sont classées en catégories C4 et D4 qui autorisent, pour les engins moteurs et les wagons respectant les caractéristiques de base de la classification :

- Une masse maximale admise par essieu de 22,5 tonnes en catégorie D4 et 20 tonnes en catégorie C4,
- Une masse maximale admise par mètre/rail courant de 8 tonnes/mètre.

La carte suivante précise le classement des voies principales des lignes du réseau ferré national.

Les voies de service sont normalement classées en catégorie C4, sauf mention particulière portée dans les documents opérationnels remis par Réseau Ferré de France aux entreprises ferroviaires.

Conformément aux règles de marquage du matériel, les limites de charge doivent être inscrites sur les wagons utilisés pour le trafic fret sur le réseau ferré national.



**Charges admissibles pour le transport de fret**  
**Allowable loads for freight transport**  
**Für den Gütertransport zulässige Achslasten**

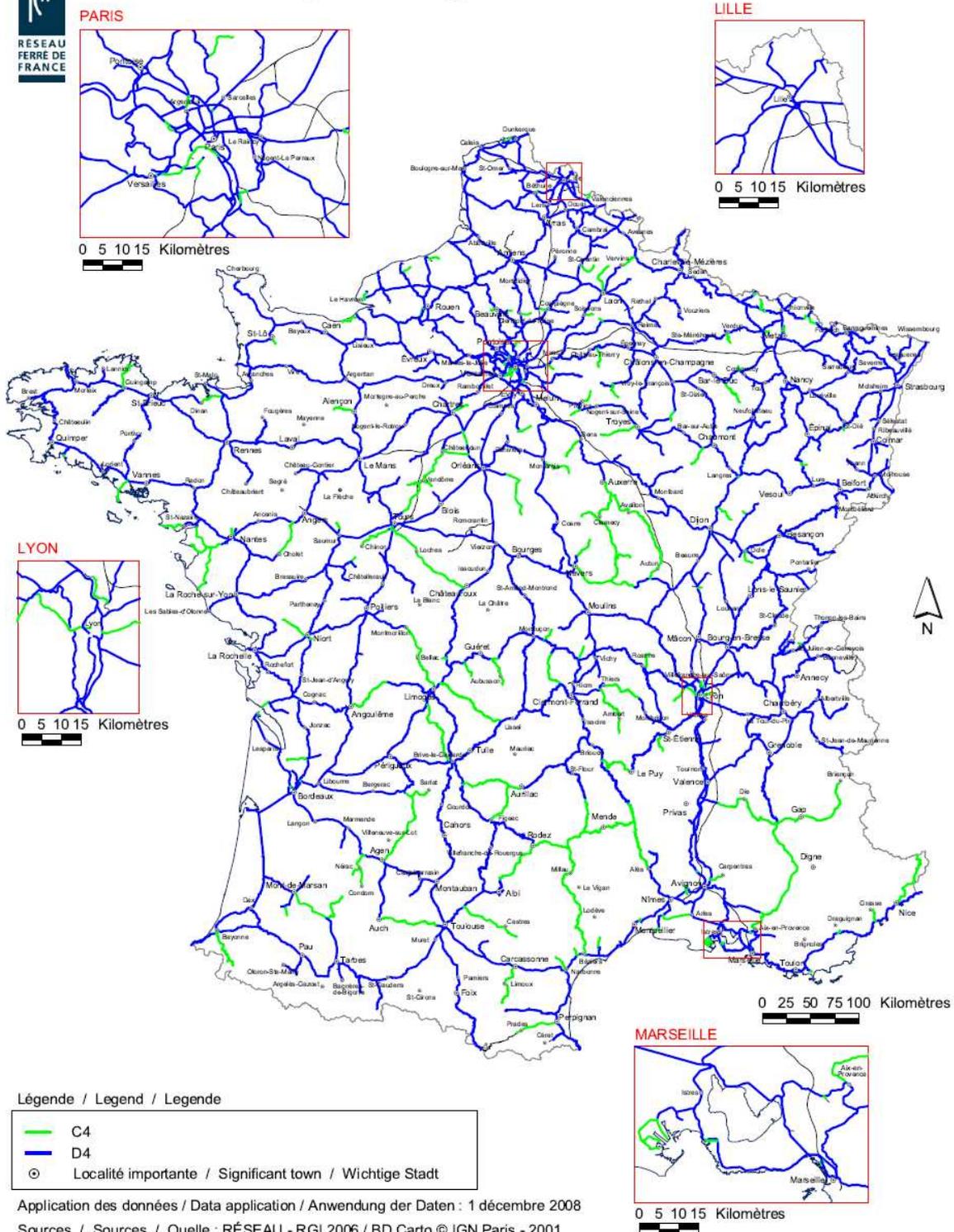


Figure 32 : Charge admissible pour le transport de fret (source RFF, 2007)

### 7.2.5.10 Les vitesses de transport

La vitesse du mode ferroviaire sur le réseau national est déterminée par le réseau utilisé :

- Réseau classique,
- Ligne à grande vitesse.

#### Le réseau classique

Le tracé de la plupart des grandes artères autorise des vitesses de 160 km/h. Depuis 1967, un certain nombre de tronçons ont permis des vitesses allant jusqu'à 200 km/h. Pour rouler à cette vitesse, la loi impose désormais la suppression de tous les passages à niveau. Depuis 1989, les TGV peuvent circuler à 220 km/h sur certains de ces tronçons en raison de leurs meilleures capacités d'accélération et de freinage par rapport aux trains classiques, de leur moindre charge par essieu et de leur centre de gravité plus bas.

#### Le réseau LGV

La vitesse maximale est de 300 km/h, quelques tronçons étant limités à 270km/h. La prochaine étape sera 320 km/h pour le TGV Est. Les trains de fret composés en tout ou partie de wagons en charge sont obligatoirement freinés au frein continu marchandises et peuvent circuler à la vitesse maximale de 100 km/h.

Les trains de fret composés en totalité de wagons en charge C4 peuvent être freinés au frein continu voyageurs et ne peuvent alors dépasser la vitesse maximale de 120 km/heure.

Les trains de fret composés en tout ou partie de wagons en charge D4 sont obligatoirement freinés au frein continu marchandises et peuvent circuler à la vitesse maximale de 100 km/h ou à une vitesse inférieure indiquée dans les renseignements techniques.

Quelques itinéraires permettent la vitesse maximale de 120 km/h pour des trains composés de wagons spécifiques en charge D4 et freinés au frein continu voyageurs.

Certains itinéraires admettent des circulations de trains de fret plus rapides (jusqu'à 160 km/h) dans les conditions suivantes :

- Masse à l'essieu réduite (i.e. un essieu dimensionné pour une vitesse de 120 km/h et une charge de 22,5 tonnes),
- Wagons munis de bogies spécifiques.

Ce qui revient à produire pour une augmentation de la vitesse un essieu spécifique qui doit concilier charge et vitesse et requiert donc une évolution technologique.

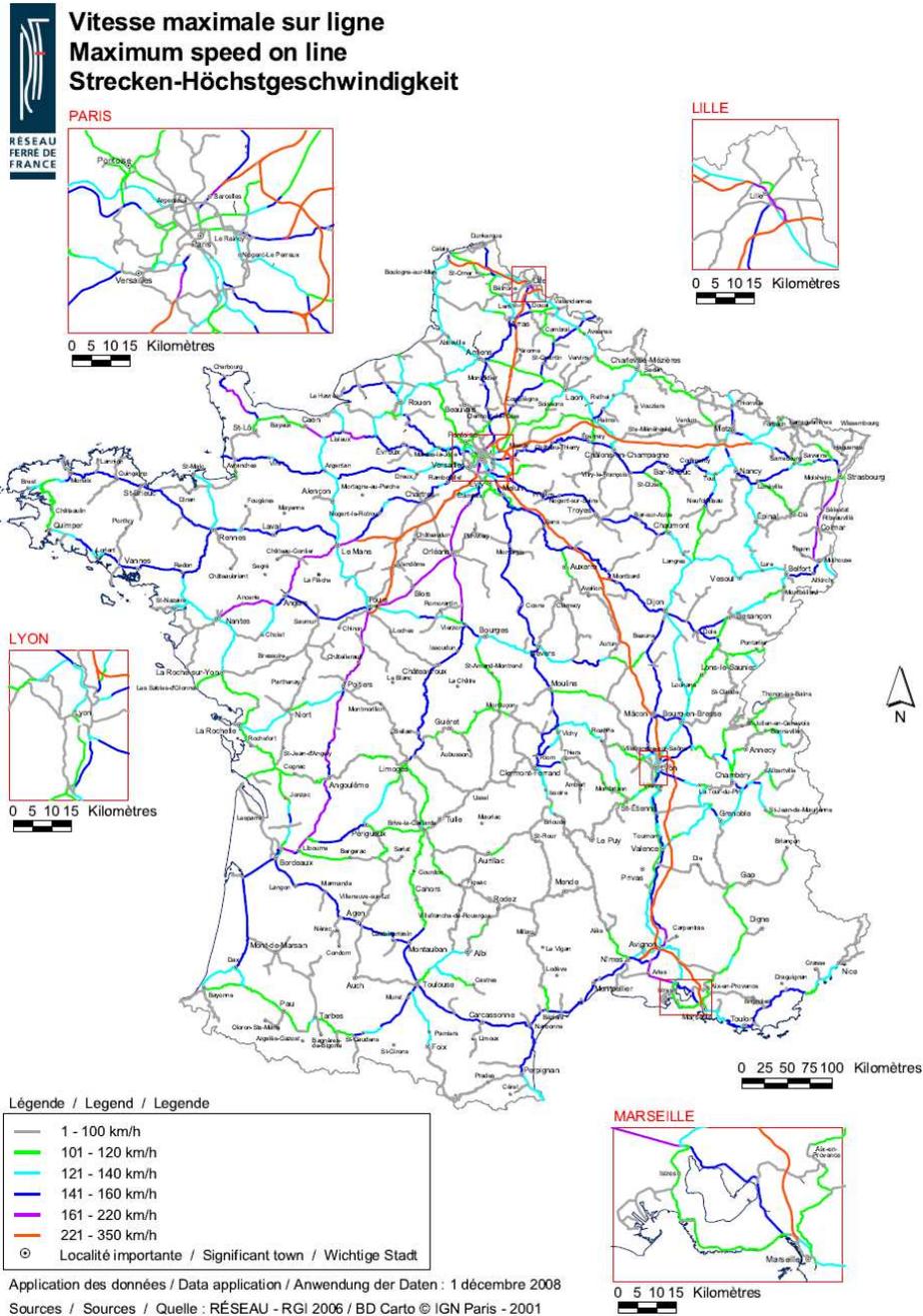


Figure 33 : Vitesse maximale autorisée sur les différents axes ferroviaires (source RFF, 2007)

## 7.3 DIAGNOSTIC ET BILAN

### 7.3.1 L'IMPORTANCE DE LA POLITIQUE TARIFAIRE

Le coût total du service doit être inférieur à celui de la route. Très peu de transporteurs et chargeurs sont prêts à accepter un surcoût, exceptions faites lorsque la qualité ou la mise à disposition de capacité complémentaire est plus importante que le prix (marchandises dangereuses, produits à haute valeur ajoutée, transports exceptionnels ...).

Une tarification différenciée en fonction des horaires ou un tarif de réservation n'est pas toujours souhaité. Par contre, des tarifs privilégiés pour les retours à vide et des allers-retours sont souhaités par les chargeurs et transporteurs.

Afin d'attirer les pionniers et d'assurer le remplissage des rames, des avantages ou bonus pour les utilisateurs importants sont à envisager.

Afin d'attirer les pavillons étrangers (et chargeurs), les tarifs doivent être étudiés en fonction des pavillons à plus bas coûts (Espagnol et Portugais en particuliers).

Les arguments en faveur d'un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Permet d'économiser sur l'usure des véhicules,
- Permet de réduire le nombre des véhicules d'une flotte sur un axe donné,
- Permet des « économies » de carburant,
- Permet des « économies » de main-d'œuvre et limite la concurrence à bas coût,
- Permet d'anticiper la taxation routière,
- Permet d'éviter des investissements spécifiques propres au transport combiné classique.

Les risques ou les perceptions de risque liées à un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Vu comme étant plus coûteux que la route car les transporteurs perçoivent le plus souvent des coûts additionnels (lié à l'organisation à mettre en œuvre) et moins les gains financiers (directs ou indirects),
- Présence et renforcement de pavillons à bas coûts qui renforce la pression sur les prix.

### 7.3.2 L'IMPORTANCE DE LA FIABILITE

Le transport routier est reconnu comme globalement fiable. Les aléas (accidents, pannes, congestion) sont statistiquement rares, la fiabilité (livraison dans les délais annoncés) est souvent supérieure à 95%.

Les transporteurs peuvent avoir des engagements contractuels avec leurs clients basés sur des pénalités financières en cas de non respect des délais de livraison. Il est par conséquent crucial pour l'attractivité de l'autoroute ferroviaire que les délais annoncés (sur lesquels repose l'organisation du transporteur) soient respectés.

Par delà un temps de parcours réduit, c'est la fiabilité du délai (ponctualité des horaires au départ et à l'arrivée) qui est attendue.

Un système de visibilité pour le transporteur ou le chargeur assurant un tracing précis du positionnement des marchandises est par conséquent nécessaire afin que les acteurs amont et aval du tronçon ferroviaire puissent réagir et s'organiser en cas de retard.

Concernant les horaires, les acteurs émettent une préférence pour les horaires de « nuit », tôt le matin ou tard le soir.

Les arguments en faveur d'un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Amélioration du délai de transport (mais tous les produits ne nécessitent pas des délais d'acheminement rapides),
- 7J/7 (intéressant uniquement s'il est possible d'obtenir une dérogation pour le transporteur routier afin de pouvoir circuler le Dimanche.

Les risques liés à un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Ne pas être en capacité de proposer une fiabilité proche de celle de la route (>95%),
- Ne pas être en capacité de dépasser l'image actuelle de non-fiabilité du fret ferroviaire,
- Une fréquence trop faible pourrait rendre le service trop rigide.

### 7.3.3 L'IMPORTANCE DE LA SIMPLICITE

La simplicité du transport routier est prise en compte au moment du choix d'une solution alternative : le rail-route doit être simple à utiliser. En cas de mode accompagné (avec chauffeurs), le service peut être minimum mais il doit être de qualité (restauration, couchettes, douches). Sur de courtes distances, les acteurs semblent privilégier le mode accompagné (avec chauffeurs, mais ils restent partagés), sur des parcours plus longs, ils sont plus favorables au non accompagné. Dans le cas des grandes entreprises qui parviennent à s'organiser aux deux extrémités du transport, le mode non accompagné est privilégié. Dans le cas des petites entreprises, s'il n'y a pas de service proposé pour la traction pré- ou post-acheminement, préférence pour le mode accompagné (surtout si la durée du parcours correspond au temps de repos). Si l'opérateur du service d'autoroute ferroviaire inclut une offre de traction pré- ou post-acheminement, ce dernier peut se mettre en concurrence directe avec une partie de sa clientèle transporteur.

Les arguments en faveur d'un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Possibilité d'optimiser les moyens roulants (circulation de nuit et week-end, tracteurs sur des boucles courtes),
- Réponse au durcissement de la réglementation (sociale notamment),
- Meilleure gestion des ressources humaines (35h notamment),
- Réponse à la pénurie de chauffeurs.

Les risques liés à un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Nécessite une réorganisation du transport (départs à heures fixes, en cas de mode non accompagné, organisation du pré- et post-acheminement) ; néanmoins la désynchronisation des opérations d'embarquement et de chargement (cf. R-shift-R) permet de dépasser ce qui peut être considéré aujourd'hui comme une contrainte.
- Repositionnement des chauffeurs sur la courte distance,
- Manque de flexibilité (réservation, heures fixes),
- Risques de grèves,
- Ne permet pas de triangulaire (en l'état actuel des lignes d'autoroute ferroviaire)

### 7.3.4 L'IMPORTANCE DE LA SECURITE LIEE AUX CONDITIONS DE CIRCULATION

La congestion du réseau français qui reste limitée à :

- Des zones spécifiques (abords de Paris et grandes agglomérations),
- Des moments particuliers de la journée (matinée, fin de journée) et périodes (grands départs)

Les arguments en faveur d'un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Permet d'éviter les axes routiers saturés et franchissement d'axes difficiles,
- Acheminement même en cas d'intempéries bloquant les routes,
- Réduction des accidents,
- Meilleure sécurité (peu/pas de vol de marchandises, cas des matières dangereuses).

Les risques liés à un service d'autoroute ferroviaire sont les suivants :

- Pas adapté à tous les types de véhicules (dans le cas de limitation du gabarit).

### 7.3.5 L'IMPORTANCE DES ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

Le mode ferroviaire apparaît, avec la voie d'eau, assez naturellement respectueux de l'environnement.

Les coûts externes des différents modes de transport sont estimés aujourd'hui à :

- 10 € pour 1000 t.km pour le mode fluvial,
- 35 € pour 1000 t.km pour le mode routier,
- 15 € pour 1000 t.km pour le mode ferroviaire.

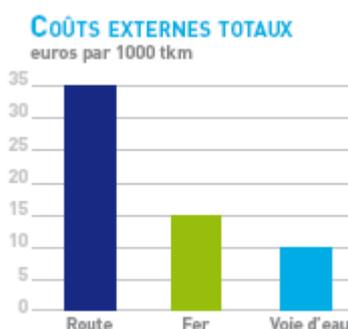


Figure 34 : Coûts externes totaux des modes de transport (source VNF)

### 7.3.6 PREMIERES CONCLUSIONS

#### Face aux avantages du routier...

La route est une solution performante en termes de coûts, de flexibilité et de disponibilité (s'adapte aux besoins particuliers du moment). Par ailleurs, elle présente :

- Peu de formalités,
- Un cadre légal satisfaisant pour les chargeurs (e.g. responsabilité).

#### ... il faut des arguments probants pour choisir le rail-route :

- Des gains financiers significatifs (coût total du transport rail-route inférieur à celui de la route et avec des avantages indirects : 44T, moins d'usure du matériel, etc.),
- Une qualité du service (ponctualité, régularité, pérennité) adaptée,
- Pas d'investissement spécifique.

#### R-shift-R peut-il être une solution ?

A ce stade de la recherche, le consensus autour de la solution R-shift-R n'est pas acquis. Plus ou moins accepté intellectuellement par les acteurs rencontrés, il est souvent recommandé d'impliquer des opérateurs intermodaux dans le projet et cela à un niveau Européen, ainsi que des acteurs de chantiers de transbordement.

R-shift-R vise en premier lieu à catalyser le transfert modal de semi remorque standard de la route sur le fer. C'est une bonne approche car le besoin est réel. Cela doit néanmoins ne pas faire oublier que l'évolution à long terme va également vers la caisse mobile et le conteneur pour lesquels l'organisation des terminaux autour du « praticable » est moins évidente. Le concept R-shift-R doit être étudié davantage vis-à-vis de la caisse mobile et du conteneur afin d'évaluer son potentiel d'intégration avec les ports.

R-shift-R repose sur une notion de « self service » (« *mettre sur rail la marchandise aussi simplement que l'on peut la mettre sur route* »). L'accès aux chantiers par la route est crucial. Ce point doit alors faire l'objet d'une attention particulière (implantation, aménagement, impact sur les chantiers et/ou chantiers existants...). Cette nécessité d'accès est valable pour tout concept de ferroutage, mais plus particulièrement pour R-shift-R qui présente d'ailleurs l'avantage de ne pas nécessairement massifier les flux à l'inverse des autres concepts, donc d'être moins tributaire d'un réseau autoroutier proche des terminaux.

L'étude bibliographique (notamment celle issue des initiatives Européennes - European Project 6FP) fait apparaître des similitudes entre le concept R-shift-R et d'autres (cargo speed par son mécanisme « pop up » et surtout Cargo Beamer dans son concept de plateau et de désynchronisation des opérations d'embarquement et de chargement). La différence avec les technologies développées dans le cadre des programmes de recherche Européen est qu'ils n'impliquent pas de modifications importantes (relativement à R-shift-R) sur la structure des wagons existants, sur l'aménagement des terminaux, ou sur le mode d'exploitation ferroviaire. Les opérateurs de transport combiné pointent néanmoins le mode d'exploitation ferroviaire actuel comme étant le facteur majeur bloquant du développement du ferroutage. Ces projets sont souvent menés à la différence de R-shift-R, en se focalisant exclusivement sur la technique sans considérer des évolutions du système ferroviaire (vision opérationnelle idéale et organisation de l'exploitation ferroviaire nouvelle).

Certains interlocuteurs ont par ailleurs été fortement impliqués dans le projet COMMUTOR, projet qui ne s'est pas déployé à grande échelle pour trois raisons :

- La présence d'une pièce intermédiaire (dont la fonction n'est pas clairement identifiée) entre le wagon et les contenants dont les modalités de gestion sont apparues complexes à déployer,
- Le non alignement socio organisationnel des ambitions du projet avec la culture du fret ferroviaire,
- L'investissement jugé trop important d'adaptation de l'ensemble de la flotte de wagons de la SNCF.

L'échec de COMMUTOR pèse sur l'innovation technologique du secteur.

D'autres concepts similaires à R-shift-R tel que MetroCargo en Italie pourraient être étudiés, mais peu d'informations ont pu être trouvées à ce stade sur ce concept.

Le projet R-shift-R est très souvent et en priorité critiqué au niveau technique et technologique : technique coussin d'air pour les opérations de (dé)chargement, variation de la hauteur de rame... Il faut néanmoins garder à l'esprit que la technologie coussin d'air proposée pour R-shift-R n'est pas un besoin fonctionnel (un « must » pour la compétitivité du ferroutage). Cette technologie décrit un principe de portage de la charge entre deux points du terminal. On peut très bien imaginer des équipements de transbordement (et un automatisme)

différents d'un terminal à l'autre en fonction de son activité. Les études préliminaires réalisées par l'INSA proposent huit principes différents... Seuls les conditions sécuritaires imposées par l'exploitation ferroviaire permettront (après analyse des risques des solutions proposées) de faire un choix sur le niveau de technicité à intégrer. Il est à noter que l'utilisation de coussin d'air, de technique de variation de la hauteur du wagon, ainsi que la motorisation répartie (pour le fret) n'ont fait l'objet d'aucun projet ou prototype.

D'une manière générale, la couverture technique globale de R-shift-R implique un risque important en termes d'investissements, jugé difficilement accessible par la majorité des acteurs rencontrés.

De son côté, le monde ferroviaire suit des directives d'homologation du matériel roulant très sévères. Dans ce cadre, les contraintes propres à l'homologation ferroviaire doivent être davantage considérées par le projet R-shift-R (homologation par quel acteur, sur quel territoire, dans quel délai ?). Cette analyse de risque peut contraindre la conception de certaines composantes de la solution.

A court terme, la réalisation du wagon et de la rame R-shift-R est complexe. Un démonstrateur pourrait être uniquement orienté sur la partie terminale et technique de transbordement afin de démontrer la possibilité de l'automatisation complète du processus dans un temps de 6 mn avec le risque que le démonstrateur « *prouve que la solution proposée est trop complexe* ». Une autre approche pourrait être de considérer que l'enjeu n'est pas dans la technique de chargement, mais dans le mode d'exploitation type TER pour le fret qui pourrait être appréhendé avec des techniques de transbordements plus classiques type « Modalohr automatisé ».

Le praticable, pourtant à l'origine du concept R-shift-R, apparaît à certains acteurs rencontrés comme une interface complexe à gérer, engendrant une charge supplémentaire inutile à transporter de 2 tonnes. Le processus de gestion des praticables (vide, chargé, sur terminal, en rame...) doit être précisé. Plus généralement, le concept R-shift-R est bien décrit dans son fonctionnement nominal sans pour autant aborder les fonctionnements dégradés.

La suite de la recherche et du présent rapport tente d'apporter un éclairage sur ces différents points.

## 8. DESCRIPTION ET EVALUATION DE SCENARIOS D'EVOLUTION DU FRET FERROVIAIRE AUTOUR DU CONCEPT R-SHIFT-R

### 8.1 OBJECTIFS, CONTRAINTES ET CONCEPTS

Une fiche programme a été élaborée afin de synthétiser le **périmètre** et l'**environnement** du système, les **objectifs** à atteindre, les **contraintes** à prendre en compte et les concepts à étudier :

<b>Périmètre &amp; environnement</b>	Trafics français, dans leur contexte Européen.
<b>Objectifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement de l'accessibilité et de l'attractivité du rail, récupération de parts de marché à la route</li> <li>• Efficacité et rentabilité des installations</li> <li>• Meilleur bilan environnemental</li> <li>• Maximisation de la capacité de l'infrastructure</li> <li>• Meilleure vitesse du fret</li> </ul>
<b>Contraintes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De conception : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Une longueur de wagon permettant de maximiser le nombre de wagons par rame de 750 m (46 wagons RSR de 15,75m de long)</li> <li>○ Une structure du wagon et du praticable (appuis du praticable dans les balancelles, systèmes de bridage, gardes aux rails...) afin de respecter les contraintes de normalisation ferroviaires</li> </ul> </li> <li>• Financières : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Maximiser la capacité d'utilisation de l'infrastructure sans recourir à des investissements lourds</li> <li>○ Maximiser la rentabilité des investissements par l'augmentation du chiffre d'affaires généré</li> </ul> </li> <li>• Liées à l'infrastructure : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ En France et en Europe (interopérabilité écartement, électrification, signalisation)</li> <li>○ L'utilisation des infrastructures existantes (aux quais près) avec des rames de 750m (gabarits e.g. GB+, géométrie des voies : écartement: 1,53m, rayon de courbure minimal: 75m en gare)</li> </ul> </li> <li>• Techniques et organisationnelles : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ La capacité, la vitesse, la réservation de sillons et la mixité fret / passagers</li> <li>○ Une charge à l'essieu de 22,5 t</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Des systèmes de traçabilité et de communication adaptés, compatibles avec les technologies couramment employées dans le ferroviaire.</li> <li>○ Un temps d'arrêt de la rame en gare de 6 minutes.</li> <li>○ Un cadencement des sillons à la fréquence de 15 minutes.</li> <li>○ Etre capable de se déplacer à une vitesse élevée (120 km/h à 160 km/h)</li> <li>○ Etre le plus léger possible, accepter 44 t de charge utile</li> <li>○ L'interchangeabilité des composants mobiles entre eux et l'intégration des wagons dans le concept global de ferroutage (gare et infrastructure).</li> <li>• Opérationnelles, en termes de types de conditionnements acceptables :             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Une remorque routière de 14,6 m de long, de 4,2 m de haut et de 2,6 m de large,</li> <li>○ Un conteneur de 40 pieds de longueur, 2,55 m de large,</li> <li>○ Un conteneur de 5 à 10 m de longueur, 2,55 m de large,</li> <li>○ Une caisse mobile européenne de 40/45 pieds,</li> <li>○ Un tracteur routier de 7 m ou 2 de 5 m,</li> <li>○ Tous véhicules de 0 à 10 mètres.</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>Concepts</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un wagon monobloc court sans châssis démontable pourvu d'un plateau amovible (praticable) sur lequel est déposé le contenant ; la présence d'un « praticable » permet de dissocier dans le cycle opératoire l'opération d'embarquement/débarquement de l'opération de chargement/déchargement sur le/du wagon.</li> <li>• Une motorisation répartie sur chaque wagon (afin de franchir des pentes de 3,5%, de fiabiliser la propulsion, d'améliorer l'adhérence aux rails, d'utiliser l'espace classiquement pris par les motrices avec des wagons).</li> <li>• Un système de manutention assurant les déplacements sur terminal depuis/vers des travées d'embarquement /débarquement route vers/ depuis des emplacements rames prés affectés, et présentant degré d'automatisation déterminé en fonction des besoins.</li> <li>• Un terminal organisé de manière à séparer les flux et minimiser les interférences.</li> <li>• Un bogie pourvu d'un mécanisme de variation de hauteur.</li> </ul>

Tableau 13: Objectifs, contraintes et concepts des scénarios de déploiement du concept R-Shift-R

## 8.2 DESCRIPTION DETAILLEE DU CONCEPT R-SHIFT-R

### 8.2.1 LA RAME R-SHIFT-R

La rame R-shift-R est composée d'un ensemble constitué de 23 wagons doubles de manière à obtenir une longueur totale maximale de 750 mètres. Chaque wagon reçoit une motorisation électrique afin de répartir de façon optimale la puissance de la rame tout au long de celle-ci, ceci afin de permettre le franchissement des lignes de montagne où la pente est importante.

Aux deux extrémités de la rame se trouvent un wagon dit de pilotage qui dispose du même type de motorisation et accueille le pantographe, les dispositifs de transformation du courant électrique capté en fonction de l'alimentation du réseau où circule le train...

La rame ainsi constituée, en un seul tenant, les solutions techniques développées devront limiter les contacts secs acier/acier, les jeux et les chocs entre les wagons, aspect important pour réduire le bruit.

### 8.2.2 LE WAGON R-SHIFT-R

#### 8.2.2.1 Général

Le wagon R-shift-R est un wagon double à 3 bogies, de deux fois 14,05 mètres de long : reposant d'un côté « tête-bêche » sur un bogie commun, l'autre extrémité sur un bogie qui lui est propre. Puis l'ensemble est relié, au groupe suivant, par une attache de 3,400 mètres de long ; pour donner au final un pas de wagon de 15,750 mètres. La largeur retenue est d'environ 2,960 mètres

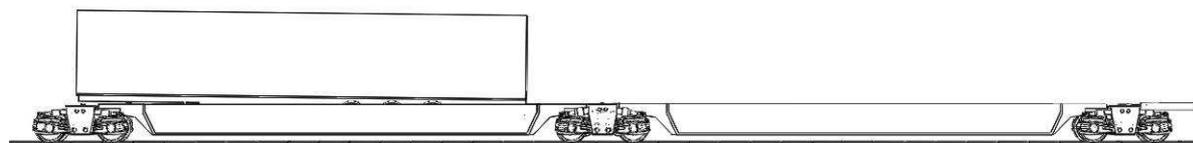


Figure 35 : Wagon double R-shift-R chargé d'une semi-remorque

Les deux bogies extrêmes ne sont pas motorisés mais comportent les freins constitués de 3 disques par essieu. Le bogie central comporte quant à lui deux moteurs électriques, un sur chaque essieu. Les deux balancelles portant les praticables sont reliés aux bogies par des biellettes verticales montées sur rotules et par des amortisseurs anti-lacets.

Chaque balancelle est susceptible d'accueillir une semi-remorque, un conteneur de 40 pieds, un conteneur de 20 ou 30 pieds ou encore une caisse européenne de 45 pieds.

Si les conteneurs jusqu'à 30 pieds sont centrés sur le praticable, le positionnement des semi-remorques comme le conteneur de 40 pieds ou caisse européenne sont quant à eux décalés vers les bogies externes afin de ramener au mieux les charges sur ces bogies. En effet on constate par le principe retenu que c'est le bogie central sera le plus chargé, et que la charge limite à l'essieu sera atteinte en priorité sur celui-ci. De plus, cette architecture permet entre autre de :

- Diminuer le nombre total de bogies,
- Conserver l'espace de chargement identique à celui de deux wagons indépendants.
- Dégager un volume utile important au niveau du bogie central pour l'implantation des divers composants annexes.
- Réduire le poids des rames.

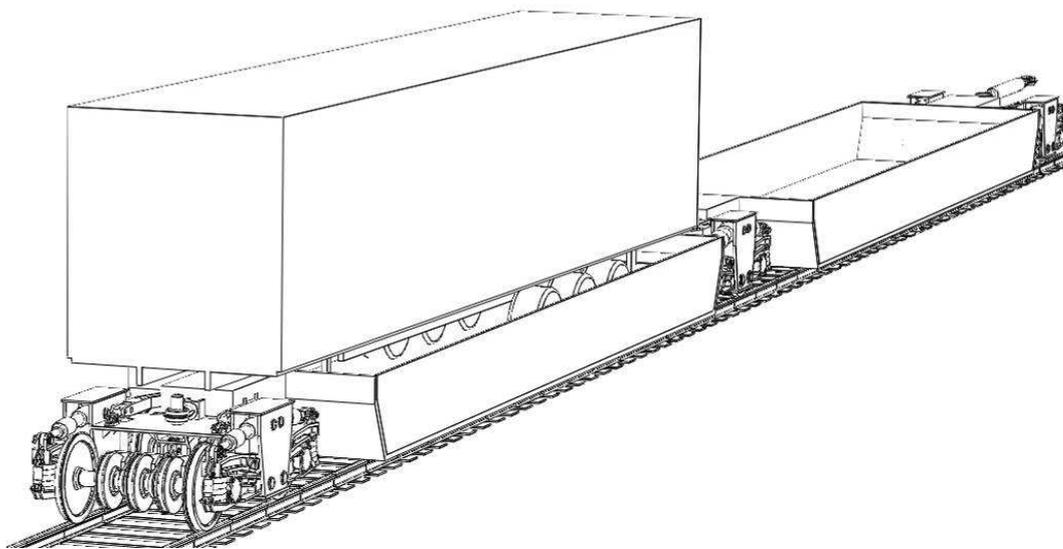


Figure 36 : Wagon double chargé d'une semi-remorque

### 8.2.2.2 Le praticable

Base de tout le concept R-shift-R, ce plateau a pour rôle de rendre possible le fonctionnement des gares : le praticable n'est pas une exigence propre au wagon mais une nécessité propre au fonctionnement des gares.

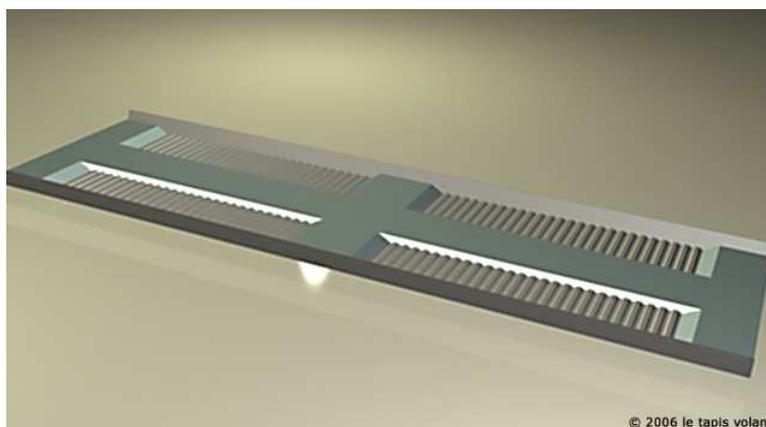


Figure 37 : Praticable R-shift-R

Il est formé d'un plateau monobloc à doubles parois qui se rejoignent latéralement en partie haute. La paroi extérieure plane aux deux bords longitudinaux relevés permet la dépose au sol. La paroi intérieure garantit la rigidité transversale par la présence des plis et des contre plis

nécessaires à sa réalisation. Ces plis et contre plis sont interrompus au centre par un pliage vers le haut qui coure sur toute la longueur. Ce pliage peut être renforcé (si nécessaire) par deux HEA de 100 qui s'intègrent entre les deux tôles. Aux extrémités et au centre du praticable, sont réalisés des pliages transversaux, dont le niveau supérieur sera identique à celui du pliage central. Ensemble, ils décrivent les éléments d'une surface plane en forme de double HH qui permet la dépose des conteneurs de 10 à 30 pieds ou d'un porteur de 10 mètres.

Entre lesdites surfaces, en bossage, l'espace est suffisant pour descendre, caler et immobiliser une charge roulante : remorques, etc. On voit bien l'intérêt d'une telle construction qui permet dans le cas d'une remorque (contrainte par sa hauteur) de ramener le niveau de base à quelques centimètres du bas du wagon.

Cette construction en caissons présente l'avantage d'augmenter les inerties du praticable dans ses différents axes, de permettre une diminution de l'épaisseur des tôles nécessaires à son exécution et d'envisager éventuellement le remplissage des cavités créées par un composant incompressible et de faible densité, du type de ceux utilisés en techniques sous-marines mousse syntactique (voir document en annexe). Ces techniques judicieusement utilisées garantissent l'allègement maximum de la structure.

Les détails de construction qui sont portés sur le plan répondent à une vision du projet, d'autres sont possibles. Il sera rechercher en permanence le meilleur aérodynamisme possible dans les formes extérieures pour répondre aux critères de bruits qu'engendrent les déplacements à 140/160 km/h, comme une grande simplicité de construction au regard du nombre important à produire.

Les côtes de cet ensemble sont à normaliser à :

- 10 mètres de longueur,
- 2,57 mètres de largeur,
- 0,108 mètre hauteur sur plan de dépose (bossage)
- 0,030 mètre épaisseur du plancher (valeur qui sera à confirmer par des calculs plus précis)

La hauteur de pliage des bords latéraux, ouvert de 15° sur l'extérieur, est définie par la résistance à la flexion dans le cas le plus défavorable d'utilisation. Quelle que soit leur hauteur ces bords ne présentent aucune gêne s'ils suivent le profil de la balancelle. Les tolérances générales à retenir sont de +- 4 mm sur les cotes de profil et de + - 10 sur la longueur.

### 8.2.2.3 La balancelle

Couramment appelé châssis dans un wagon classique, nous lui avons attribué, pour la fonctionnalité que nous lui avons attribuée, la dénomination de balancelle.

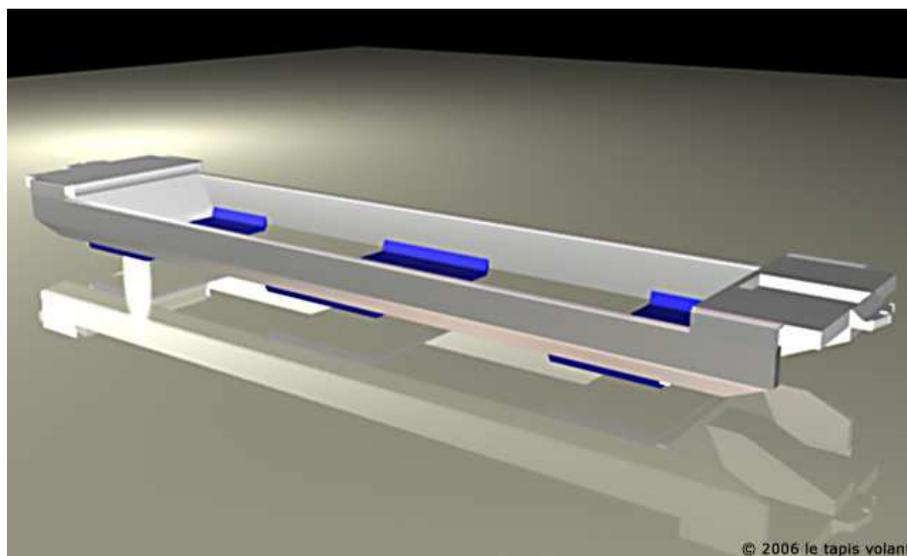


Figure 38 : Balancelle R-shift-R

En effet les liaisons avec les bogies qui la porte se font sur deux appuis précis et limités « deux rotules » situés en extrémités de la structure. En se positionnant sur des axes verticaux solidaires des bogies, cette liaison a seulement pour fonction de :

- Permettre l'articulation de la rame dans tous les plans,
- Assurer la transmission des efforts, de traction, en provenance du bogie motorisé qui lui est propre.

Les efforts verticaux que constitue la masse de la balancelle et son chargement sont transmis aux bogies par quatre colonnes articulées sur des rotules. Cette construction a pour avantage de ramener les effets de la charge dans les axes du bogie et de garantir une égale répartition de celle-ci sur les deux essieux d'un même bogie. Ces colonnes qui assurent dans le plan transversal la tenue en roulis, peuvent être réalisées par deux fois deux vérins hydrauliques.

En terme de fonctionnalités :

- Bloqués, ils interdisent le basculement de la balancelle donc de la charge, mais pas, par la présence des rotules, l'articulation horizontale de la rame,
- Asservis, ils assurent l'effet pendulaire à grandes vitesses,

La version bloquée peut être simplement remplacée par des biellettes rigides.

Dans aucune configuration les balancelles ne sont entre contact en elles ou avec le châssis des bogies. Cette solution, qui consiste à séparer dans deux systèmes distincts les efforts de traction et ceux de support de la charge, est rendue possible par la répartition de la motorisation sur chaque wagon. Solution qui permet également la suppression de l'ensemble des bruits que peut engendrer le frottement des tôles entre elles.

La construction générale de cette balancelle se présente sous la forme de deux poutres latérales, d'une longueur de 13,45 mètres, qui sont assemblées soudées à chaque extrémité à un plateau. L'ensemble ainsi constitué occupe entre les rotules incorporées à chaque plateau la surface, de 14,05 mètres de long et la largeur approximative de 2,95 mètres.

Les hauteurs retenues sont pour le plan de dépose « plateaux » de 0,845 mètre et la garde aux rails, en position standard de roulage, que nous fixons aujourd'hui à 0,250 mètre.

Sur leur longueur les deux poutres sont reliées entre elles, en partie base, par trois éléments de plancher qui recevront le praticable.

*Nota : cette dernière partie pourra évoluer en fonction de l'implantation ou pas des éléments porteurs dans le praticable. L'un ou l'autre des choix ne change en rien la construction de la balancelle ; il déplace simplement la position des éléments reliant les poutres.*

Pour éviter les bruits entre les surfaces en contact « praticable/balancelle » ces éléments de plancher sont recouverts d'une feuille de néoprène vulcanisée. L'une des plateaux est équipée du système de reprise de la sellette de la remorque ou du conteneur, l'autre d'un ensemble de centrage du conteneur. Ce système décrit plus loin permet la reprise d'une remorque dont la hauteur de l'attache peut être comprise entre 840 et 1200 mm de la surface intérieure du praticable. Les deux poutres qui constituent la structure de liaison longitudinale de la balancelle sont réalisées en tôle pliée. L'espace disponible entre la garde aux rails et le plan de dépose de la charge autorise la réalisation d'une poutre d'une hauteur maximum théorique de 840mm. Hauteur qui sera en réalité défini par le calcul résultants des contraintes en situation de charges la plus défavorable, pour une épaisseur que nous avons fixée objectivement à 140 mm.

Là encore il faudra faire preuve de réalisme en recherchant avec une hauteur de réalisation minimum un allègement maximum de la structure. En effet la forme en caisson favorise et permet de mettre en œuvre des techniques du type « câbles précontraints » aptes à assurer une reprise des efforts au centre de la portée. Ces techniques étant complétées, comme pour le praticable, par un remplissage de mousses incompressibles type mousse syntactique (voir note N° 1). Ces poutres assurent, dans des gainages spécifiques, le cheminement, le long de la rame, des câbles électriques, hydrauliques de puissance comme de contrôle. L'ensemble ainsi constitué (poutres, praticable) au travers de la suspension, a une garde au rail modulable de 50 à 250 mm.

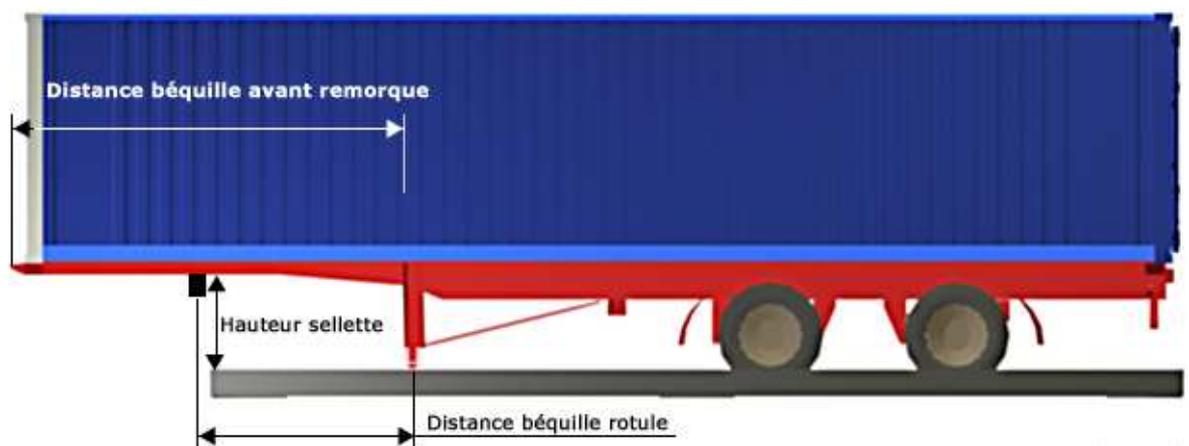
## 8.2.2.4 Le système de fixation et de reprise des charges

### 8.2.2.4.1 Cas des remorques

Cette nécessité « de reprise de la charge » présente un certain nombre de difficultés.

- Les opérations d'embarquement/débarquement se réalisent sur un élément mobile et interchangeable « le praticable » et cela en absence du wagon.
- Les opérations de chargement/déchargement sur le wagon se réalisent entièrement en automatique, sans liaison rigide mécanique et/ou électrique entre les divers éléments constituant la chaîne d'ordonnancement des actions nécessaires.
- La diversité du matériel routier « remorque » impose, en outre, un certain nombre de variables entre : la position du système de reprise de la remorque sur la balancelle et l'axe d'articulation de la remorque appelé « cheville ouvrière » qui lui servira d'attache sur ladite balancelle.
- S'impose également la mise en place d'une transmission de données entre le praticable et la rame.

La détermination de la position de la remorque sur le praticable sera précisée dans le chapitre concernant la gare ; elle dépend exclusivement de l'organisation de l'embarquement de la remorque sur le praticable. La capacité de réglage sera en hauteur de l'ordre de 420 mm, et en longueur de 950 mm. Les premières recherches font apparaître des solutions extrêmement simples qui font l'objet d'un dépôt de brevet de la part d'un intervenant.



© 2006 le tapis volant

Figure 39 : Caractéristiques routières à considérer

L'ajustement nécessaire pour la reprise de sellette pour l'ensemble des remorques aujourd'hui en service est estimé comme suit :

- Longueur du praticable = 10mètres
- Hauteur de sellette = 845 à 1250 mm
- Distance béquille cheville ouvrière = 1800 à 850 mm
- Distance béquille avant de la remorque = 2100 mm maxi

#### 8.2.2.4.2 Cas des conteneurs

Cette fonctionnalité est d'autant plus indispensable que le conteneur se trouve désolidarisé du praticable et repose sur le dessus de la balancelle pendant ces déplacements. Elle se trouve cependant simplifiée par une parfaite définition géométrique du conditionnement à l'exclusion de la longueur qui répond à plusieurs valeurs.

En cours de descente à l'intérieur du wagon le conteneur s'immobilise sur la partie haute de la balancelle, à une hauteur de 845 mm des rails, se désolidarise du praticable (s'il est présent), qui termine sa course pour venir se déposer sur le fond de la balancelle à environ 280 mm des rails. Les références de positionnement du conteneur qui ont été obtenu, au moment de sa dépose en zone d'embarquement/débarquement définissent un positionnement précis et identique, dans deux directions, de tous les types de conteneurs. Cette référence se fait par rapport au bogie commun du wagon double. Cette méthode permet une dépose précise sur la balancelle. Elle impose à l'autre extrémité du wagon un système de bridage une capacité de réglage de 1,524 mètres pour passer d'un conteneur de 40 à 45 pieds.

Dans ce cycle le praticable (s'il est présent) se retrouve, en fin de descente, dans les mêmes conditions que le transport d'un praticable vide. Nous pouvons admettre que les conditions que nous définissons en amont pour un praticable vide interdisent bien dans ce cas son relevage intempestif.

*Nota : jusqu'à 30 pieds les conteneurs se retrouvent dans les mêmes conditions que les remorques ou tracteurs à savoir en dépose sur le bas de la balancelle, donc encastré dans le châssis ; ce qui supprime toute notion de verrouillage.*

On se posera la question à l'occasion de l'étude finale de la nécessité ou non de conserver le praticable dans ce cadre d'utilisation. Cette réflexion se complètera de celle qu'il faudra également avoir sur la présence du praticable, dans le cas, d'un wagon vide. Les économies d'échelle que représenterait l'absence du praticable dans ces deux configurations sont à mettre en balance avec les coûts de recyclage des praticables.

Pour répondre au besoin de verrouillage des conteneurs de 40 et 45 pieds nous avons disposé sur le plateau de la balancelle, coté de référence, une ridelle en forme de U. Elle permet, tout en le recentrant, de les déposer sur des doigts aptes à le retenir. A l'autre extrémité deux ridelles latérales recentrent le conteneur et lui interdisent tout mouvement de rotation. Il peut se rajouter à ce dispositif un verrouillage/bridage mécanique à commande hydraulique.

## 8.2.3 LE BOGIE R-SHIFT-R

### 8.2.3.1 Introduction

Le bogie de la rame R-shift-R est un élément constitutif essentiel de cette dernière. Le cahier des charges fourni par les inventeurs du concept impose à ce bogie de répondre à un certain nombre de contraintes dont notamment les deux plus importantes à savoir : permettre le déplacement de la rame par l'intermédiaire d'une multiple motorisation, et permettre une garde au rail variable de 50 mm à 250 mm.

La phase 2 du présent projet avait ainsi notamment pour objectif d'étudier la faisabilité technique d'un bogie permettant le transport de semi-remorques grand volume, s'intégrant et respectant les gabarits en vigueur (à savoir autoriser le passage dans un tunnel au gabarit GB+).

Ceci consisté à proposer une architecture de bogie répondant aux deux contraintes principales. Une maquette numérique 3D a été constituée afin de permettre de juger de la faisabilité de ce bogie, notamment au niveau des encombrements géométriques. On peut néanmoins remarquer que le concept global R-shift-R n'est pas rattaché absolument aux deux contraintes précédemment évoquées et qu'un bogie beaucoup plus classique pourrait éventuellement convenir, mais en dégradant un certain nombre de fonctions. Un dossier numérique contenant les fichiers de la maquette numérique et les fiches de calculs est également fourni.

Comme expliqué précédemment, la rame doit notamment permettre le transport de semi-remorques grand volume tout en pouvant passer dans les tunnels. Il est clair qu'avec une semi-remorque de hauteur 4,2 mètres et une épaisseur de praticable + balancelle de 90 mm sous les roues de la semi-remorque, le gabarit standard des tunnels est impossible à utiliser avec une garde aux rails standard. Par contre, cela mérite d'être étudié en ce qui concerne le gabarit GB+ (figure 3).

Cela suppose donc d'intégrer aux bogies un système permettant de faire varier la hauteur du wagon pour avoir une garde au rail faible lors du passage de tunnels et une garde au rail standard de 250 mm dans les autres situations (figure 4). Ainsi, la rame R-shift-R doit être capable de faire varier sa garde au rail en roulant, à l'approche et à la sortie de tunnels.

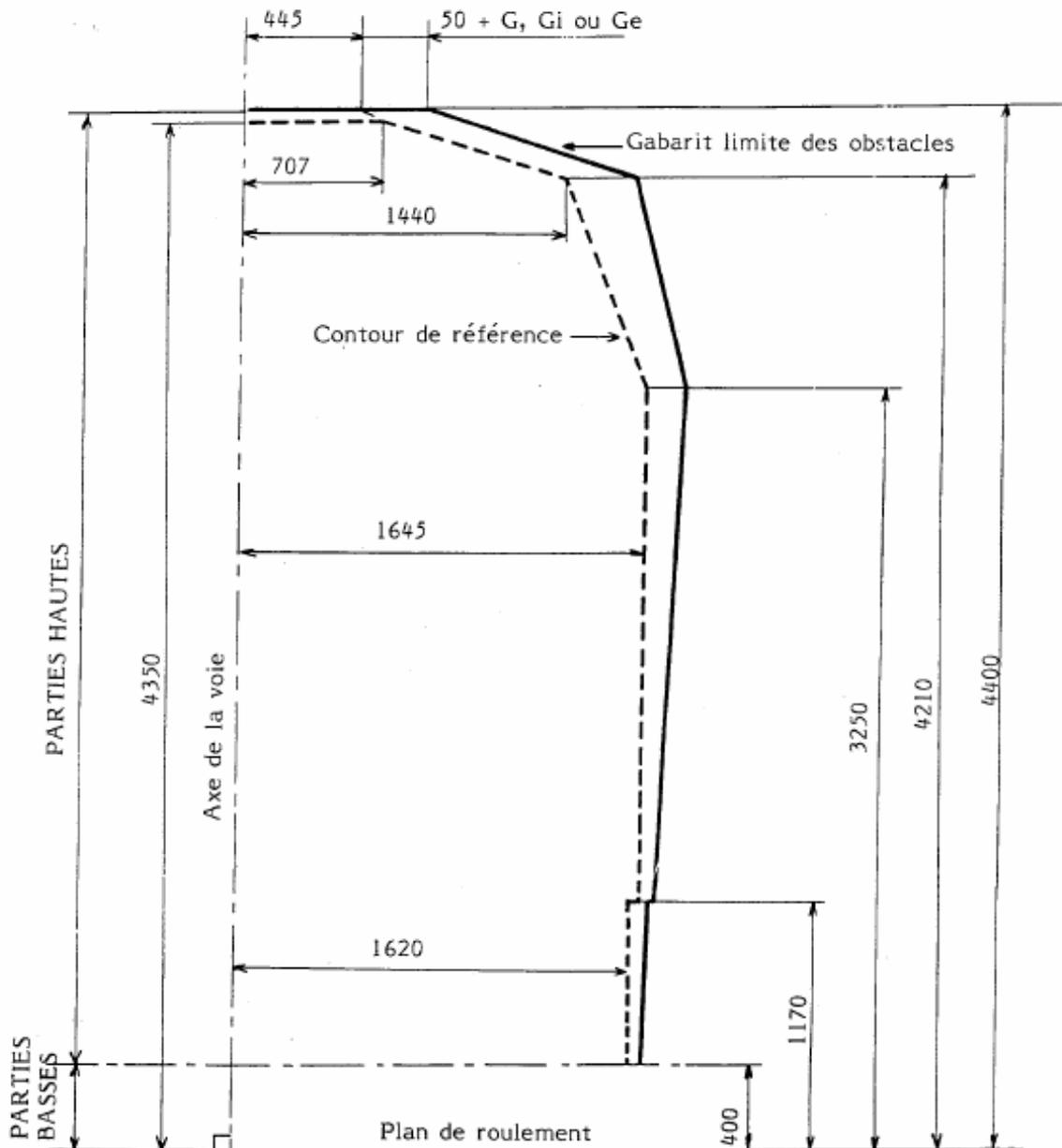


Figure 40 : Gabarit GB+

La figure ci-dessus représente les différents gabarits statiques dont le gabarit GB+. Ces gabarits sont de sections inférieures aux gabarits dynamiques et de courbes de façon à ce qu'un wagon passant dans un gabarit statique puisse bien sur passer dans le tunnel correspondant à la vitesse normale et en virage.

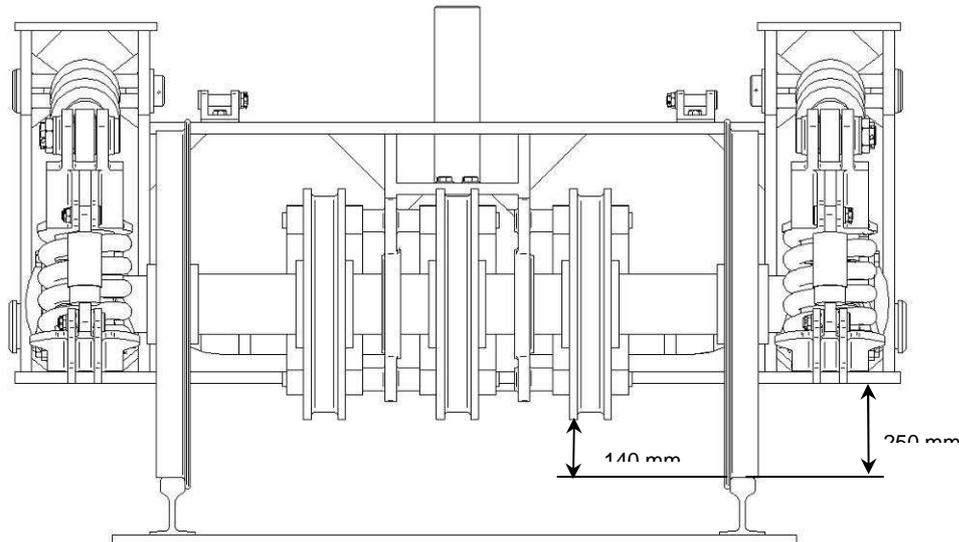


Figure 41 : Garde au rail standard

La garde au rail définie dans le cahier des charges doit être d'environ 140 mm entre les rails et de 250 mm à l'extérieur des rails. Dans le cas du bogie présenté, la garde au rail au niveau des disques de frein est de 155 mm et au niveau du châssis de 250 mm.

### 8.2.3.2 Cahier des charges fonctionnel

Les porteurs du projet R-shift-R ont posé pour le bogie les fonctions principales et les fonctions contraintes suivantes.

#### 8.2.3.2.1 Fonctions principales

Fonction principale 1 : Permettre de supporter le châssis d'un wagon et d'en assurer son déplacement.

Fonction principale 2 : Respecter les gabarits en vigueur, en ayant une garde au rail variable.

La garde au rail de 250 mm permet à une rame R-shift-R de pouvoir circuler sur une voie sans mise en conformité spécifique du profil bas de celle-ci, et d'avoir la possibilité de traverser un tunnel au gabarit GB+ avec une semi-remorque de 4,2 m embarquée sur le wagon. Pour parvenir à répondre aux deux contraintes, il est nécessaire de réduire la garde au rail d'où la valeur imposée de 50 mm par le cahier des charges. A contrario cela imposera une mise en conformité de la partie basse des tunnels.

### 8.2.3.2.2 Fonctions contraintes

Un indice de tolérance est affecté à chaque contrainte. Plus cet indice est faible, plus il est important de respecter la fonction tel qu'elle est énoncée.

- F0 : fonction non négociable.
- F1 : fonction peu négociable.

Contraintes	Caractérisation	Tolérance
Disposer d'une motorisation pour assurer les déplacements	Présence d'un ou plusieurs moteurs électriques	F0
Etre capable de se déplacer à vitesse élevée	Vitesse de 120 ou 180 km/h	F1
Respecter les gardes aux rails hors tunnel	250 mm de part et d'autre de la voie 140 mm entre les rails	F0
Respecter les charges à l'essieu	25 T / essieu – Le bogie sera calculé pour une valeur de 32.5 T/essieu	F0
Charge admissible	44 Tonnes / praticable <i>Données similaires au cahier des charges RFF pour la ligne ferroviaire Lyon Turin.</i>	F0
Etre capable de gravir des pentes importantes	35‰	F1
Supporter le poids de la charge et celui du praticable	Masse estimée de l'ensemble praticable + balancelle : 8 Tonnes	F0
Etre le plus léger possible	Masse maximale des bogies : 7 Tonnes	F1
Respecter la géométrie des voies	Ecartement: 1,53m, Rayon de courbure minimal: 75m en gare	F0
Etre capable de s'arrêter suivant la réglementation en vigueur	Décélération de 0.7m/s <sup>2</sup>	F0
Fonctionner de manière silencieuse	Liaisons mécaniques sans jeu	F1

Tableau 14: Liste et caractérisation des fonctions contraintes

### 8.2.3.3 Les différents sous systèmes du bogie

Le bogie a été divisé en différents sous-systèmes fonctionnels qui ont pu être étudiés séparément avant d'être intégrés à l'architecture globale du bogie par la suite.

- La **suspension** intègre le système de variation de hauteur du bogie ainsi que le dispositif d'amortissement. Ce sous-système inclus également les organes tournant (essieux).
- Le **système de freinage** est constitué de freins à disques et inclut la structure supportant les étriers de frein. Il doit permettre de stopper le wagon avec sa charge utile en respectant la réglementation.
- La **motorisation** est constituée d'un moteur électrique entraînant un essieu par l'intermédiaire d'un réducteur mécanique à engrenages. Un wagon R-shift-R comporte deux moteurs sur le bogie central.
- Le **châssis** est la pièce principale du bogie. C'est sur celui-ci que viennent se fixer les autres sous-systèmes ainsi que les supports des praticables.
- Le **circuit hydraulique** est commun aux trois bogies du wagon. Il a pour fonction d'alimenter en énergie le système de variation de hauteur ainsi que de contrôler ces variations de hauteur.

### 8.2.3.4 Solution proposée

#### 8.2.3.4.1 Présentation générale

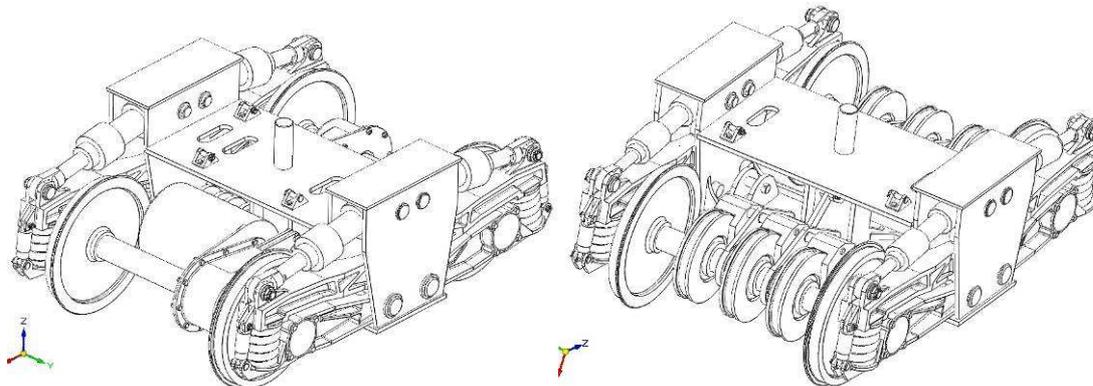


Figure 42 : Bogie motorisé / freiné

Comme illustré sur la figure ci-dessus, la construction proposée est un bogie avec une architecture assez novatrice. Le châssis très compact reçoit de longs bras inférieurs de suspensions qui permettent, en contrôlant leur positionnement, de faire varier la garde au rail. Ce bogie est réalisé dans deux versions différentes, l'une motorisée avec deux moteurs électriques placés sur les deux essieux, et l'autre non motorisée avec deux essieux freinant.

La version motorisée est placée au centre du wagon double alors que les deux bogies freinés sont placés aux extrémités.

#### 8.2.3.4.2 Caractéristiques principales

- Empattement des bogies : 2 m
- Diamètre des roues : 920 mm
- Masse du bogie motorisé : 8.6 Tonnes
- Masse du bogie non motorisé : 7.9 Tonnes
- Epaisseur de l'ensemble constitué du praticable et de la balancelle au niveau des roues de la semi-remorque : 50 à 90 mm initialement prévu.  
30 à 50 mm au choix.
- Garde au rail en position haute : 250 mm.
- Garde au rail en position basse : 50 à 70 mm au choix.
- Puissance de la motorisation montée sur un bogie moteur : 2 fois 250kW
- Puissance totale de la motorisation d'une rame : 11.5 MW
- Dispositif de freinage : 3 disques de 610mm sur tous les essieux non motorisés.
- Energie de freinage : Hydraulique ou pneumatique (3.8 bars).

#### Dispositif hydraulique de variation de garde au rail :

- Dispositif de variation de hauteur : 12 vérins hydrauliques synchronisés (4 par bogie).
- Durée de manœuvre : 21 s environ en montée.
- Pression de vérin maxi : 330 bars
- Puissance maximale : 12 kW.
- Puissance totale pour la rame : 580 kW.

#### Performances :

- Charge utile à 25T/essieu, charge parfaitement centrée : 35 T/praticable.
- Décalage de la charge utile vers l'extérieur pour avoir une charge de 44 tonnes : 1,4 m (voir annexe charge utile)
- Garde au rail possible : 0 à 280 mm.
- Vitesse maximale à pente de 35%0 : 37 km/h.
- Durée pour atteindre 120 km/h sur le plat : 159 s.

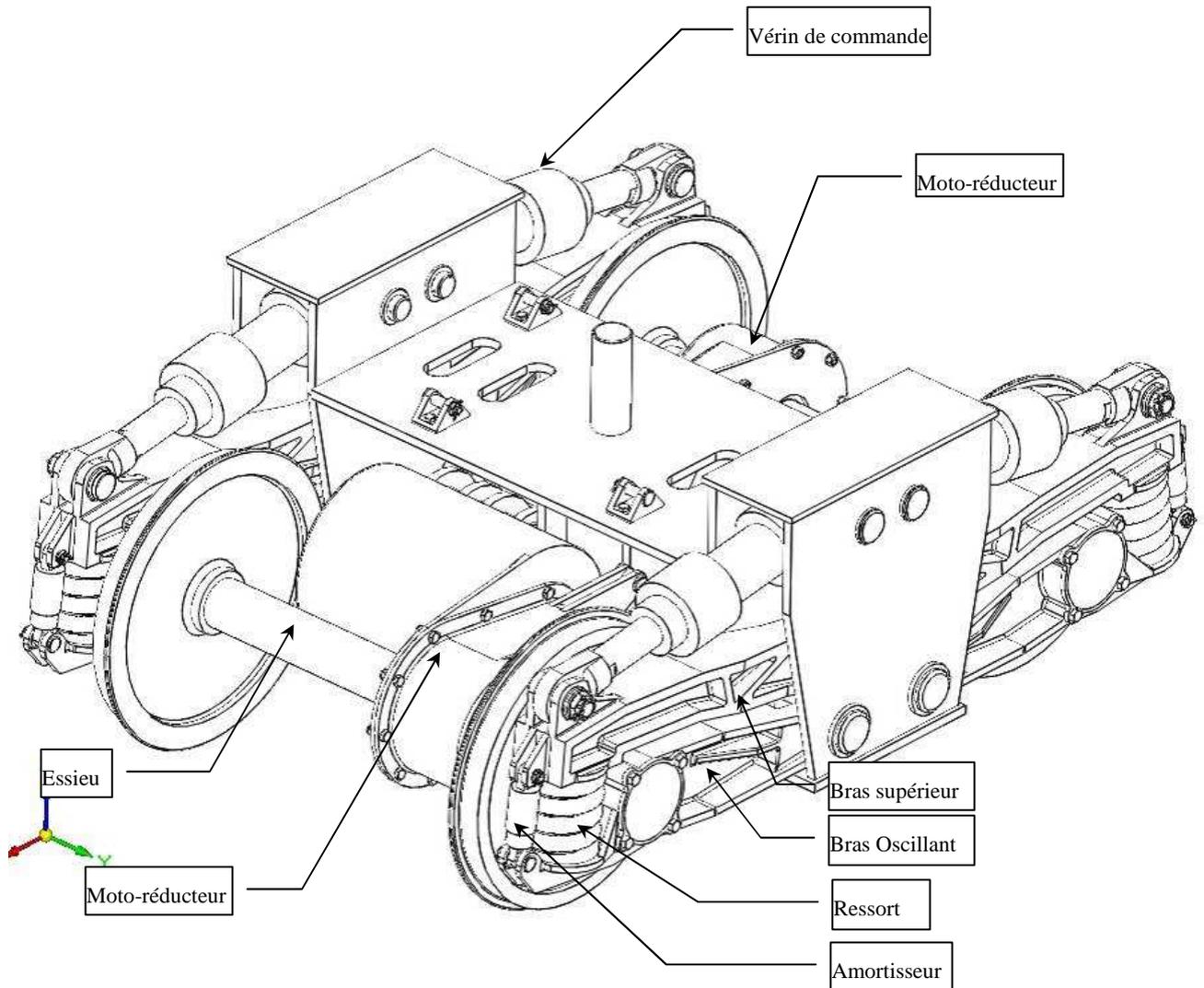


Figure 43 : Bogie central motorisé

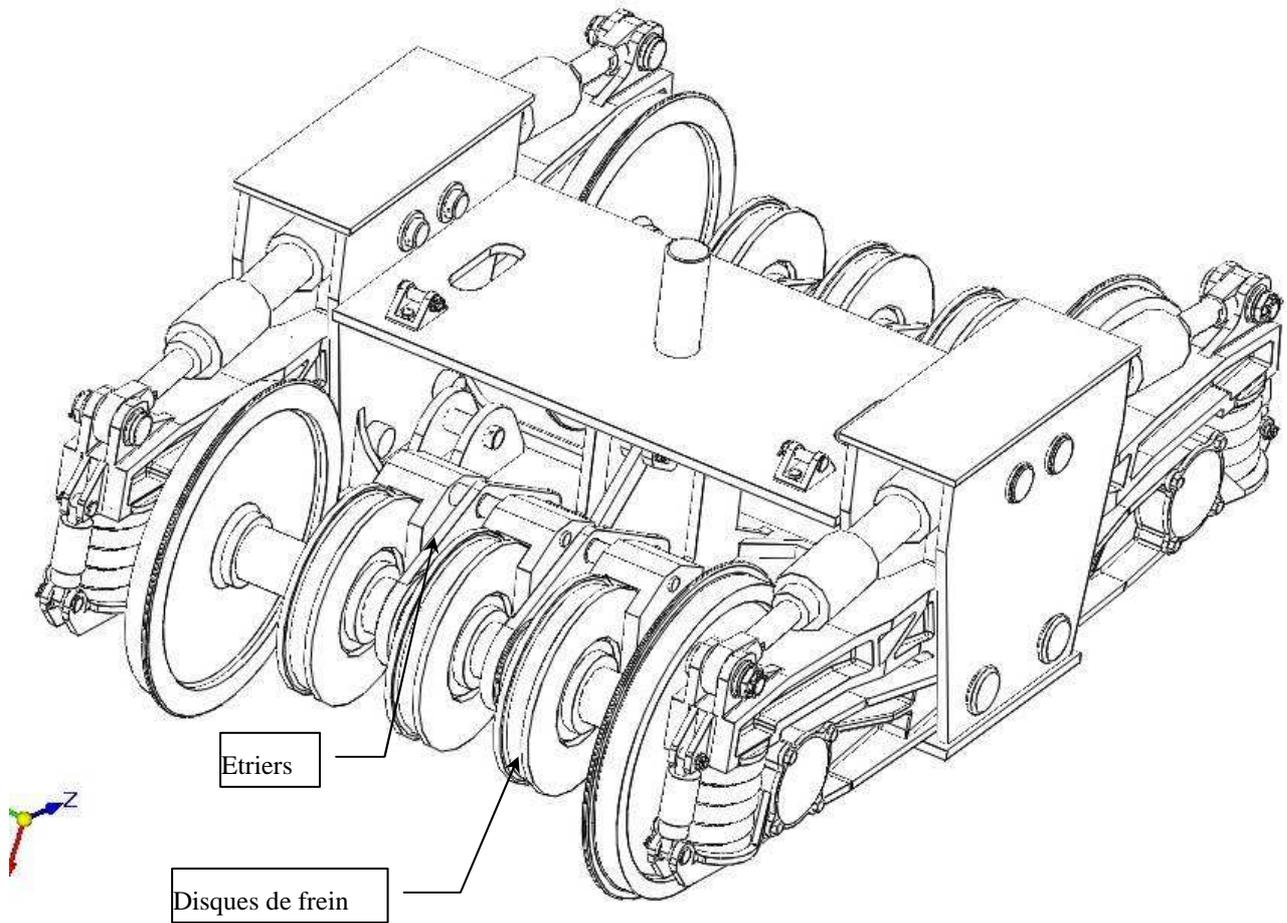


Figure 44 : Bogie externe freiné

### 8.2.3.4.3 La suspension

#### 8.2.3.4.3.1 Dispositif de variation de hauteur

Jugé nécessaire par les concepteurs du projet, le dispositif pour faire varier la hauteur du bogie est composé d'un bras de suspension et d'un vérin hydraulique, ce dernier définit, en fonction de la référence de sortie de sa tige, la position angulaire de ce bras supérieur par rapport au châssis. Le châssis porte un second bras « porte essieux », nommé « bras de suspension », ayant le même point de rotation que le bras supérieur, la liaison avant, avec le premier bras, est assurée par le ressort de suspension. Cette disposition permet de bénéficier d'un système très compact en conservant des efforts acceptables.

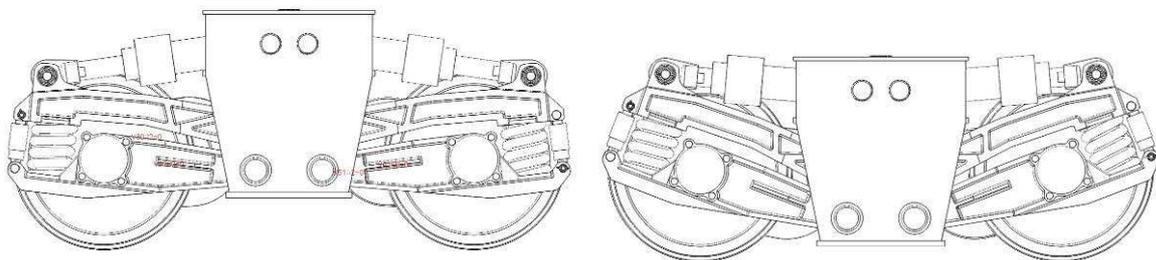


Figure 45 : Position haute et basse

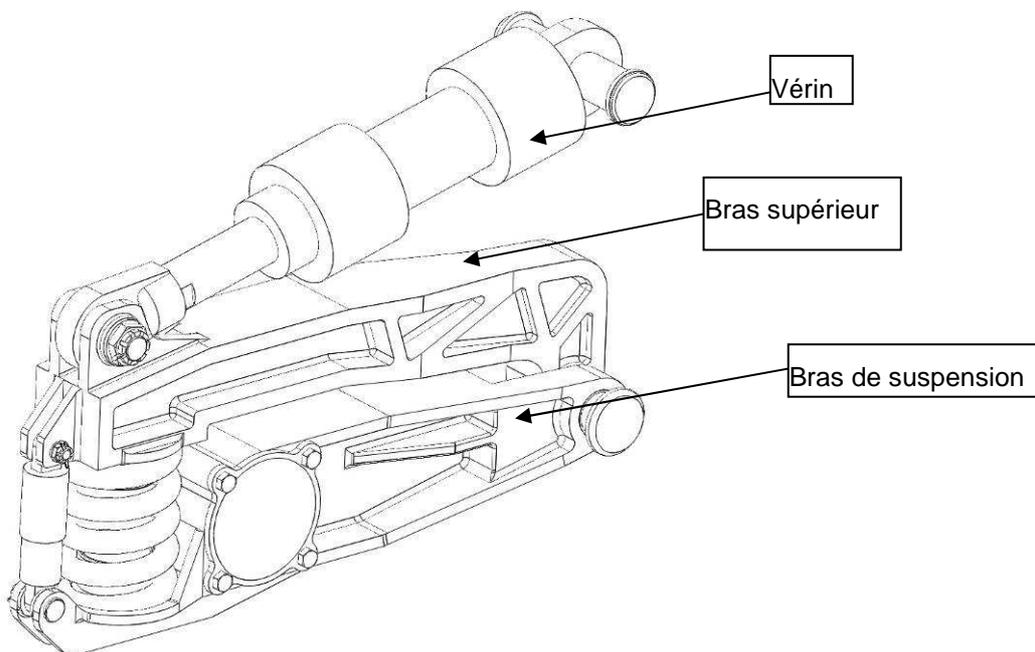


Figure 46 : Bras de suspension et supérieur

Les dimensions caractéristiques de cette géométrie sont données dans la figure ci-après. Cette configuration permet une optimisation de l'encombrement général de l'ensemble tout en prévenant toute interférence géométrique sur toute la plage de garde au rail. Le schéma suivant est le schéma cinématique de la solution.

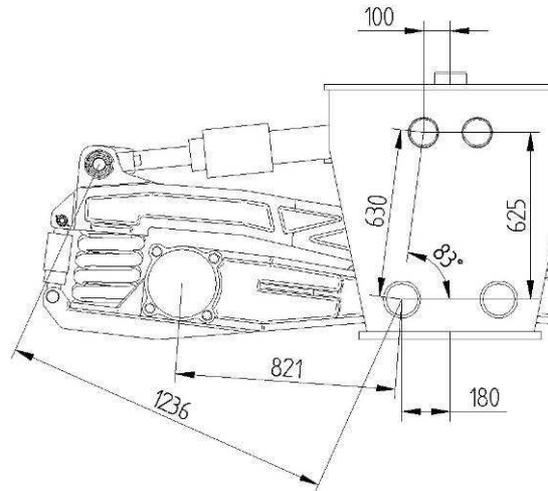


Figure 47 : Dimensions caractéristiques

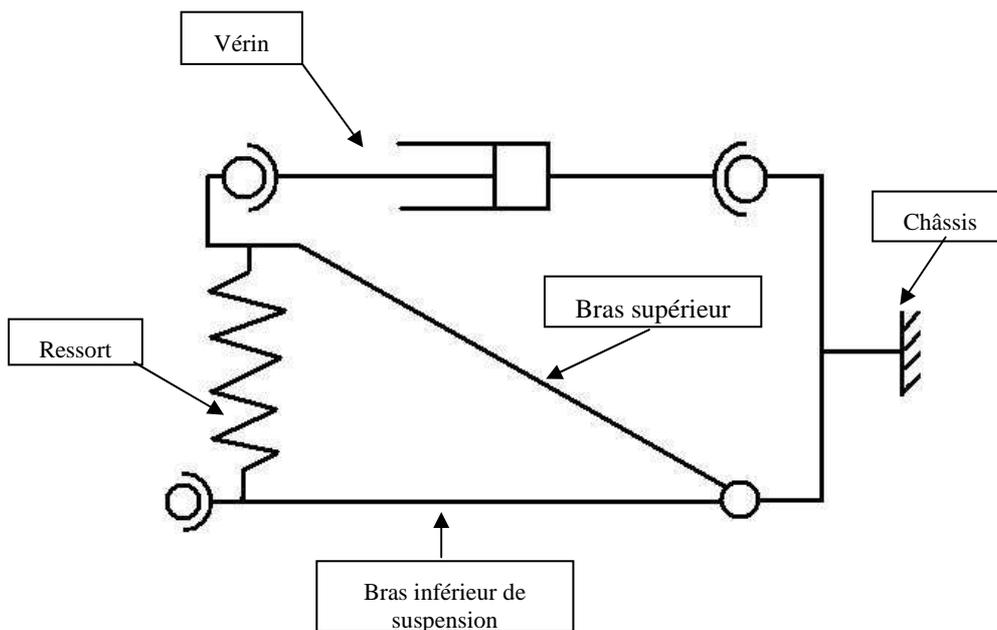


Figure 48 : Schéma cinématique

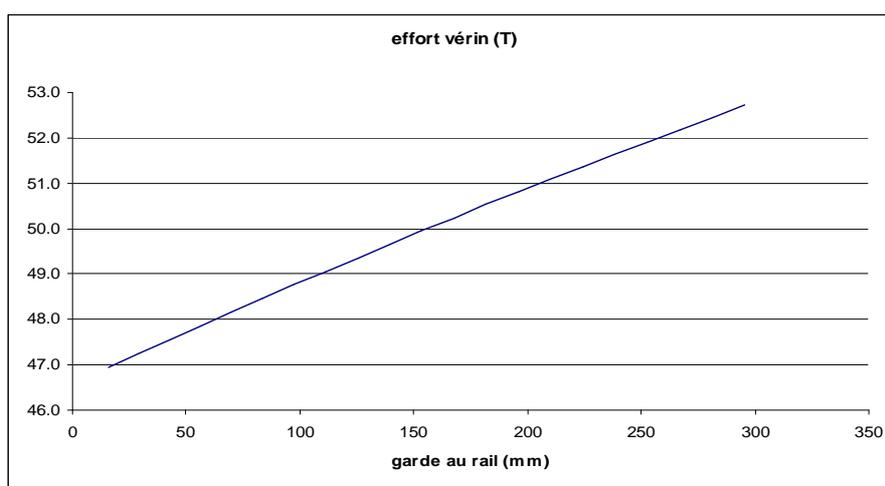
Le cahier des charges indique comme données plusieurs valeurs à respecter :

- Charge utile maximale : 44 tonnes.
- Charge maximale à l'essieu : 25 tonnes.
- Charge de dimensionnement : 32,5 tonnes / essieu.

Dans la suite, sauf cas précisé, il sera adopté comme base de calcul la charge à l'essieu de 32,5 tonnes/essieu car celle-ci correspond à une charge utile de 50 tonnes par praticable (charge utile centrée sur le praticable – Voir annexe « charge utile »).

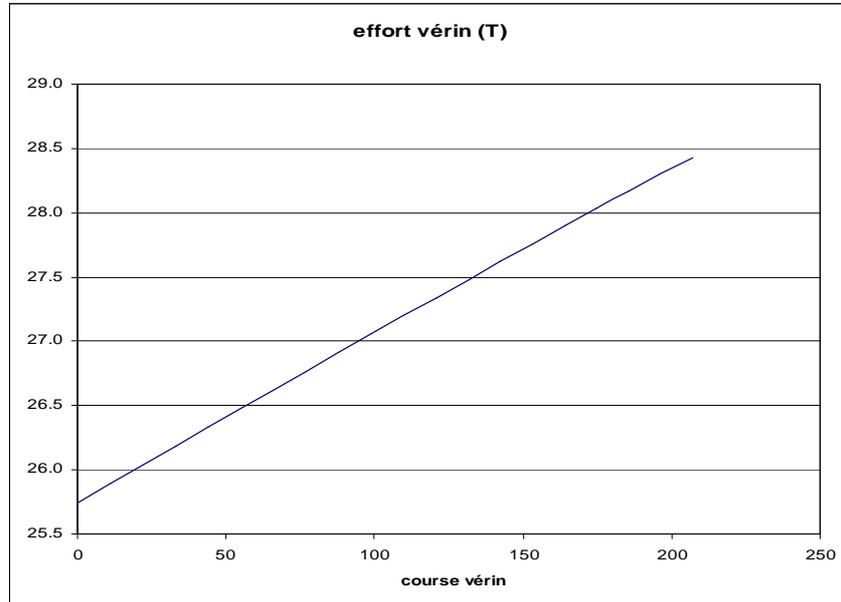
Lorsque le bogie est à sa charge maximale de 32.5 tonnes/essieu, en prenant comme cas de charge deux charges utiles identiques et centrées dans les deux praticables du wagon double, l'effort à fournir par les vérins est de :

- 40 tonnes (effort statique) à 250 mm de garde au rail pour les vérins du bogie central moteur. Le tableau et la courbe ci-dessous représentent la variation de l'effort sur le vérin et de la garde au rail en fonction de la course du vérin. La colonne « effort vérin pondéré » tient compte du coefficient de pondération des charges verticales  $\alpha_d=1.3$  appliqué par la SNCF comme coefficient dynamique.



Course du vérin (mm)	Effort vérin statique (t)	Effort vérin pondéré	Garde au rail (mm)
249	40.5	52.7	296
238	40.3	52.5	281
226	40.1	52.2	267
214	39.9	51.9	253
203	39.7	51.6	238
191	39.5	51.4	224
179	39.3	51.1	210
168	39.1	50.8	196
156	38.9	50.5	182
144	38.6	50.2	167
132	38.4	49.9	153
120	38.2	49.6	139
108	38.0	49.4	125
96	37.7	49.1	111
84	37.5	48.8	98
72	37.3	48.5	84
60	37.0	48.2	70
48	36.8	47.8	56
36	36.6	47.5	43
24	36.3	47.2	29
12	36.1	46.9	16
0	35.9	46.6	2

- 21.7 tonnes à 250 mm de garde au rail pour les vérins du bogie externe freinant (essieux à 16.25 tonnes).



course = du vérin (mm)	effort vérin statique (tonnes)	effort vérin pondéré	Garde au rail (mm)
228	22.1	28.7	310
218	22.0	28.6	296
207	21.9	28.4	281
196	21.8	28.3	267
186	21.7	28.2	253
175	21.6	28.0	238
164	21.5	27.9	224
153	21.4	27.8	210
142	21.2	27.6	196
132	21.1	27.5	182
121	21.0	27.3	167
110	20.9	27.2	153
99	20.8	27.1	139
88	20.7	26.9	125
77	20.6	26.8	111
66	20.5	26.6	98
55	20.4	26.5	84
44	20.3	26.3	70
33	20.1	26.2	56
22	20.0	26.0	43
11	19.9	25.9	29
0	19.8	25.7	16

Un premier choix s'est porté sur un vérin choisi dans la gamme du constructeur Bosch-Rexroth. Il convient d'adopter des vérins identiques pour tous les bogies même si les bogies externes de chaque wagon double sont par nature moins chargés que le bogie central. En effet, il sera plus aisé de synchroniser les mouvements de tous les vérins avec des débits d'alimentation identiques entre eux. Il ne faut donc pas tenir compte des images présentes dans ce rapport qui montrent des vérins différents en fonction du type de bogie. Les vérins sont fixés à leurs deux extrémités par des rotules Bosch-Rexroth afin de ne pas rajouter de contraintes d'assemblage supplémentaires.

*Nota : le nombre important de systèmes à réaliser peut amener (en fonction des contraintes d'encombrements) le constructeur à élaborer un vérin spécifique.*

#### 8.2.3.4.3.2 Nécessité d'avoir une garde au rail variable

Comme nous l'avons vu précédemment il est impossible de pouvoir franchir le gabarit GB+ avec une garde au rail de 250 mm et une semi-remorque de 4,2 mètres de hauteur ! Le problème se pose uniquement pour les remorques alors qu'il est absent pour les conteneurs qui sont moins haut. L'image suivante de la maquette numérique montre les interférences entre le sommet de la remorque et la partie supérieure du gabarit GB+, pour un wagon disposant de 250 mm de garde au rail. On constate de même une interférence entre la balancelle et les parties basses du tunnel, cela est dû au fait que la modélisation géométrique de la balancelle est à l'heure actuelle très grossière. On peut en déduire qu'une des contraintes fortes du cahier des charges de la balancelle sera justement d'avoir une géométrie évitant ou tout au moins minimisant le plus possible des travaux d'élargissement des voies basses du tunnel.

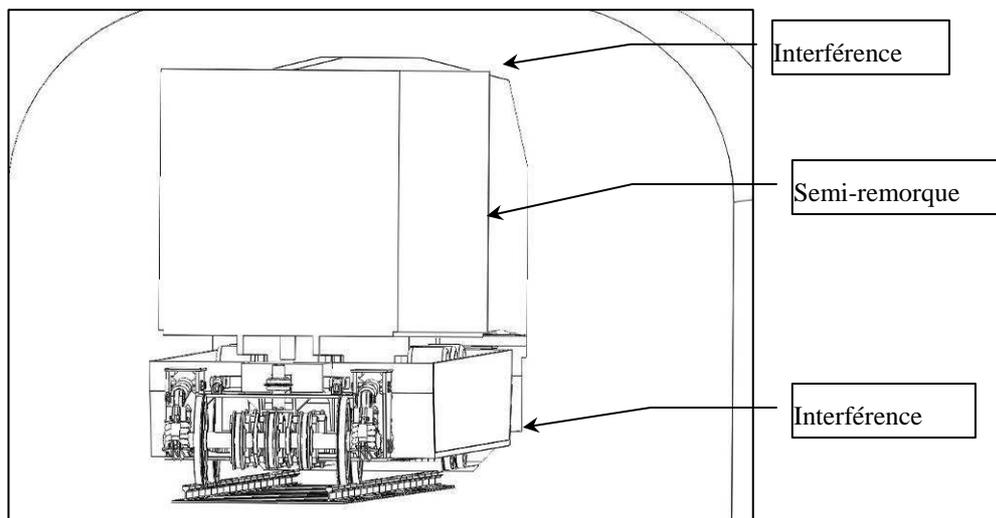


Figure 49 : Interférences dues aux gabarits

Il est donc nécessaire d'examiner pour différentes hauteurs de semi-remorques et différentes gardes au rail la garde au gabarit, soit la distance normale entre la partie haute de la semi-remorque et les plans inclinés du plafond du tunnel. De plus, la seule connaissance de la garde au gabarit est insuffisante pour décider la validité de la solution ou non. En effet, les valeurs de garde au gabarit sont des valeurs théoriques dans le cas d'une semi-remorque parfaitement centrée par rapport au tunnel, ce qui ne sera bien sûr pas le cas dans la réalité.

Aussi convient-il d'examiner également le débattement latéral possible de la semi-remorque par rapport au tunnel sans toucher le gabarit. Les tableaux ci-dessous regroupent des résultats pour différentes hauteurs de semi-remorques, les deux valeurs initialement envisagées par les concepteurs de l'épaisseur de l'ensemble praticable + balancelle sous les roues de la SR, pour deux cas de chargement :

- Chargement de 44 tonnes centré sur chaque praticable.
- Chargement de 7 tonnes, soit approximativement le poids à vide d'une SR.

Chargement 44 tonnes (garde au rail de 50 mm).						
garde au tunnel (mm)	hauteur de la remorque (suspensions dégonflées (-100 mm) Les hauteurs ci-dessous tiennent donc compte du dégonflage, i.e. que la hauteur de 3900 correspond à une remorque de 4000 mm.					
épaisseur praticable + balancelle (mm)		3900	4000	4100	4096	4137
	90	193.2	95.0	-3.2	0	-
	50	232.5	134.3	36.1	-	0
positionnement latéral (+/- mm)	hauteur de la remorque (suspensions dégonflées) mm					
épaisseur praticable + balancelle (mm)		3900	4000	4100	4096	4137
	90	1030	507	-	0	-
	50	1240	716	192	-	0

Chargement 7 tonnes (garde au rail de 90 mm à cause de la décompression des ressorts)						
garde au tunnel (mm)	hauteur de la remorque (suspensions dégonflées) mm					
épaisseur praticable + balancelle (mm)		3900	4000	4100	4057	4097
	90	154	55.7	-42.5	0	-
	50	193.2	95.0	-3.2	-	0
positionnement latéral (+/- mm)	hauteur de la remorque (suspensions dégonflées) mm					
épaisseur praticable + balancelle (mm)		3900	4000	4100	4057	4097
	90	821	297	-	-	-
	50	1030	507	-	-	-

Les tableaux ci-dessus montrent bien la nécessité de la prise en compte de la variation de la garde au rail en fonction de la charge embarquée. De plus, Il apparaît également qu'avec une garde au rail de 50 mm et une épaisseur de châssis de wagon sous les roues de la semi-remorque de 90 mm, il n'est pas possible de passer dans le tunnel avec une semi-remorque de hauteur 4200 mm, puisque en effet, il manque 3.2 mm. Afin de pouvoir en effet embarquer une semi-remorque de cette hauteur sans avoir de contraintes fortes quant à la précision du positionnement latéral de la semi-remorque par rapport au tunnel, Il convient de dégrader certaines valeurs du cahier des charges. Les valeurs concernées sont la garde au rail en position basse et l'épaisseur du châssis située sous les roues de la semi-remorque. La garde au rail étant déjà très faible (50 mm) il convient de plutôt agir sur la quantité de matière qui elle, est largement suffisante (90 mm).

Remorque de 44 tonnes de hauteur 4m200 suspension dégonflée (-100 mm).								
Garde au rail (mm)	50	50	50	50	60	<b>70</b>	<b>60</b>	<b>70</b>
épaisseur praticable + balancelle (mm)	90	80	70	60	50	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>30</b>
Garde au tunnel (mm)	-3.2	6.6	16.4	26.3	26.3	<b>26.3</b>	<b>36.1</b>	<b>36.1</b>
Positionnement latéral (mm)	-	35	88	140	140	<b>140</b>	<b>192</b>	<b>192</b>

Les trois dernières colonnes permettent de conclure que la garde au rail en position basse peut être augmentée et que la précision de positionnement latéral du chargement sur le wagon n'est pas une contrainte forte. **Une garde au rail de 70 mm en position basse semble donc largement envisageable.**

#### 8.2.3.4.3.3 Prise en compte de la variation de la garde au rail en fonction de la charge

Le circuit hydraulique des bogies doit être capable de compenser les différences de garde au rail en fonction des charges embarquées. Ainsi, le passage de la charge maximale de 44 tonnes à la masse d'une semi-remorque vide de 7 tonnes induit une décompression des ressorts de suspension des bogies et donc une variabilité de la garde au rail. En conséquence et en l'absence correction cela induit une position plus haute des semi-remorques et éventuellement une interférence avec le gabarit GB+.

Les tableaux ci-dessous montrent pour chacun des deux bogies les différences de garde au rail en fonction des deux types de chargement.

Garde au rail bogie central double motorisé			
course du vérin = (mm)	Charge maximale (longueur ressort = 281 mm)	Charge minimale (longueur ressort = 347 mm)	position
223	264	313	position haute
212	<b>250</b>	<b>300</b>	
200	236	285	
175	205	254	
80	93	141	position basse
70	82	129	
60	70	118	
50	59	106	
43	<b>51</b>	<b>98</b>	
40	48	95	

Garde au rail bogie externe freiné			
course du vérin = (mm)	Charge maximale (longueur ressort = 281 mm)	Charge minimale (longueur ressort = 347 mm)	position
207	278	317	position haute
200	269	308	
195	262	301	
190	256	294	
186	<b>250</b>	<b>289</b>	
45	69	106	position basse
40	62	100	
35	56	93	
31	<b>51</b>	<b>88</b>	
30	50	87	
22	40	77	

Ces variations importantes sont dues au choix de ressorts de suspension souples afin de privilégier un certain silence de fonctionnement. Il convient donc dans ce cas d'avoir une hydraulique permettant d'avoir une garde au rail indépendante du chargement, pour les deux positions haute et basse des bogies. Pour cela il faut contrôler la position des bras inférieurs de suspension par rapport au châssis à l'aide de capteurs de fin de course par exemple ou de codeurs rotatifs. Les vérins agissent, quant à eux sur les bras supérieurs, qui, à leurs tours, agissent sur les bras inférieurs par l'intermédiaire des ressorts.

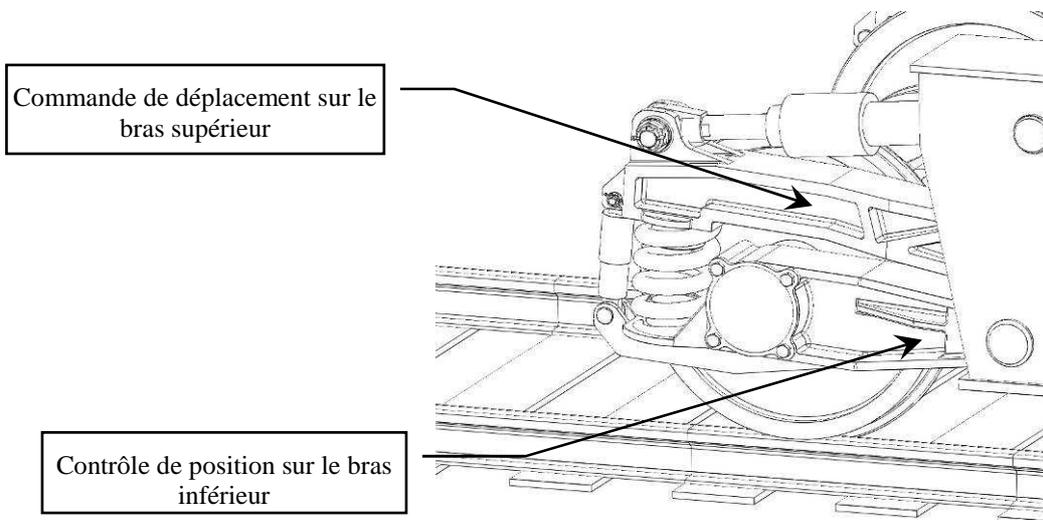


Figure 50 : Garde au rail standard

Si l'on souhaite simplifier la partie hydraulique du bogie en supprimant le contrôle de la garde au rail, il est alors nécessaire de durcir fortement la suspension en augmentant la raideur des ressorts pour minimiser l'influence de la variation de la garde au rail en fonction de la charge.

Si on adopte les valeurs suivantes :

- Garde au rail de 40 mm à charge maximale.
- Garde au rail de 50 mm remorque semi-vide.

On obtient les valeurs suivantes de raideur de ressort :

Raideur N/mm	Bogie motorisé	Bogie freiné
Avec correction de la garde au rail	1400 N/mm	725 N/mm
Pas de correction	5900 N/mm	2400 N/mm

Cela impose alors l'utilisation de ressorts beaucoup plus raides donc a priori un wagon plus bruyant.

#### 8.2.3.4.3.4 Dispositif d'amortissement

L'amortissement est assuré par le mouvement relatif entre le bras supérieur et le bras principal de la suspension. Pour contrôler ce mouvement, un ressort hélicoïdal combiné à un amortisseur classique est positionné en bout de bras afin de limiter l'effort qu'il doit encaisser grâce à un bras de levier plus important. Les ressorts choisis pour le bogie central doivent pouvoir encaisser une accélération verticale du bogie de 0.3g (d'après norme UIC) ce qui correspond à un effort de compression de 35kN au maximum. De plus, il doit pouvoir supporter la charge du bogie qui représente un effort de 117kN. Au total les ressorts sont donc dimensionnés pour supporter une charge de 154kN. Pour le bogie externe, les charges à l'essieu étant plus faibles, l'effort maximal subit par les ressorts est de 77kN.

Afin d'être efficace aussi bien lorsque le wagon est vide que lorsqu'il est chargé, les ressorts doivent être relativement souples. Ils disposent ainsi de raideurs différentes :

- 1400 N/mm pour les ressorts du bogie central ce qui entraîne un écrasement de 65 mm (48 mm au niveau de l'essieu) entre les chargements statique minimal (praticable vide) et maximal (44 Tonnes).
- 725 N/mm pour les ressorts du bogie externe ce qui entraîne un écrasement de 53 mm (39 mm au niveau de l'essieu) entre les chargements statiques minimal et maximal.

Les ressorts ont les caractéristiques suivantes :

- Ressort bogie central :
  - Raideur : 1400 N/mm
  - Diamètre de fil : 46 mm

- Diamètre d'enroulement : 200 mm
- Nombre de spires : 4
- Longueur à vide : 366 mm
- Matériau : acier pour ressorts au silicium de type 55S7 ( $\sigma_e = 1200\text{Mpa}$ )
- Ressort bogie externe :
  - Raideur : 725 N/mm
  - Diamètre de fil : 39 mm
  - Diamètre d'enroulement : 200 mm
  - Nombre de spires : 4
  - Longueur à vide : 359 mm
  - Matériau : acier pour ressorts au silicium de type 55S7 ( $\sigma_e = 1200\text{Mpa}$ )

Les amortisseurs sont implantés à l'extrémité des bras et sont à fixer avec des liaisons rotules. Les modèles à utiliser seront du type classiquement employé sur le matériel roulant apte à circuler à des vitesses de l'ordre de 120 à 180 km/h. Leur dimensionnement nécessite une étude dynamique poussée du wagon qui n'a pas été réalisée au stade de cette étude.

#### 8.2.3.4.4 Les essieux

Les essieux sont en liaison avec les bras de suspension en leurs extrémités. Les liaisons de ce sous ensemble sont choisies de manière à obtenir un ensemble isostatique.

Le schéma cinématique retenu est le suivant :

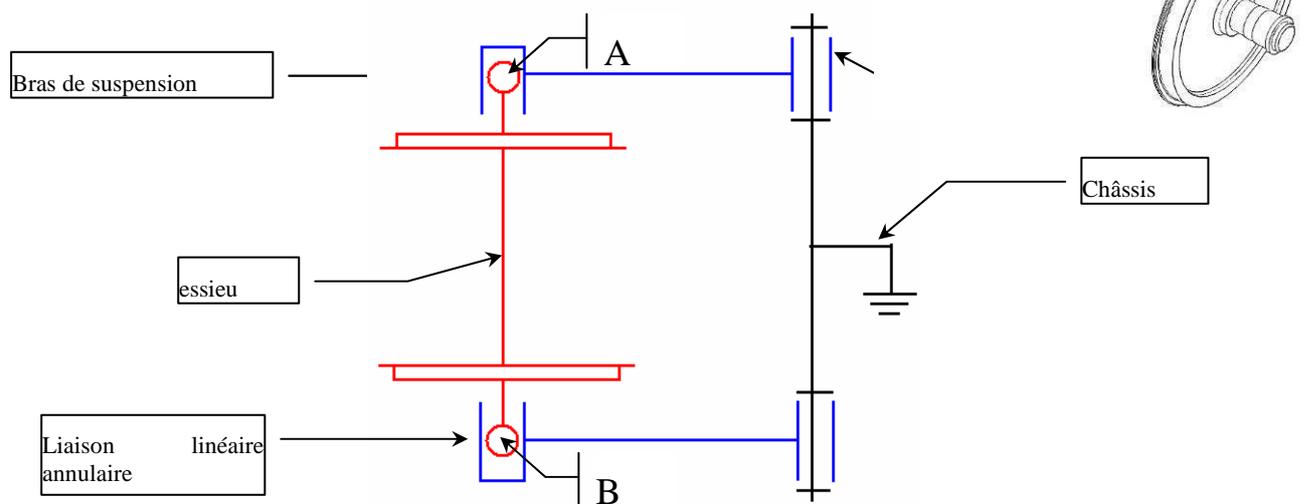


Figure 51 : Schéma cinématique

Les bras de suspension sont montés en liaison pivot rigide avec le châssis. L'essieu, qui est considéré comme rigide, est monté à ses extrémités sur les bras avec des liaisons rotules. Ces liaisons rotules peuvent de plus translater latéralement afin de pouvoir compenser

l'allongement de la distance entre les bras de suspensions au niveau de chaque rotule, quand les bras non pas la même position angulaire. La vue suivante montre ce phénomène. Au final, la liaison équivalente est donc une liaison linéaire annulaire à concevoir. Cette disposition autorise le pivotement indépendant des deux bras sans contraindre l'essieu.

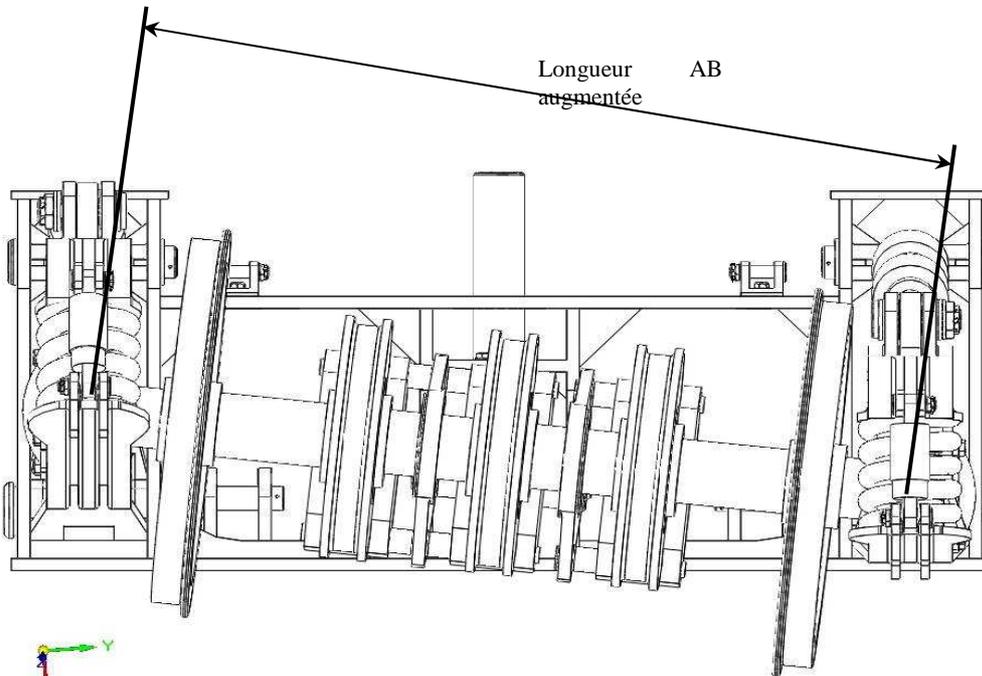


Figure 52 : Positions de l'essieu en fonction des positions des bras

La figure ci-dessus montre que, pour des positions angulaires différentes des deux bras de suspension, l'essieu adopte une position inclinée. Les rotations des bras de suspension se faisant dans un plan vertical, la distance entre eux au niveau des liaisons avec l'essieu augmente. De plus cette image montre parfaitement le braquage induit des roues : Celles-ci les roues ne sont plus parallèles au plan vertical du châssis. Il conviendra donc de bien étudier la conception des liaisons linéaires annulaires entre l'essieu et les deux bras afin que celles-ci compensent les variations de la longueur (AB). De même, il conviendra de mener une étude dynamique du wagon et bogies afin d'examiner notamment les effets du braquage induit.

*Remarque : La figure 15 est une forte exagération de la réalité. Tout d'abord, comme on le verra par la suite, les deux bras de suspensions auront toujours des positions angulaires voisines. Les écarts angulaires sont dus à la compensation des compressions différentes des ressorts si le chargement n'est pas centré par rapport au plan de symétrie longitudinal de bogie ainsi qu'aux effets dynamiques (en virage par exemple).*

La figure ci-dessous montre plutôt l'ordre de grandeur des déplacements que l'on pourrait avoir en supposant un effort dynamique sur la partie gauche 30 % supérieur à l'effort sur la partie droite, pour une charge correspondant à la charge à l'essieu de 32,5 tonnes. Dans ce cas, on a une différence de position verticale des deux roues de 13.6 mm ainsi qu'une augmentation de la longueur AB de seulement 1.2 mm.

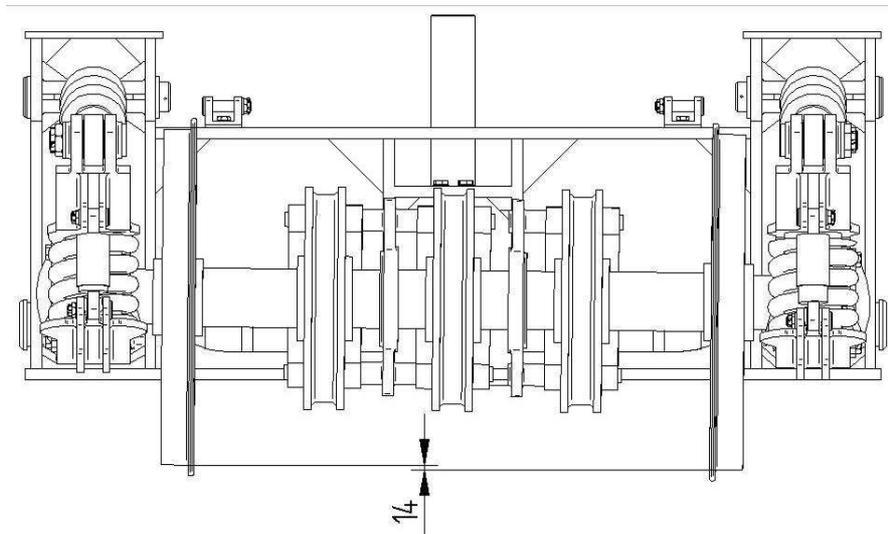


Figure 53 : Position moyenne de l'essieu

Pour réaliser les liaisons essieu / bras, un pré-dimensionnement peu conduire à choisir des roulements à rotules à deux rangées de rouleaux coniques (un à chaque extrémité de l'essieu).

Ces roulements choisis dans la gamme SKF ont les caractéristiques suivantes :

- Diamètre extérieur= 240mm,
- Diamètre intérieur= 160mm,
- Largeur = 80mm
- Charge dynamique=750kN

Les calculs ont été réalisés pour obtenir une durée de vie de 10 millions de kilomètres. Ces roulements sont montés serrés sur l'essieu et glissants sur les bras. L'architecture retenue est décrite sur les figures suivantes :

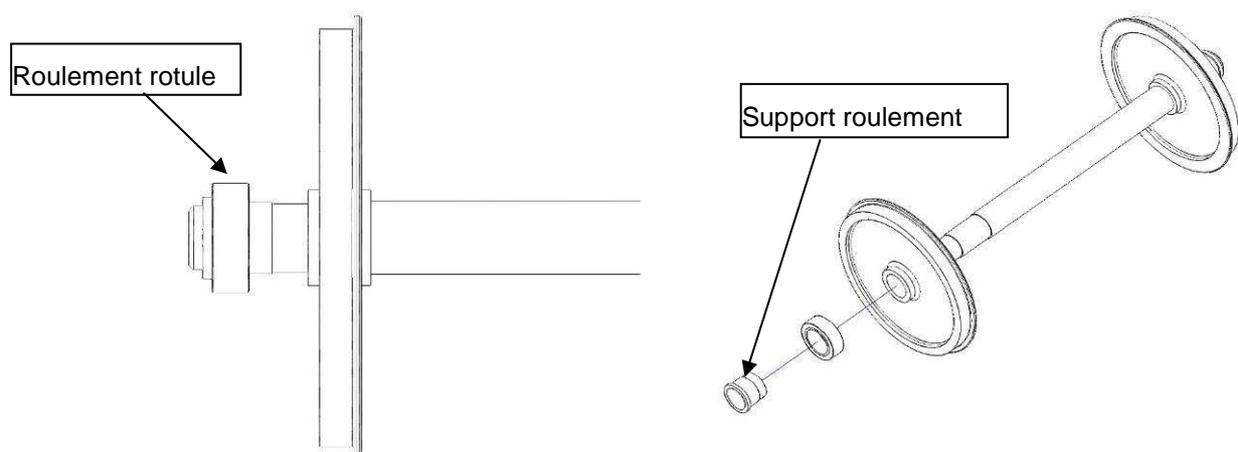


Figure 54 : Essieu représenté sans les dispositifs de freinage ou de transmission

Avant ce montage, l'essieu doit tout d'abord recevoir le dispositif de freinage ou de transmission qui lui est affecté ; les roues (920mm de diamètre) sont ensuite classiquement montées frettées sur l'axe. Les roulements rotules sont eux montés serrés sur des pièces intermédiaires (« support roulement ») qui sont elles-mêmes montées serrées sur l'axe.

#### 8.2.3.4.5 Le système de freinage

Le système de freinage a été pré-dimensionné sans tenir compte des capacités d'autofreinage par la motorisation pour avoir les caractéristiques suivantes :

- Arrêt d'un élément de 65 tonnes en suivant une décélération de  $0.7\text{m/s}^2$ . Cela implique de disposer d'une force de freinage de  $45.5\text{kN}$ . Pour cela, deux essieux sont nécessaires car en raison de l'adhérence limitée, un essieu ne peut fournir une force de freinage supérieure  $48\text{ kN}$ .
- En disposant pour un élément de 65 tonnes de deux essieux freinant sur le bogie externe munis chacun de trois disques, la force à appliquer par plaquette est de  $21,4\text{kN}$ .

L'effort transmis aux plaquettes peut l'être au moyen d'étriers hydrauliques ou pneumatiques :

- La solution hydraulique présente l'avantage de la compacité grâce aux pressions importantes d'utilisation et du plus faible nombre de pièces mobiles (et ainsi du bruit). De plus elle permet éventuellement d'utiliser le circuit hydraulique déjà présent pour alimenter les vérins hydrauliques du système de variation de hauteur.
- La solution pneumatique est plus conventionnelle et déjà éprouvée sur le matériel classique. En cas de panne de la rame, elle permet l'intervention d'une locomotive classique pour assurer le remorquage. Cependant elle impose donc de rajouter à la rame un circuit d'air comprimé classique (pression de  $3.8\text{ bars}$ ). Par contre, la force à appliquer par plaquette se situe dans la zone limite d'utilisation de matériel pneumatique (force maxi de  $24\text{kN}$  avec étriers FreinRail).

L'architecture du système est décrite sur la figure ci-dessous :

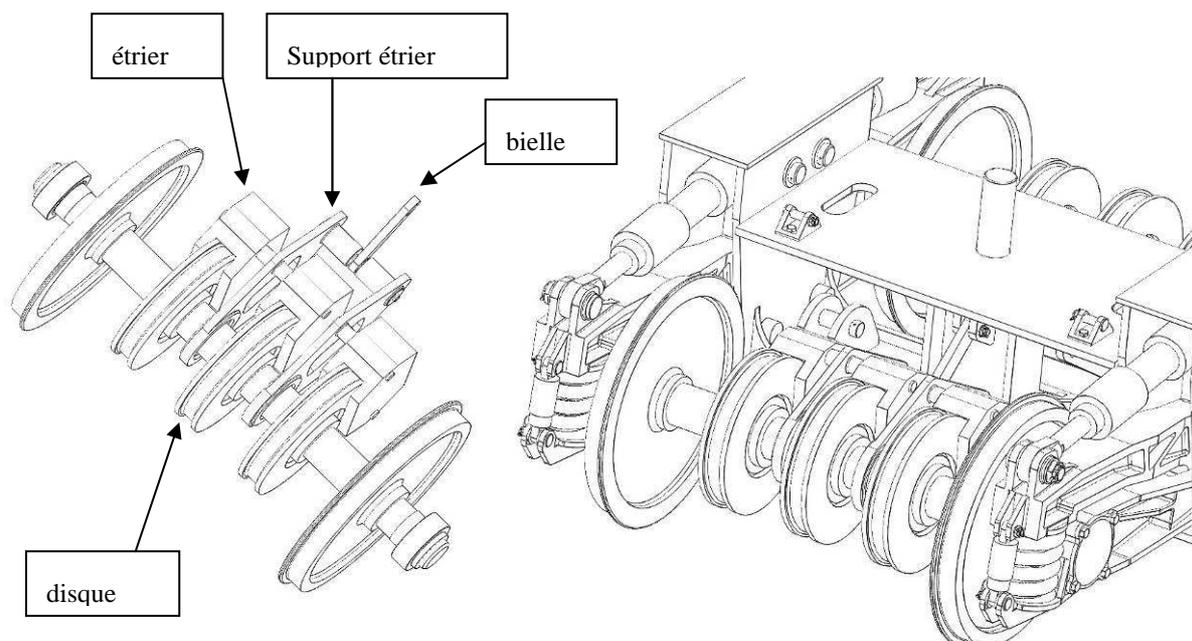
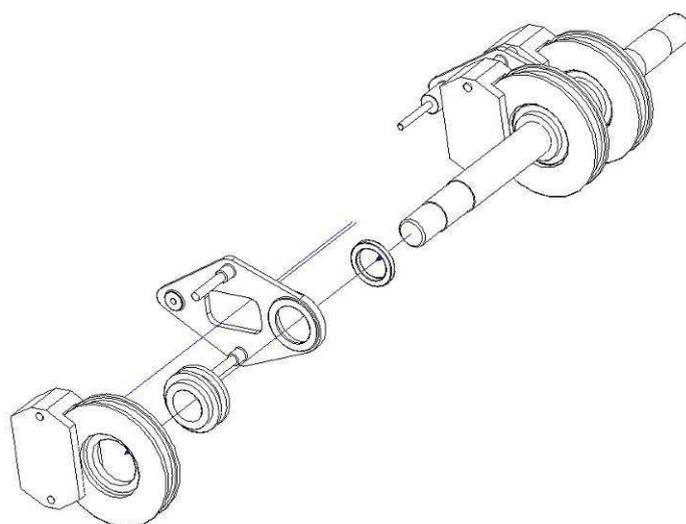


Figure 55 : Architecture du système de freinage

L'illustration ci-dessus représente le système de freinage dans sa configuration hydraulique. Les étriers ne sont pas des modèles existants mais ils permettent de visualiser l'encombrement global de ce type de matériel. Les disques sont des disques ventilés de 610mm. Les trois étriers sont montés sur un dispositif qui est en liaison pivot avec l'essieu. Cette liaison pivot est réalisée avec deux roulements à billes montés serrés sur l'axe de l'essieu. Ce montage permet de n'avoir aucun mouvement parasite entre les étriers et les plaquettes ce qui supprime les jeux fonctionnels sources de bruit. Cet ensemble est également relié au châssis au moyen d'une bielle travaillant en traction / compression suivant le sens de marche du bogie. Cette bielle nécessite, comme celles montées sur les motoréducteurs du bogie central, d'être en liaison rotule à chacune de ses extrémités afin de laisser la suspension fonctionner librement.

Le montage du dispositif est envisagé comme suit :



**Figure 56 : Montage du dispositif de freinage**

L'ensemble de ce dispositif doit être monté avant les roues sur l'axe de l'essieu. Il convient de suivre la procédure suivante :

- Montage serré du support du disque central
- Montage du disque central sur son support et positionnement de l'étrier
- Montage serré des roulements à billes de part et d'autre du disque central
- Mise en position des supports d'étrier sur les roulements à billes (montage glissant)
- Fixation de l'étrier central et des deux supports entre eux grâce à l'axe (pièce jaune)
- Montage serré des supports de disques extrêmes
- Montage des disques extrêmes et de leurs étriers

### 8.2.3.4.6 La motorisation

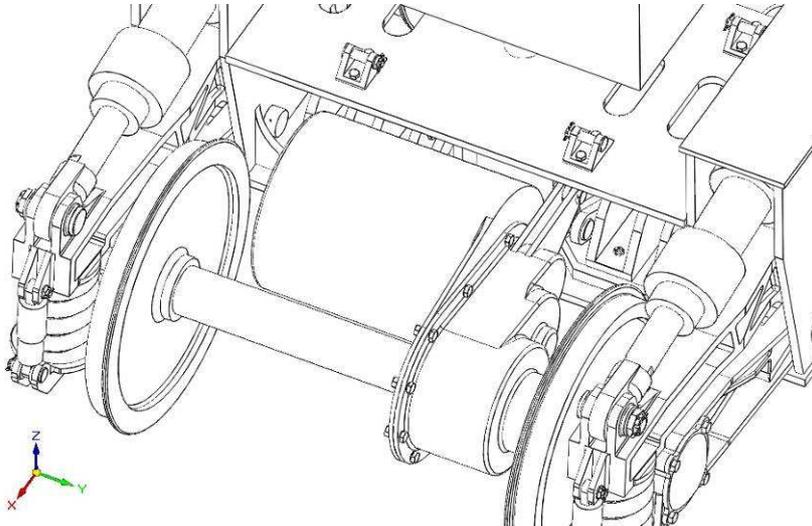


Figure 57 : Motorisation d'un wagon

La motorisation d'un wagon double est assurée par deux moteurs électriques montés en liaison pivot sur les essieux. Les moteurs entraînent chacun un essieu par l'intermédiaire d'un réducteur à engrenages cylindriques et hélicoïdaux. Le moteur étant monté flottant par rapport au châssis, il est relié à celui-ci par l'intermédiaire d'une bielle bi-rotulée à chacune de ses extrémités.

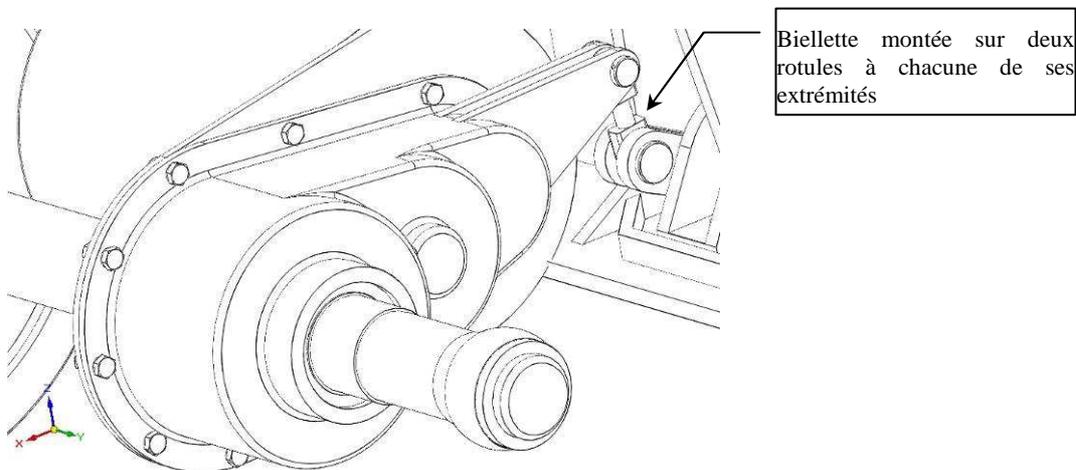


Figure 58 : Bielle du moteur

Le volume disponible pour le placement des moteurs et des réducteurs étant limité et la définition de ces derniers pas arrêtée, il a été décidé de définir un volume enveloppe cylindrique de 590 mm de diamètre et de 725 mm de longueur. Les technologies actuelles et à venir des moteurs électriques permettent de supposer raisonnablement qu'il est possible d'avoir des moteurs de ces dimensions ayant un rapport poids/puissance de 1 kw/kg. Partant d'une puissance que nous prédéfinissons (pour voir la faisabilité du bogie) à 250kW, nous donnera les performances suivantes :

Lorsque le train circule sur une voie parfaitement horizontale, les efforts résistants sont limités aux frottements (pris en compte dans le rendement de la transmission) et à la résistance aérodynamique. Le calcul de cette dernière impose de connaître la géométrie de l'ensemble de la rame ce qui n'est pas possible à ce stade de l'étude. La vitesse maximale ne peut donc être réellement déterminée et les résultats présentés ne tiennent pas compte de la résistance aérodynamique de la rame.

Charge utile	Pente ‰	Vitesse maximale théorique (km/h)	Durée pour atteindre 90 % de la vitesse maximale (s)
50 tonnes / praticable (32,5 tonnes / essieu)	10	120	483
	20	60	128
	35	34	48
44 tonnes / praticable	10	132	544
	20	66	138
	35	37	49
35 tonnes / praticable (25 tonnes / essieu)	10		
	20	77	161
	35	44	57

Dans le cas d'une pente nulle :

Charge utile	Durée pour atteindre 120 km/h	Durée pour atteindre 180 km/h
50 tonnes / praticable (32,5 tonnes / essieu)	174 (secondes)	386
44 tonnes / praticable	159	352
35 tonnes / praticable (25 tonnes / essieu)	136	301

Le moteur électrique n'a pas été choisi dans le cadre de cette étude car il nécessite d'être réalisé sur mesure vu la spécificité des moteurs pour les applications ferroviaires. Le moteur électrique sera prévu pour fonctionner à sa vitesse nominale de 1500tr/min lorsque le train circulera à 72km/h. Ceci afin de disposer d'un couple moteur très important aux faibles vitesses pour bénéficier de la motricité suffisante nécessaire au démarrage et au franchissement des côtes. Pour un diamètre de roue de 920mm, le rapport de réduction nécessaire est ainsi de 3.61. Compte tenu de cette valeur relativement faible, un réducteur à deux étages avec des pignons droits est choisi :

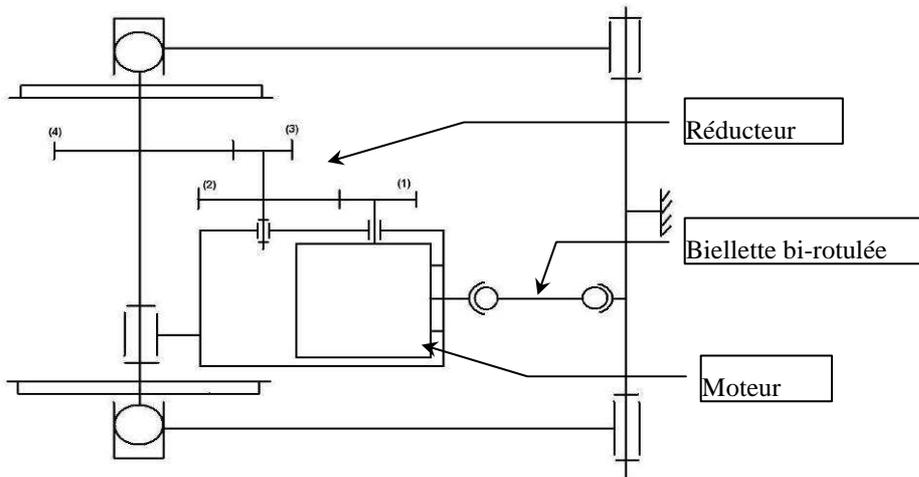


Figure 59 : Schéma cinématique de la transmission de puissance

Les différents pignons du réducteur ont les caractéristiques suivantes :

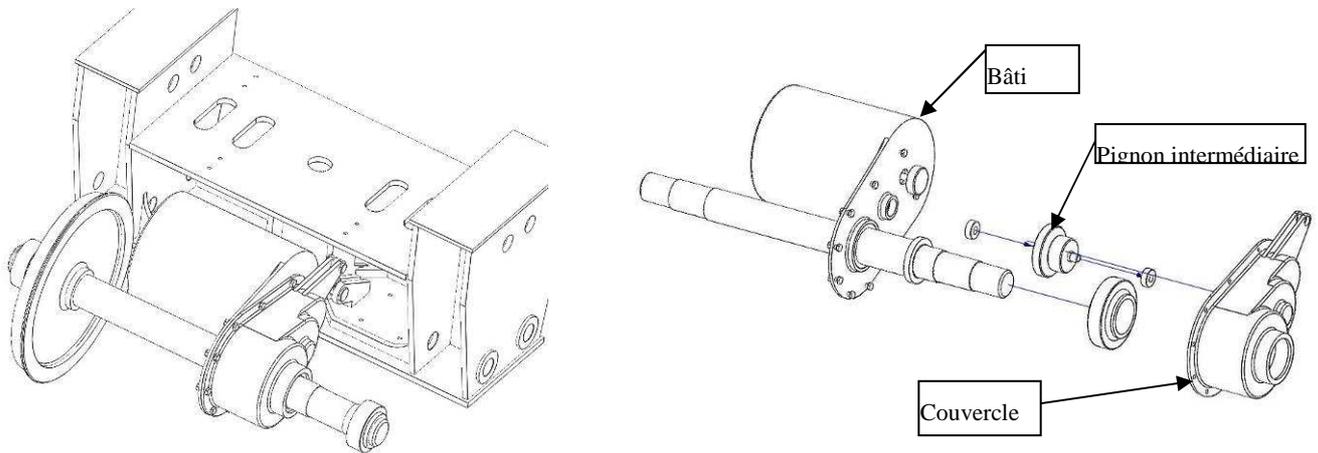
Pignons	1	2	3	4
Module m	10	10	10	10
Nombre de dents	14	26	18	35
Diamètre primitif (mm)	140	260	180	350
Largeur de dent (mm)	60	60	80	80
Effort normal (kN)	57.9	57.9	83.7	83.7
Contrainte maxi	221	240	250	269

La valeur de la contrainte maximale permet de choisir comme matériau pour ces pignons une fonte de type FGS 42. Compte tenu de cette réduction, le moteur devra pouvoir fournir un couple maximal de 4050Nm pour arriver en limite de patinage de l'essieu. Avec une puissance de 250kW, ce couple peut être appliqué jusqu'à une vitesse de 30km/h ce qui est suffisant sachant que l'adhérence maximale est surtout requise pour de faibles vitesses. Le couple nominal de ce moteur (pour une vitesse de 1500tr/min) est en revanche de 1592Nm.

Les caractéristiques du moteur peuvent être synthétisées de la manière suivante :

- Diamètre maximum : 25 mm.
- Longueur maximale : 25 mm.
- Rapport poids/puissance : 1kW/kg.
- Puissance maximale : 250 kW.
- Réducteur : rapport 3.61
- Vitesse nominale du moteur : 1500 tr/min (train à 72 km/h).
- Couple au démarrage : 4050 n.m
- Couple nominal : 1592 N.m

La solution proposée ne concerne qu'une esquisse possible du moteur et du réducteur de vitesse. Le réducteur est formé de deux pièces principales. La première est le bâti sur lequel vient se fixer le moteur en porte-à-faux. Le dispositif de fixation n'a pas été pris en compte pour cette étude car il impose d'avoir déjà choisi un moteur. La deuxième pièce principale est le carter du réducteur qui vient se fixer sur le bâti au moyen d'un assemblage vissé. Ce couvercle possède la liaison avec la bielle de fixation sur le bâti. Il pourrait être judicieux d'utiliser une articulation élastique pour les liaisons rotule de cette bielle afin de minimiser les vibrations transmises par le moteur au châssis.



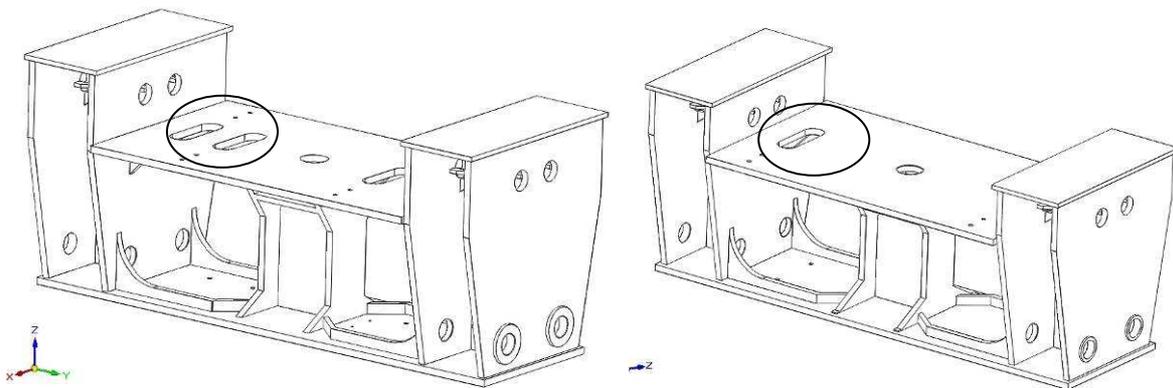
**Figure 60 : Architecture et montage du motoréducteur**

L'arbre de transmission intermédiaire (pignons 2 et 3) du réducteur est maintenu en position entre le bâti et le couvercle du réducteur, il est muni de deux roulements à rouleaux coniques (SKF, D=90, d=40, l=35.25) montés en "X" et venant se placer dans des logements prévus à cet effet. Ces roulements sont montés serrés sur le pignon et glissant sur le bâti et le couvercle. L'ensemble du motoréducteur est placé en liaison pivot par rapport à l'axe de l'essieu. Cette liaison est réalisée avec deux roulements à une rangée de rouleaux coniques (SKF, D=230, d=170, l=32), l'un monté sur le bâti et l'autre sur carter. Ils sont montés en "O" pour avoir une liaison de grande rigidité et montés serrés sur l'axe de l'essieu. Le pignon fixé sur l'axe de l'essieu est également à monter serré. Un dispositif de lubrification des pignons sera à prévoir, par exemple par barbotage avec un bain huile au fond du couvercle. Il faudra ainsi avoir une liaison étanche entre le bâti et le couvercle et prévoir des bouchons de vidange et de remplissage à placer sur le couvercle.

### 8.2.3.4.7 Le châssis

#### 8.2.3.4.7.1 Architecture

Le châssis est la pièce principale du bogie. Il est ici réalisé en tôle mécano-soudée de 20 à 40 mm avec différents renforts. Les deux châssis correspondants respectivement aux deux types de bogies sont quasiment identiques. Les différences se situent uniquement au niveau de certains usinages, visibles sur les deux images ci-dessus. Le bogie externe ne reçoit en effet qu'une seule balancelle alors que le bogie central en reçoit deux.



**Figure 61 : Architecture du châssis bogie motorisé et non motorisé**

*Remarque : Sachant que les chargements des deux types de bogie sont très différents, il conviendra probablement d'optimiser les châssis afin de pouvoir gagner de la masse sur l'ensemble du bogie externe freiné. Les deux châssis seront alors différents l'un de l'autre.*

#### 8.2.3.4.7.2 Dispositif de reprise des efforts horizontaux des balancelles

Lorsque le wagon est mis en mouvement, l'effort de déplacement doit être transmis des roues aux balancelles par l'intermédiaire du châssis. Ceci est réalisé par des liaisons rotules (une par balancelle) situées au centre du bogie ce qui permet de conserver toutes les mobilités possibles des balancelles.

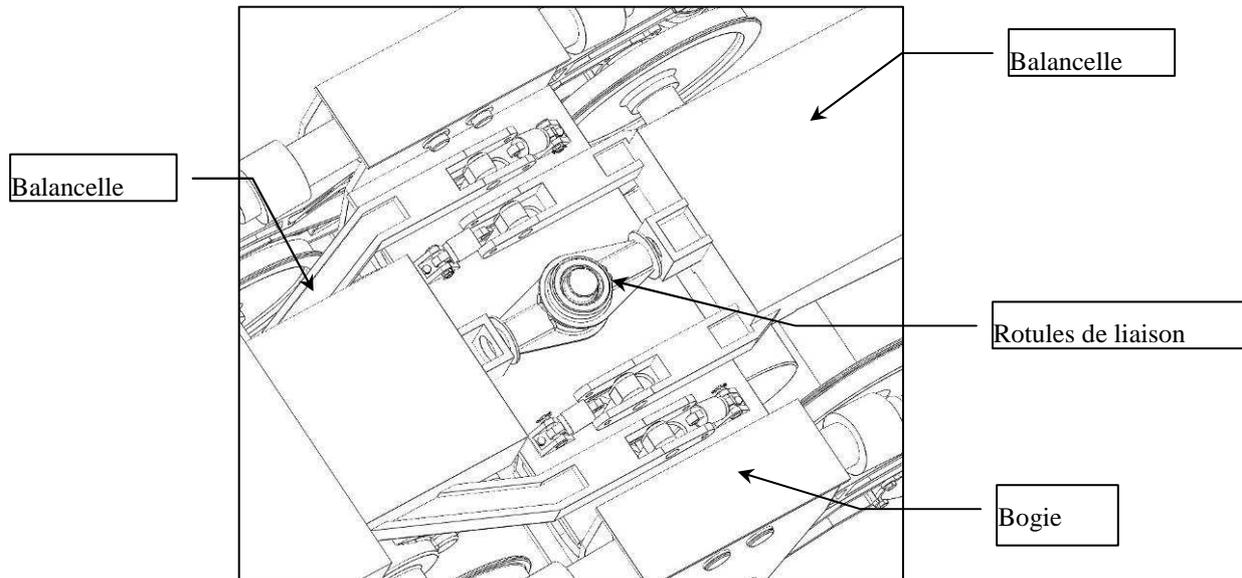


Figure 62 : Dispositif de reprise des efforts horizontaux des balancelles

L'effort que doivent encaisser les rotules sera en fonctionnement normal faible puisque chaque wagon reçoit sa propre motorisation ce qui rend chacun de ces wagons presque indépendants. Cependant, la rame doit pouvoir être remorquée en cas de panne par une locomotive classique et, dans ce cas, l'effort devient dimensionnant. Les rotules sont donc dimensionnées pour résister à un effort de traction de 110 tonnes (valeur utilisée sur les systèmes d'attelage classiques) et de plus, elles sont dimensionnées pour encaisser une accélération latérale de 0.5g du wagon.

### 8.2.3.4.7.3 Amortissement des mouvements de lacet

Comme les wagons ne disposent pas d'attelages classiques avec des tampons, il faut prévoir un dispositif pour amortir les mouvements entre les wagons. Ces solutions ne constituent pour l'instant qu'une maquette d'architecture 3D permettant de visualiser l'encombrement et l'agencement de l'ensemble.

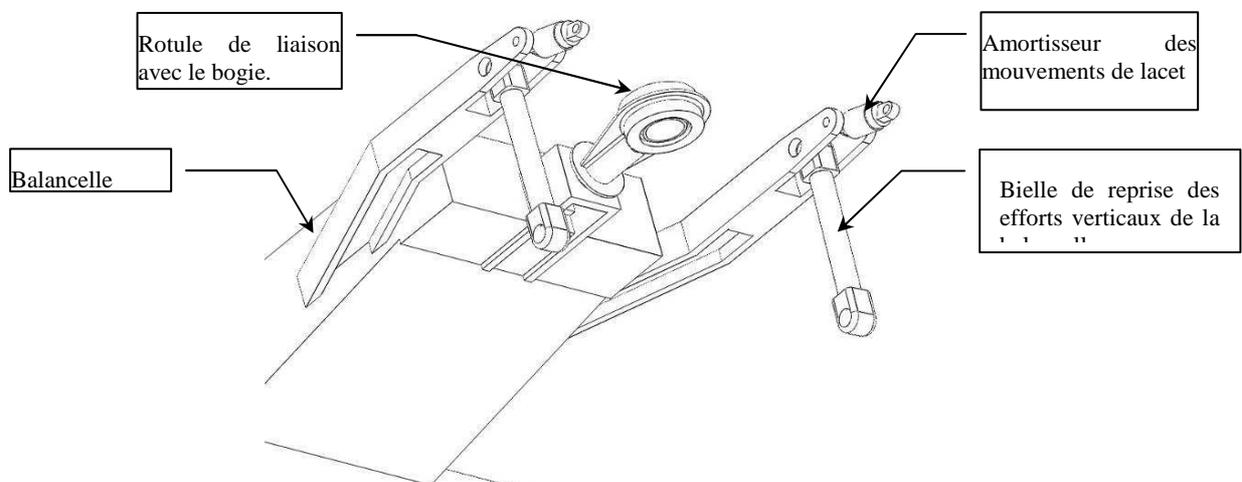


Figure 63 : Balancelle vue de dessous

Les balancelles sont rigidement liées par rapport à leurs bogies par une rotule de liaison. Ces rotules ne servent qu'à lier axialement les balancelles. Le poids de l'ensemble est en effet repris par des bielles verticales de reprise d'effort. Pour limiter et amortir les mouvements de lacet, des amortisseurs sont placés horizontalement entre la balancelle et le châssis ; ils sont présents aux deux extrémités de la balancelle.

Pour amortir les mouvements entre deux wagons doubles successifs, la barre d'attelage de liaison peut comporter un dispositif d'amortissement axial en comportant par exemple un empilement de rondelles Belleville faisant office de ressort. On peut également imaginer dans cette barre d'attelage l'ajout d'amortisseurs ou encore une compensation hydraulique permettant d'ajuster le positionnement des wagons en gare.

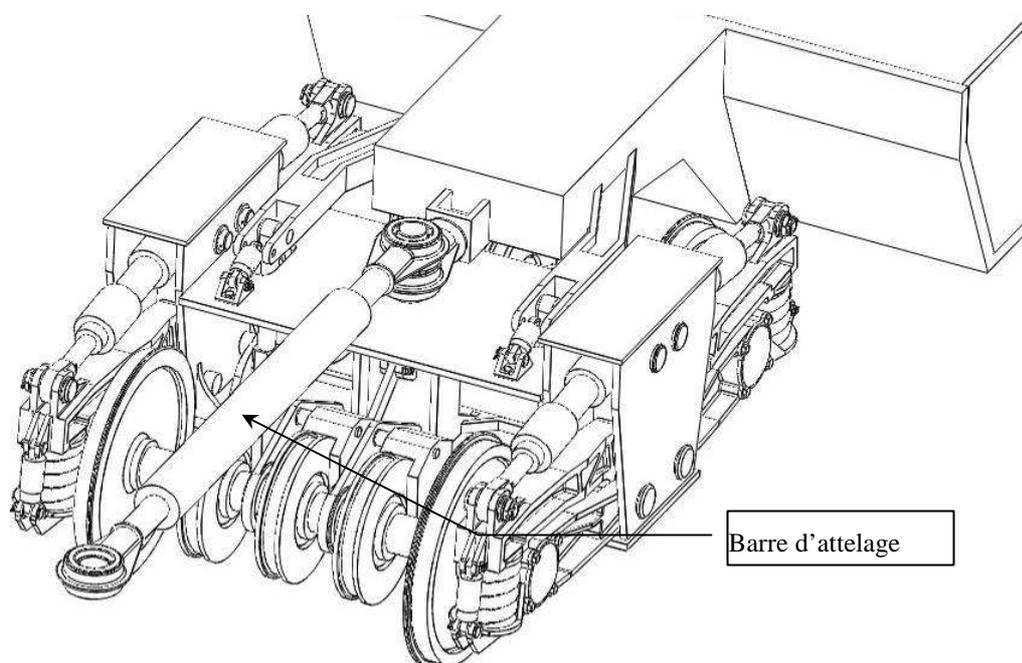


Figure 64 : Barre d'attelage de liaison entre deux bogies freinés.

La charge que représente les marchandises et toute la structure du wagon doit être transmise aux roues par l'intermédiaire du châssis. Il est donc nécessaire d'avoir un système reliant la balancelle au châssis et permettant un mouvement angulaire entre ces deux pièces notamment pour passer dans les courbes (système pendulaire) et pour entamer une pente (mouvement de tangage). La solution de n'utiliser qu'une liaison appui-plan a été écartée en raison du bruit qu'elle provoque potentiellement, à cause des chocs. Le dispositif choisi a été étudié dans sa configuration la plus simple. Il est constitué de bielles prenant appui sur le fond du châssis à une extrémité et étant reliées à des bras propres à la balancelle à l'autre extrémité. Cette disposition permet d'avoir le point d'application de l'effort vertical exactement au milieu du châssis ce qui garantit une répartition égale de la charge entre les deux essieux. Dans une courbe, la balancelle aura tendance à légèrement descendre en raison de l'effet induit de la rotation des bielles. Au maximum, cette descente sera de 10mm pour un rayon de courbure de 70m donc il faut prévoir un jeu vertical pour le montage des rotules afin qu'elles ne viennent jamais en contact avec le châssis.

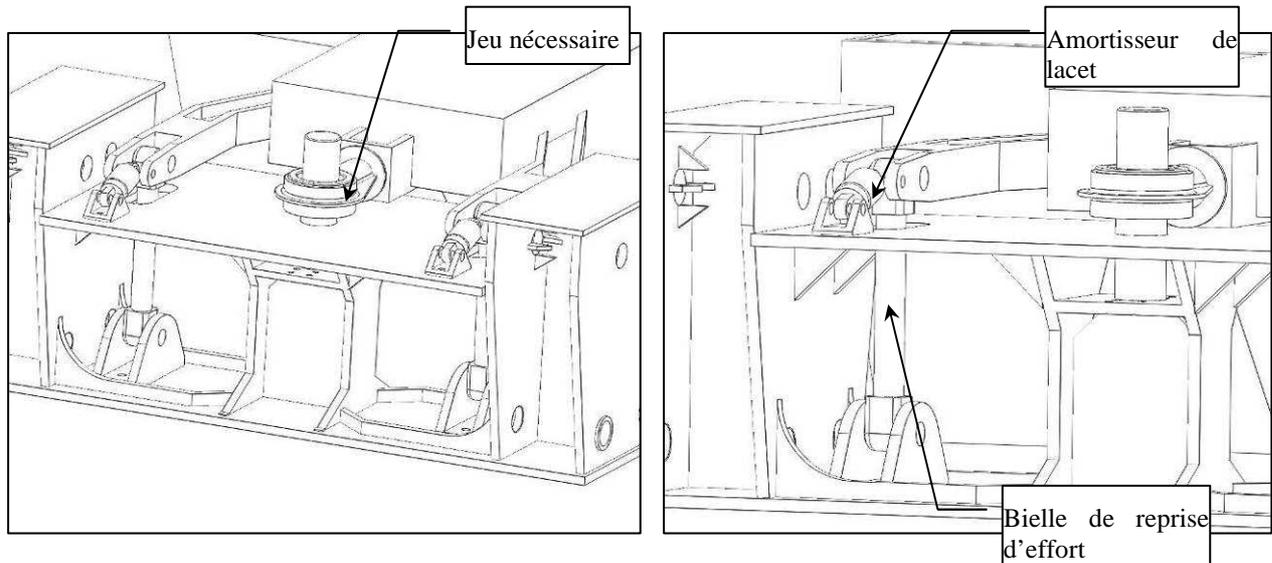


Figure 65 : Bielle de reprise d'efforts

Les bielles et leurs axes ont été dimensionnés de manière à pouvoir supporter une charge utile de 44 tonnes avec une masse de structure de 8 tonnes ainsi que la force créée par une accélération verticale de 0.3g. Il a été pris comme base de calcul de l'excentration latérale de la charge utile, pour ne pas trop contraindre les bielles de l'un des côtés du wagon, la valeur de 45cm ce qui laisse une zone de 90cm autour du milieu du wagon. Dans un modèle plus abouti du bogie, ces bielles pourraient être remplacées par des vérins hydrauliques afin de bénéficier d'un système pendulaire sur le wagon pour passer plus rapidement dans les courbes serrées. Ces vérins seraient alors gérés en fonction de capteurs relevant la vitesse de circulation, le rayon de courbure de la voie, la hauteur du centre de gravité du wagon et enfin l'inclinaison naturelle du ballast.

#### 8.2.3.4.8 Le circuit hydraulique

##### 8.2.3.4.8.1 Général

Le circuit hydraulique principal décrit ici a pour fonction de permettre la montée des bogies en position haute ainsi que la descente en position basse. La difficulté principale à prendre en considération vient du fait que les 12 vérins hydrauliques d'un wagon double doivent être commandés de façon synchronisée dans certains cas et désynchronisée dans d'autres. En effet, pour bien comprendre, il convient de bien préciser que les vérins agissent sur la rotation des bras supérieurs qui eux agissent sur les ressorts de suspensions. En conséquence, une position donnée des bras supérieurs ne fixe pas une position invariable des bras inférieurs : ces positions sont fonction de la compression des ressorts donc du chargement embarqué sur les balancelles ainsi que des effets dynamiques de la suspension pendant le déplacement de la rame. Le tableau ci-dessous montre que par exemple, en statique, il y a une différence de 65 mm sur la compression du ressort entre un bogie sans chargement et un bogie à charge maximale :

	Flèche ressort (mm)	Longueur ressort (mm)	Flèche essieu (mm)
F ressort mini statique (balancelle vide)	20	346	15
F ressort mini dynamique ( $\alpha_d= 1.3$ )	25	341	19
F ressort maxi statique	85	281	63
F ressort maxi dynamique ( $\alpha_d= 1.3$ )	110	256	82
F ressort pour semi-remorque vide de 7 tonnes	29	337	21

- Les balancelles étant reliées aux bogies au milieu de ceux-ci, les deux ressorts du côté droit et du côté gauche subissent le même effort de compression.
- Les balancelles étant reliées aux bogies au milieu de ceux-ci, les deux ressorts du côté droit ne subissent pas forcément le même effort de compression que ceux du côté gauche. En effet, le centre de gravité de la charge n'étant pas maîtrisé, celui-ci ne se trouve pas forcément sur le plan de symétrie longitudinal de la rame.
- Les phases de montée et descente se produisant pendant le déplacement de la rame, il convient de tenir compte de la dynamique de celle-ci au niveau de la suspension.
- Lors des opérations de déchargement / chargement en gare, la garde au rail évolue. Ces opérations se font de plus en position basse.

La solution hydraulique proposée utilise des moteur/pompes de synchronisation de vérins. Cette solution a le mérite d'être simple mais nécessite que les ratios de débit partagés entre les bogies correspondent au débit effectivement demandé par les vérins. En effet, on a vu que les bogies externes freinés sont beaucoup moins chargés que le bogie motorisé central et qu'il est donc possible d'utiliser des vérins différents en fonction du type de bogie. Cela impose alors des consommations d'huile différentes, le bogie central consommera plus d'huile qu'un bogie externe. Dans ce cas, il convient de vérifier que le système de synchronisation est bien capable de gérer cette répartition. Ceci n'est à priori pas évident car les fabricants ne proposent qu'un nombre limité de valeurs de répartition de débit. On supposera donc que tous les bogies sont équipés des mêmes vérins.

Le circuit hydraulique doit, en tenant compte des contraintes précédentes, permettre de :

- 1) En gare, après une opération de déchargement / chargement, passer de la position basse à la position haute à l'arrêt. L'avantage de faire cette opération à l'arrêt est de pouvoir s'affranchir des effets dynamiques.
- 2) Après l'arrivée en gare et avant l'opération de déchargement / chargement, passer de la position haute à la position basse à l'arrêt. L'avantage de faire cette opération à l'arrêt est de pouvoir s'affranchir des effets dynamiques.
- 3) En roulant, passer de la position haute à la position basse à l'arrivée dans un tunnel.
- 4) En roulant, passer de la position basse à la position haute à la sortie d'un tunnel.

### 8.2.3.4.8.2 Description des quatre opérations

- 1) En gare, après l'opération de déchargement / chargement, les charges sur les ressorts étant modifiées et chacune différentes, chaque bras inférieur oscillant se trouve avec une position angulaire différente par rapport au châssis. L'assiette du châssis est donc aléatoire. Il convient donc d'alimenter en synchronisant chacun des 12 vérins hydrauliques afin de lever les trois bogies. Par contre, il est nécessaire de pouvoir arrêter l'alimentation de chaque vérin indépendamment des autres afin que chaque bras inférieur oscillant puisse avoir la même position finale et donc que le bogie soit bien à l'horizontal. Dans ce cas, la position haute est atteinte avec des positions finales différentes pour chaque vérin.

Actionneurs nécessaires	12 vérins en synchronisation mais avec arrêts indépendants
Capteur de position nécessaire	Un codeur angulaire par bras inférieur oscillant pour détecter la position haute.

- 2) Cette action est l'opération inverse de la précédente. Néanmoins, les positions de départ des vérins (position haute) sont cette fois ci correctes puisque l'assiette à été équilibrée lors du départ en gare précédente. Il suffit ici de doser un même volume d'huile dans les 12 vérins pour opérer à la descente. Le contrôle de la position basse peut se faire également par les codeurs angulaires des bras inférieurs. L'évolution se faisant dans ce cas en charge motrice. Cela signifie que l'effort exercé sur la tige des vérins est de même sens que celui du déplacement de la tige. En conséquence il convient de contrôler et de freiner le mouvement de descente par un autre composant hydraulique que la pompe puisque celle-ci ne peut le faire dans cette configuration. Cela peut être pris en charge par une soupape d'équilibrage à pilotage amont, solution classiquement employé en hydraulique.

Actionneurs nécessaires	12 vérins en synchronisation mais avec arrêts indépendants
Capteur de position nécessaire	Un codeur angulaire par bras inférieur oscillant pour détecter la position basse.
Prise en charge de l'évolution en charge motrice	Soupape d'équilibrage à pilotage amont

- 3) Le passage de la position haute à la position basse en roulant peut être fait en commandant et en synchronisation pour les 12 vérins le dosage d'un même volume d'huile dans chaque vérin. L'intérêt du dosage d'un même volume d'huile permet de s'affranchir des actions dynamiques qui s'exercent sur les bogies et qui perturberait fortement la détection de la position basse.

Actionneurs nécessaires	12 vérins en synchronisation et avec indépendants
Capteurs de positions nécessaires	Un capteur de position intégré au vérin ou un codeur angulaire par bras supérieur permettant la mesure de la course du vérin pour avoir le bon dosage d'huile.
	Un codeur angulaire par bras inférieur oscillant pour détecter une éventuelle sur-course (position basse trop basse).
Prise en charge de l'évolution en charge motrice	Soupape d'équilibrage à pilotage amont

- 4) Cette action est similaire à l'action 3 mais en évolution en charge résistante et non motrice.

On peut donc conclure qu'à chaque arrêt en gare, on opérera à un nouveau calage de la configuration en position haute du bogie. Il conviendra dans une étude ultérieure d'évaluer la robustesse de cette solution ; avec en particulier l'examen de toute dérive possible des positions haute et basse à la suite de manœuvres répétées entre deux gares donc sans nouvelle prise d'origine.

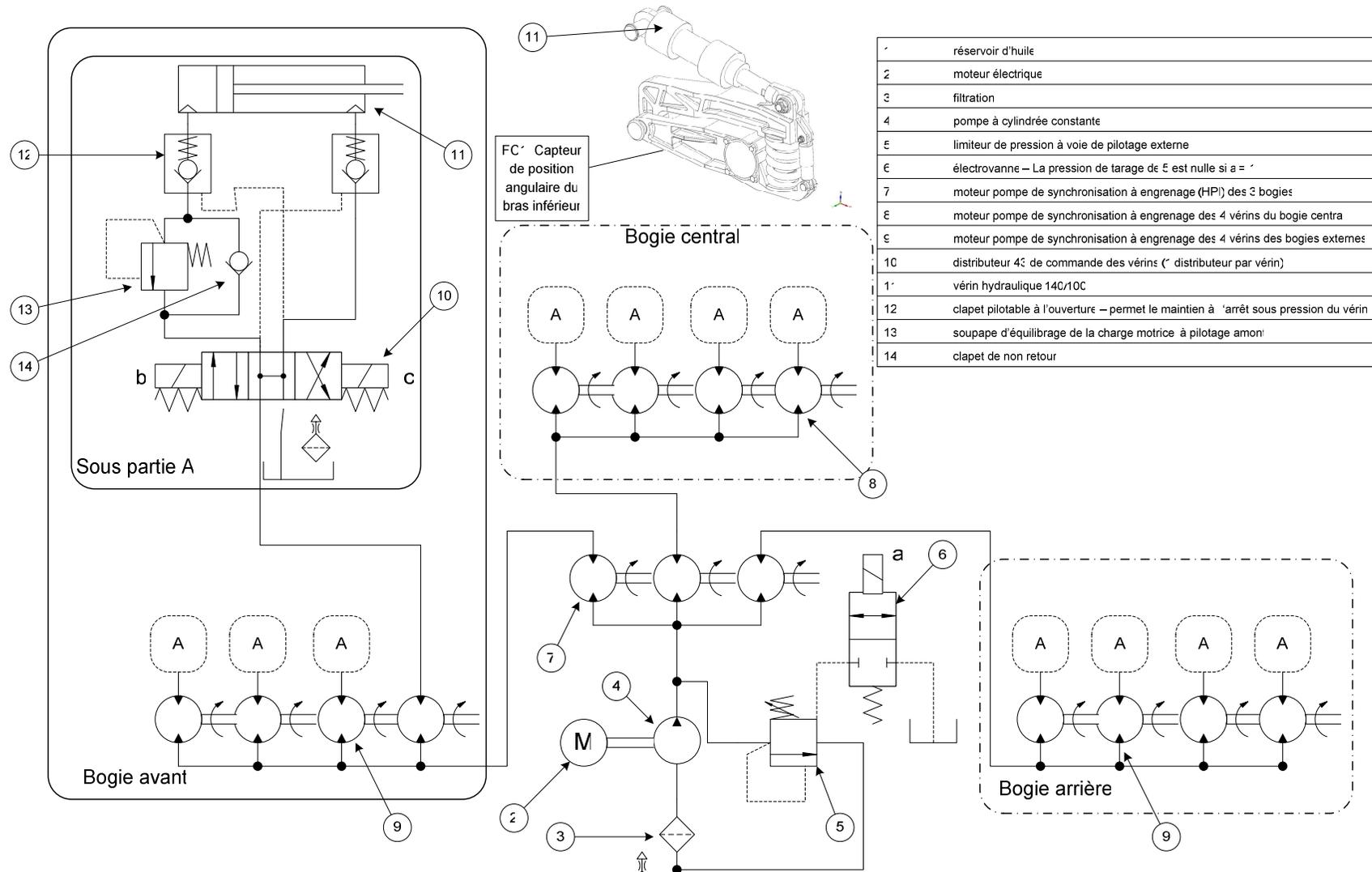
Le circuit hydraulique a pour fonction d'alimenter les vérins du système de variation de hauteur. Ce circuit est le même pour tout un wagon double. Il est composé d'une centrale hydraulique permettant d'alimenter les 4 vérins des 3 bogies (12 vérins en tout). Cette centrale doit être équipée d'une pompe actionnée par un moteur électrique et doit fournir un débit de 65 litres/min pour permettre le passage de la position basse à la position haute en 20 secondes environ. Pour réaliser cette manœuvre, 22 litres de fluides sont nécessaires.

Pour les opérations de descente, les vérins choisis étant des vérins différentiels (i.e. que le volume à course équivalente de la chambre annulaire est deux fois plus petit que celui de la chambre pleine) les consommations d'huile et la durée de manœuvre sont diminuées de moitié. Chaque application est un cas particulier et l'aspect thermique est important, mais on peut cependant retenir en première approximation un volume de réservoir de 2 à 3 fois le débit / minute de la pompe, soit 130 l à 195 l.

#### 8.2.3.4.8.3 Caractéristiques principales

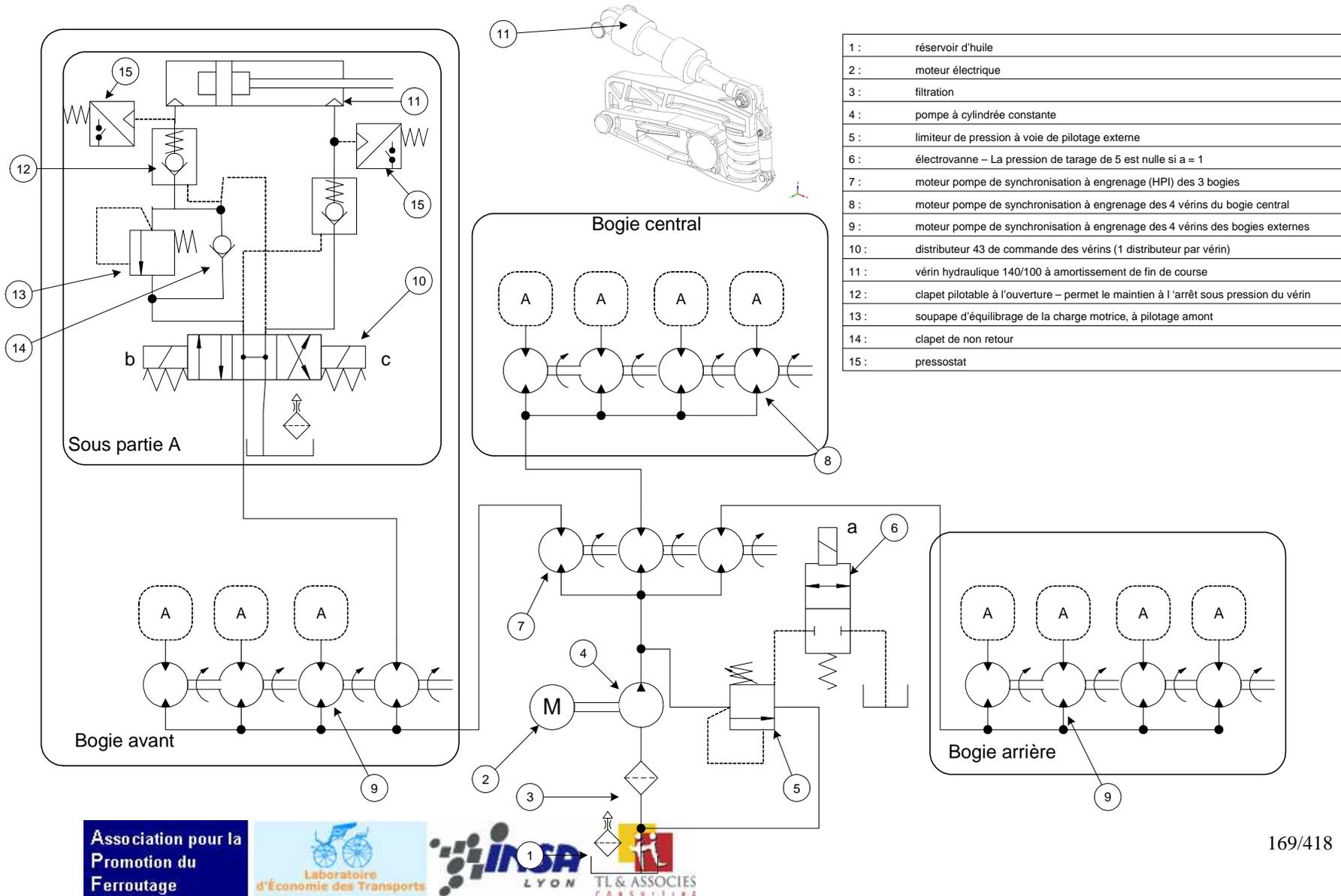
- Pression maximale d'utilisation : 330 bars.
- Débit maximal de la pompe : 65 litres/min.
- Puissance maximale consommée : 12 Kw.
- Puissance max. pour une rame : 580 Kw.
- Vérins : 12 vérins différentiels 140/100.
- Volume réservoir :<sup>2</sup> 130 à 195 litres.
- Dure de manœuvre : 20 s de la position basse à la position haute.

Une première approche simplifiée du circuit est présentée ci-après :



1	réservoir d'huile
2	moteur électrique
3	filtration
4	pompe à cylindrée constante
5	limiteur de pression à voie de pilotage externe
6	électrovanne – La pression de tarage de 5 est nulle si a = 1
7	moteur pompe de synchronisation à engrenage (HPI) des 3 bogies
8	moteur pompe de synchronisation à engrenage des 4 vérins du bogie centra
9	moteur pompe de synchronisation à engrenage des 4 vérins des bogies externes
10	distributeur 4 <sup>es</sup> de commande des vérins (= distributeur par vérin)
11	vérin hydraulique 140/100
12	clapet pilotable à l'ouverture – permet le maintien à l'arrêt sous pression du vérin
13	soupape d'équilibrage de la charge motrice à pilotage amon
14	clapet de non retour

Les sous-parties A représentent les parties du circuit concernant la commande et le contrôle de chacun des 12 vérins hydrauliques. On retrouve donc ces sous-parties à 12 exemplaires dans le circuit. La pompe 4, entraînée en rotation par le moteur 2, fournit donc un débit d'huile dirigé vers les 12 vérins. Le limiteur de pression 5 est un composant permettant de protéger le circuit contre toute surpression supérieure à la pression de tarage de ce composant. En fonctionnement normal, ce composant est normalement non actif donc fermé. L'électrovanne 6 permet, lorsque son électro-aimant est actif, de mettre au réservoir donc à la pression atmosphérique le limiteur de pression 5. Donc, si  $a = 1$  la pression de tarage du limiteur 5 est nulle (si on néglige en première approximation les pertes de charge régulières et singulières dans le circuit. Ce dispositif permet de décharger la pompe au bac à pression nulle pendant les phases intermédiaires entre deux manœuvres et ainsi de limiter les pertes énergétiques. Le débit de la pompe est ensuite partagé en trois débits égaux grâce aux trois moteurs / pompes de synchronisation de débit. Ceci garanti ainsi un même débit d'alimentation des 3 bogies même si les pressions d'évolution dans chacun des trois sous-circuits correspondants sont très différentes. Cette partie du circuit hydraulique se trouvera physiquement placée sur le bogie central. Les parties suivantes sont au contraire placées sur les bogies correspondants. Après avoir été partagé en 3, le débit est de nouveau partagé en 4 afin de garantir la même vitesse de déplacement des vérins de bogie. Ceci est fait grâce aux moteur / pompes 8 et 9. Les distributeurs 10 (1 par vérin) commandent le sens de marche des vérins, donc la montée ou la descente du bogie. L'action sur b engendre la montée des bogies. L'action sur c engendre la descente des bogies. Les clapets 12 permettent de maintenir à l'arrêt les vérins sous pression (à cause du poids de l'ensemble) tout en étant étanche. La soupape d'équilibrage 13 permet le contrôle du mouvement de descente du bogie. Le clapet 14 permet de shunter la soupape 13 quand la sortie de tige est commandée, c'est à dire la montée du bogie. L'ensemble des distributeurs hydrauliques est ici à commande électrique. La compensation automatique de charge est faite grâce aux capteurs de position FC1 qu'il faut installer sur chaque bras inférieur de suspension. Ces capteurs permettront la commande des distributeurs respectifs. Ainsi, lorsque par exemple on va passer de la position basse à la position haute, chaque vérin sera désactivé de la pompe dès que le bras inférieur correspondant atteindra la position haute désirée. Le débit d'alimentation du vérin est alors dirigé au réservoir. Si les capteurs FC1 sont en fait des capteurs de position, il faut alors sur chaque bras inférieur un capteur de détection de la position haute et un capteur de détection de la position basse. Cette solution simple à alors l'inconvénient de ne pas pouvoir tenir compte des effets dynamiques sur la suspension quand les manœuvres se produisent en roulant. Si les capteurs FC1 sont en fait des codeurs de position, il est alors possible de connaître en temps réel la position angulaire de chaque bras inférieur. Il sera alors possible, par l'intermédiaire des traitements des signaux des capteurs, de compenser les effets dynamiques sur les suspensions. Une version simplifiée peut éventuellement être envisagée. Il s'agit alors de supprimer le système de compensation des variations de charge. Cette solution va donc de pair avec l'utilisation de ressorts de suspensions bien plus raides. Les positions hautes et basses des bogies sont alors définies par construction, c'est-à-dire par butées mécaniques qui peuvent se situer soit au niveau du vérin (le piston du vérin touche alors le fond du corps de vérin), soit au niveau du bras inférieur. La désactivation d'un vérin une fois la position haute ou basse atteinte pourra se faire par l'intermédiaire de la détection d'une surpression dans la chambre du vérin grâce à un pressostat 15 permettant la désactivation des actions a ou b du distributeur 10 et donc l'arrêt de l'évolution du vérin.



## 8.2.4 LA GARE R-SHIFT-R

### 8.2.4.1 Structure générale

Une gare est constituée d'unités modulaires, dont le nombre est fixé suivant le niveau d'utilisation (jusqu'à égalité en nombre avec les wagons d'une rame) et appelés « modules ». Ces modules sont organisés de façon à permettre la réalisation de l'ensemble des opérations nécessaires au transbordement d'une charge routière sur une rame ferroviaire (éventuellement, sur un même quai) quel que soit le sens de roulage des rames. Aux rames de 46 wagons pourront donc correspondre 46 modules. L'organisation du travail nécessite pour fonctionner des séquences manuelles et automatiques. Dans sa configuration la plus simple, une gare s'édifie autour d'un wagon, d'un module et de deux sens de déplacement. Suivant le niveau de l'activité de ces gares, certaines fonctionnalités, de mêmes natures, pourront être partagées entre plusieurs modules, d'autres ne pas être installées. Par exemple les gares extrémités disposeront systématiquement d'un seul quai qui assurera les deux sens de déplacement.

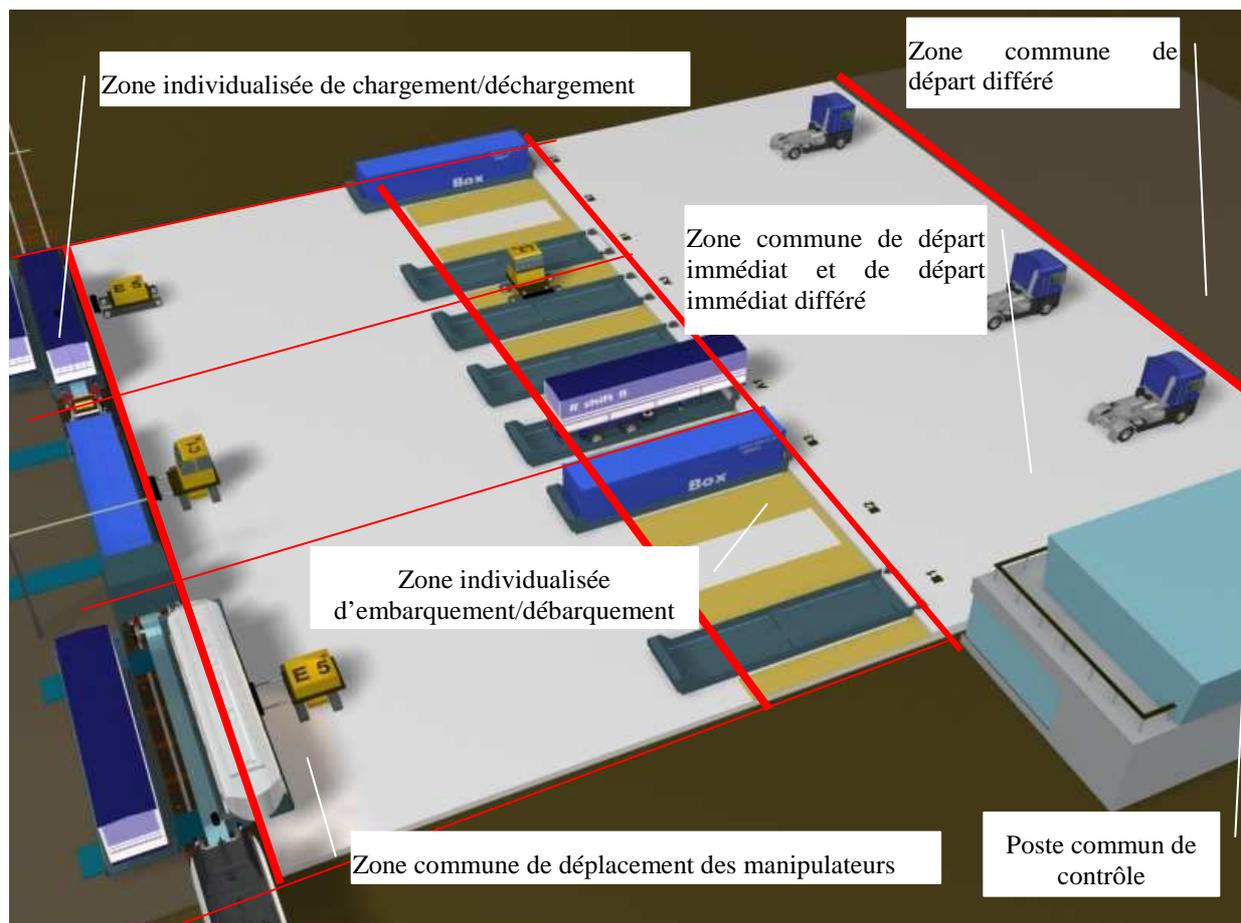


Figure 66 : Module de gare R-shift-R

La vue ci-dessus, représentant trois modules, schématise l'ensemble des différentes zones nécessaires au fonctionnement d'une gare dédiée R-shift-R. Chaque module d'une gare R-shift-R se décompose en trois zones actives, qui se combine individuellement à deux zones secondaires communes à la gare qui sont elles assujetties à un passage obligé au poste de contrôle. Pour partie ces zones secondaires peuvent se situer en dehors de la gare elle-même.

Les zones de travail sont strictement séparées les unes des autres et elles répondent chacune à une seule et unique fonctionnalité. Cette organisation se développe suivant deux axes :

- Transversalement par le découpage de la gare en « modules » répétitifs,
- Longitudinalement par un découplage des activités en fonctions élémentaires, homogènes et communes sur des « zones ».

Ce découpage et découplage permettent :

- Une sécurité accrue pour les personnels,
- L'intégration d'automatismes pour certaines zones sans contraintes particulières sur les fonctionnalités des zones avoisinantes,
- Une gestion autonome de chaque zone.

Cette organisation permet, éventuellement, l'affectation de l'activité entre plusieurs acteurs, concessionnaires ou intervenants avec une définition précise des responsabilités. Ces affectations distinctes sont rendues envisageables par la seule présence du « praticable » qui introduit une répartition du travail en zones différenciées et homogènes aptes à assurer une bonne gestion des infrastructures.

#### 8.2.4.2 Zone routière

##### 8.2.4.2.1 Poste de contrôle

Les contraintes ferroviaires, entre autre le gabarit de l'infrastructure, imposent de mettre en place un ensemble de contrôle dimensionnel des conditionnements ; ces contrôles seront accompagnés d'un contrôle du poids de la charge mais également de la définition de son centre de gravité. En effet les contraintes qu'impose la charge de 25 tonnes à l'essieu implique une répartition connue de la charge résultante sur chaque bogie central. L'affectation du ticket d'embarquement devra tenir compte de ce paramètre dans l'attribution du numéro de chargement. En sortie du poste de contrôle les conditionnements sont orientés vers l'une des zones d'attentes.

##### 8.2.4.2.2 Zones communes d'attentes

###### 8.2.4.2.2.1 Organisation

L'embarquement peut recouvrir trois configurations :

- Le « départ différé/différé » pour lequel le chauffeur laisse sa charge au gestionnaire d'un parc éloigné pour un départ -par exemple- en heure creuse ou sans réservation.
- Le « départ différé immédiat » pour lequel le chauffeur laisse sa charge dans la zone d'embarquement/débarquement face au praticable qui lui est affecté et quitte la gare ; ce qui revient à dire que la mise en place de la charge sur le praticable est laissée à l'initiative du concessionnaire de l'embarquement.
- Le « départ immédiat » pour lequel le chauffeur met son conditionnement sur le praticable (dans ce cas obligatoirement une remorque), puis va éventuellement embarquer son tracteur. On rappelle que chaque module peut stocker sur son aire de

départ immédiat jusqu'à 3 conditionnements auquel s'ajoutent les trois autres présents sur les praticables (ce qui crée une autonomie par module de six cycles).

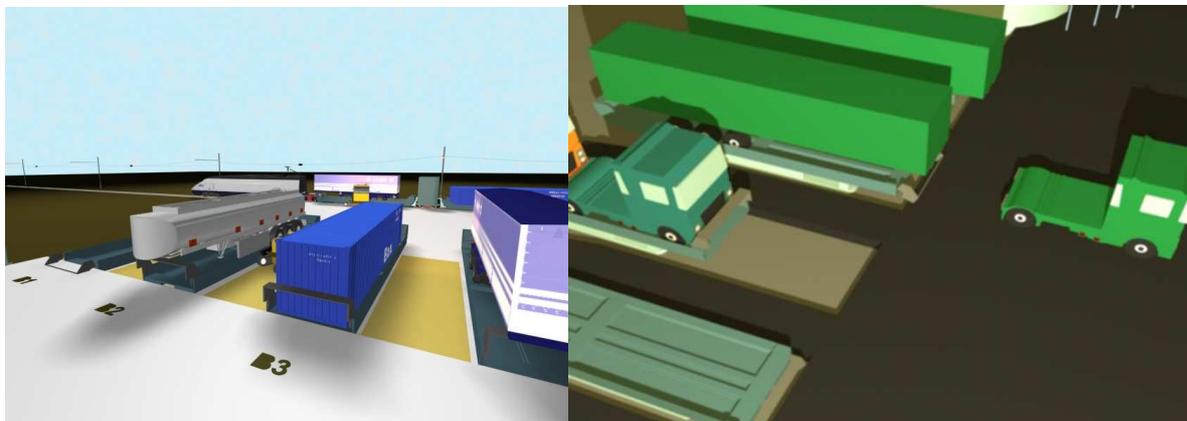


Figure 67 : Zones d'attente

#### 8.2.4.2.2 Zone de départ différé/différé

Cette partie de l'installation communique en entrée avec le poste de contrôle et en sortie avec la zone de départ immédiat. Elle n'est pas dissociée pour son fonctionnement, comme son implantation, du reste de la gare. Sa fonction est de permettre la dépose et le stockage des conditionnements entrants ou sortants indépendamment du cycle des trains. Ils sont déposés ou repris par les chauffeurs affectés aux désertes locales. Dans cette zone les conditions d'embarquement sont laissées aux gestionnaires de la gare.

#### 8.2.4.2.3 Zone commune de départ immédiat et immédiat différé

Ces zones réparties, le long du quai, nécessitent des moyens indispensables à l'enlèvement de la charge arrivante et/ou la mise en place de la charge partante sur un praticable (la charge pouvant être une remorque ou un conteneur). Suivant le type de charge mais également suivant le type de départ retenu (départ immédiat ou départ immédiat différé) l'intervenant au droit du praticable change :

- Pour une arrivée ou un départ immédiat on peut considérer que le chauffeur du camion prend ou met sa remorque du/sur le praticable en venant ou en allant et (dans la mesure où il débarque/ embarque) enlever ou mettre son tracteur sur le praticable qui lui est affecté.
- Dans le cas contraire (départ immédiat différé) cette opération est réalisée par le personnel de gare avec des moyens propres à la gare. *Le nombre de personnes et le type de matériels qu'il convient d'affecter à ces tâches sont détaillés dans la suite.*

### 8.2.4.3 Zone de transfert route rail

#### 8.2.4.3.1 Gare de forte utilisation

Une gare de forte utilisation (un train toutes les 15/30 minutes) se définit par le seul rythme des rames et indépendamment du nombre de wagons à décharger/charger. Elle nécessite la présence, face à chaque wagon, de 3 positions d'embarquement/débarquement. Elles garantissent la fin des opérations d'embarquement et chargement, avant l'arrivée de la rame. Cette contrainte justifie l'emploi dans chaque module d'un moyen de transfert qui lui est propre. La rotation des rames ou leur temps d'immobilisation étant les éléments déterminant de la rentabilité, un train R-shift-R pour arriver et partir à l'heure, n'attend pas un chargement. Le contrôle de fin de travail sera nécessaire avant d'autoriser la rame à rentrer en gare.

#### 8.2.4.3.2 Gare de faible utilisation

Dans le cas d'une gare de faible utilisation (un train toutes les 45/60 minutes, voire 90 minutes), les fonctions peuvent être regroupées, un module d'embarquement/débarquement pouvant alimenter plusieurs modules de chargement/ déchargement jusqu'au seuil critique des 45 minutes.

Cependant un incident peut se produire (et se produira) sur un quai pendant les opérations de chargement/déchargement, qui l'immobilisera pour une durée plus ou moins longue. Dans ce cas les rames suivantes court-circuitent la gare. Le gestionnaire organise en fonction du temps prévisionnel d'indisponibilité pour atteindre la gare suivante le recyclage des conditionnements, puis intervient sur le/les trains suivants pour un déchargement à l'arrêt en amont ou aval de la destination première des conditionnements devant sortir dans la gare en défaut.

#### 8.2.4.3.3 Définition du nombre de modules actifs

Les facteurs qui interviennent dans l'appréciation du nombre de modules actifs sont, d'une part, le fait que dans les gares tous les wagons ne soient pas chargés/déchargés (facteur nombre) et d'autre part que le rythme des sillons soit inférieur ou supérieur au temps élémentaire d'embarquement/ débarquement (facteur rythme)

Le croisement de ces deux facteurs permet d'optimiser le nombre de postes d'embarquement /débarquement sur un nombre limité de modules (facteur rythme), qui eux-mêmes sont limités à la partie active de la gare (facteur nombre). La partie active peut varier sur une même liaison d'une gare à une autre en fonction des entrées/sorties qui leurs sont propres. Mais également d'un sillon à un autre.

Suivant les cas l'automanipulateur devient ou peut devenir un manipulateur commandé manuellement sous les ordres d'un opérateur. Leur nombre est défini par une étude précise de son plan de charge basée sur une analyse des temps nécessaires à l'exécution des opérations ; les déplacements dans le cas manuel sont orientés par un affichage visuel précis.

#### 8.2.4.4 Module « découpage »

Chaque module est constitué de trois parties distinctes qui correspondent chacune à une fonctionnalité bien précise. Dans la première partie l'activité est liée au rythme des arrivées des conditionnements, dans les deux autres au rythme de passage des convois.

##### 8.2.4.4.1 Partie débarquement/embarquement

Cette partie se développe le long de la zone de départ immédiat dans un ordre de rangement perpendiculaire au quai. Elle n'est accessible qu'aux personnels formés à la réalisation des tâches qu'elle induit. En retenant, comme valeur, les 45 minutes actuellement nécessaires pour réaliser l'ensemble des opérations (par charge débarquée/embarquée), les besoins pour répondre à la demande, et face à chaque wagon, correspondent à :

- 3 positions de débarquement/embarquement, pour un rythme de passage des rames de 15 minutes
- 2 positions de débarquement/embarquement pour un rythme de passage des rames de, 30 minutes
- 1 position de débarquement/embarquement, pour un rythme de passage des rames de 45 minutes
- 0,75 position de débarquement/embarquement, pour un rythme de passage des rames de 60 minutes
- 0,5 position de débarquement/embarquement, pour un rythme de passage des rames de 90 minutes.

A partir de 30 minutes certaines fonctions peuvent être regroupées. Cette organisation permet, dans la fourchette du rythme de passage retenue de 15/90 minutes, de disposer, en 24 heures avec des rames de 46 wagons, d'une capacité de transbordement théorique par quai variant de :  $24 \cdot 60 / 15 \cdot 46 \cdot 2 = 8832$  à  $24 \cdot 60 / 90 \cdot 46 \cdot 2 = 1472$  contenants.

La zone, d'embarquement/débarquement, adaptera son développement, le long du quai, simultanément à l'évolution du trafic propre à la gare considérée et à la fréquence des rames.

L'organisation du travail dans cette zone se décompose en deux phases :

- Mise en place de la remorque sur le praticable par un moyen propre à la gare ou mise en place du conteneur sur le porte-praticable par un moyen adapté au conditionnement,
- Mise en place d'outillages spécifiques de bridage entre autres pour la remorque.

En conclusion cette partie de la gare ne nécessite pas, en dehors des moyens de manutentions, d'automatismes spécifiques. Elle implique néanmoins l'immobilisation de praticables et d'une partie de leurs moyens de déplacement que nous appelons « porte-praticable » ; ces ensembles faisant parties des automanipulateurs.

#### 8.2.4.4.2 Zone de transfert entre l'embarquement et le quai

Cette zone est la seconde partie active du module, dans laquelle n'intervient en aucun cas le personnel non affecté et formé. Elle peut être entièrement automatique. Sa fonction est d'assurer avec des moyens mécanisés et automatisés (ou pas) le déplacement des praticables et de leur charge entre les points d'embarquement/ débarquement et le quai.

Une fois la charge mise en place sur le praticable et le moyen de manipulation de cette charge (tracteur ou/et grue porte conteneur) dégagé, il convient de déplacer l'ensemble nouvellement constitué de cette partie du module vers la position de chargement correspondant au wagon qui lui est affecté, position qui ne se trouvera pas en fonction de la fréquentation de la gare nécessairement face à face. Dans le même cycle l'opération inverse doit être également réalisée.

C'est dans cette partie qu'intervient l'automanipulateur. Le terme retenu « automanipulateur » tend à sous-entendre un système de manipulateur entièrement automatique. Là encore il convient d'adapter le niveau d'automatisation à la fréquentation de la gare en prévoyant la mutation du moyen retenu de la solution minimale manuelle (qui peut apparaître financièrement séduisante) vers une solution entièrement automatique. Cette mutation progressive entre les deux extrêmes ne doit pas remettre en cause les investissements déjà réalisés. Les conséquences de l'un ou de l'autre de ces choix sur, par exemple, le personnel nécessaire au fonctionnement global d'une infrastructure, les investissements... sont détaillées dans la dernière partie du présent rapport.

#### 8.2.4.4.3 Zone ferroviaire

Cette zone concerne le déchargement/chargement du praticable sur le wagon.

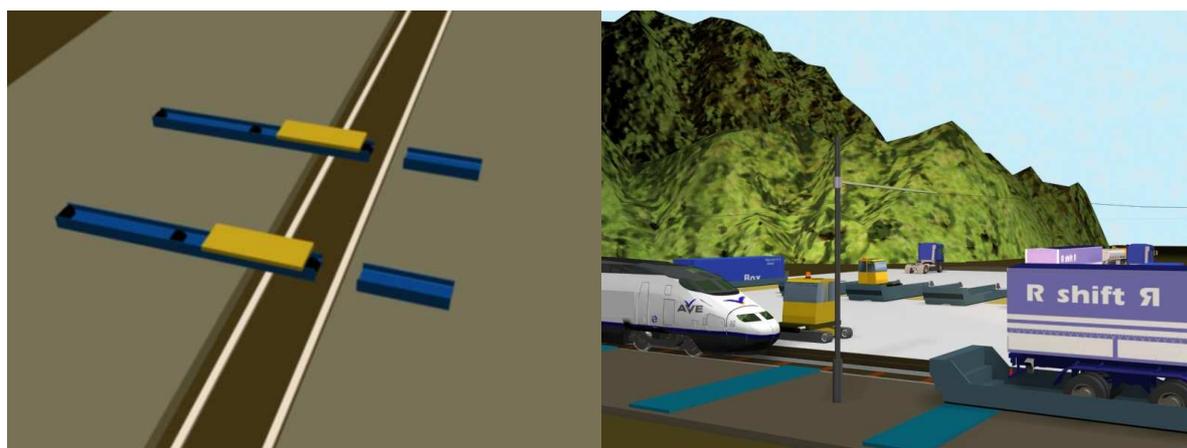


Figure 68 : Zone ferroviaire

Le facteur temps est déterminant dans la rentabilité de tous systèmes de ferroutage ; l'organisation de chaque opération élémentaire ne peut donc pas changer avec le rythme d'utilisation de la gare. Une gare de faible utilisation a les mêmes moyens de mécanisation, au droit du quai, qu'une gare à fort débit. Comme une ligne à faible fréquence a la même

mécanisation qu'une ligne à forte fréquence. Toutes les opérations de transbordement doivent s'exécuter dans le temps « le plus court » pour tenir l'objectif fixé de 15 minutes entre convois. Les opérations en gare doivent se réaliser parallèlement et simultanément (sans synchronisation) sur tous les modules utilisés, dans un temps de 5 à 6 minutes.

L'équipement de la gare en nombre de postes sera lui proportionnel à la fréquentation de la gare ; cette notion doit être assujettie à une réflexion sur l'organisation des convois d'une part et d'autre part sur les modes de fonctionnement, réflexion qui est abordée dans la dernière partie du document.

Il convient également de mettre en place une organisation qui tient compte des impératifs de sécurité qu'impose le mode ferroviaire en laissant pour cela le maximum de temps pour réaliser les contrôles d'arrivée et de départ de la rame. Ce temps est bien évidemment intégré dans la période d'arrêt de la rame et s'insère dans le « temps d'arrêt restant » des 15 minutes d'arrêt fixé.

La mécanisation de cette partie du module reste identique quel que soit le rythme des sillons ; leur nombre sera fonction des échanges que l'on souhaite réaliser dans chaque gare et peut évoluer dans le temps.

Le cycle des opérations à réaliser en présence de la rame peut s'écrire comme suit :

- Arrivée de la rame,
- Contrôle général positionnement, transmission des données, ...
- Transfert déchargement/chargement,
- Contrôle général,
- Attente du solde de temps disponible,
- Autorisation de départ de la rame.

Les fonctions mécaniques à réaliser autour du wagon se limitent aux :

- Procédures de libération de la charge
- Relevage du praticable arrivant par l'obturateur de fosse,
- Déplacement « transversal » du praticable présent sur la rame vers la position où l'attend le porte-palette, et simultanément (ou pas) du praticable en position de près attente (sur le coté opposé de la voie) vers le wagon,
- Retrait de l'obturateur de fosse qui procède aux opérations de descente,
- Verrouillage,
- Contrôle qui autorisera le départ.

## 8.2.4.5 Description des matériels spécifiques

### 8.2.4.5.1 Partie débarquement/embarquement sur les praticables

Les moyens nécessaires à cette partie de l'installation sont les matériels couramment utilisés au sein des terminaux de transport combiné pour les conteneurs (RMG, RTG, cavalier, grues mobiles) ou pour la manipulation des remorques dans les centres de logistiques (e.g. portuaire, pour les trafics Roro, comme typiquement des tugmasters).

#### 8.2.4.5.2 Partie transfert

Il convient après mise en place du conditionnement sur le praticable de déplacer l'ensemble jusqu'aux abords du quai en vue de sa mise en place sur le wagon. Dans ce cadre, un automanipulateur a été conçu. Cet ensemble se décompose en deux parties bien distinctes : la première porte la charge, la seconde assure le déplacement.

##### 8.2.4.5.2.1 Fonction de reprise de charge

Ces ensembles, au demeurant forts simples, se composent d'une fourche à trois palettes ; chaque palette est constituée d'un cadre métallique de faible épaisseur sans rigidité propre dans laquelle sont incorporés les éléments porteurs du type Bertin. Ces palettes sont assemblées à une poutre latéralement qui sert accessoirement à distribuer l'air aux cousins et à assurer la butée latérale du praticable à l'embarquement ou sa reprise en sortie de rame au déchargement.

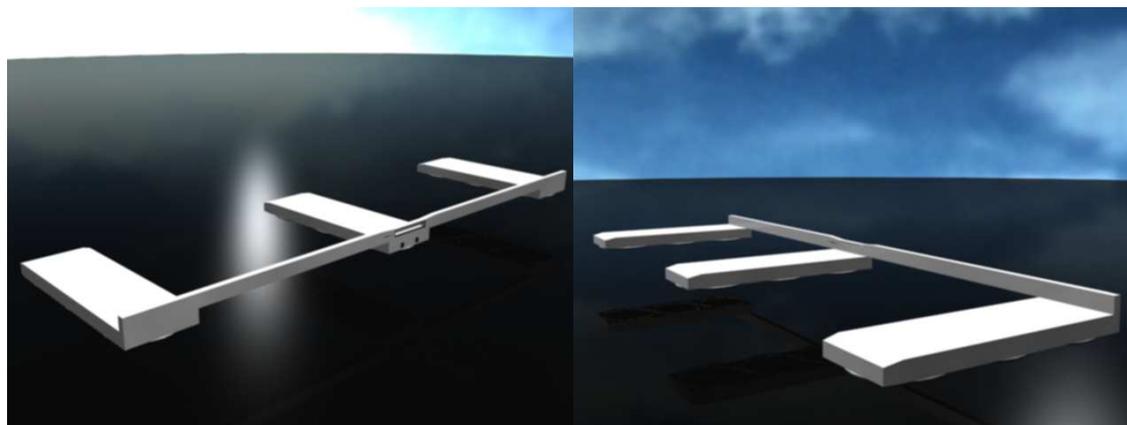


Figure 69 : Porte praticable

Les éléments porteurs permettent, à la mise sous pression, un relevage d'une valeur de 50 à 80, fonction qui sera utile pour réaliser les divers déplacements verticaux nécessaires à la dépose ou à la prise en charge du praticable. Ces éléments peuvent supporter, chacun, suivant le modèle une charge de 1000 à 7000 kilogrammes, pour fonctionner dans des conditions qui en garantissent la pérennité. Ces contraintes impliquent d'intégrer (à la mise en pression) la notion de répartition de la charge entre les trois palettes. Pour rappel, pour être répartie sur les essieux des wagons cette charge est excentrée sur le praticable.

Le schéma général et le tableau qui lui est associé donnent une première approche de la répartition de la charge sur les différents éléments porteurs.

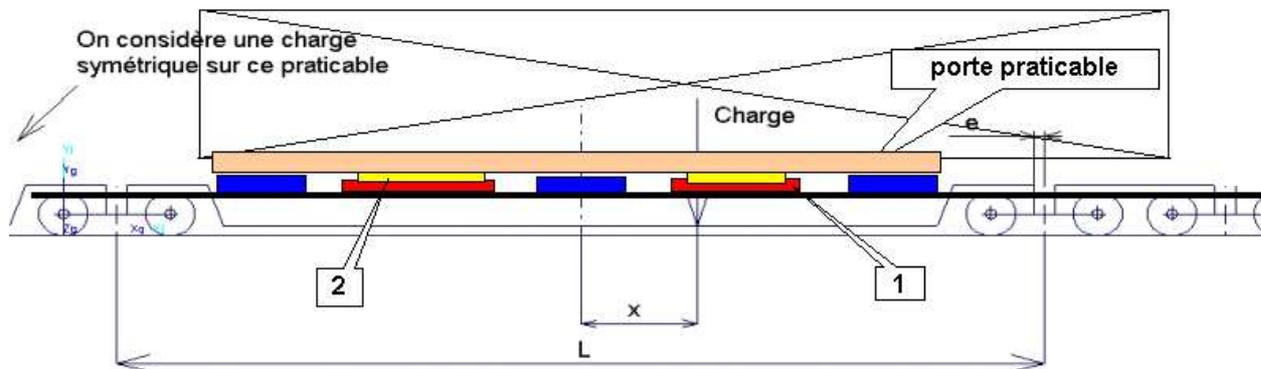


Figure 70 : Répartition de la charge sur les différents éléments porteurs

X = décalage du centre de gravité de la charge	x (m)	Charge du côté du bogie simple (T)	Charge du côté du bogie double (T)
Situation conteneur Flat Rack	0	21,25	21,25
	1	19,13	23,38
Situation avec remorque	1,6	17,85	24,65
	2	17,00	25,50

Tableau 15: Répartition de la charge sur les différents éléments porteurs

Ces portes-praticables sont disposés dans les modules aux emplacements réservés aux praticables qu'ils supportent. Chaque gare dispose donc d'un nombre de porte-praticables identique au nombre de praticables jugés nécessaire et suffisant pour assurer le débit souhaité.

#### 8.2.4.5.2.2 Fonction de déplacement

Les différentes discussions menées avec des constructeurs permettent d'envisager une solution capable d'évoluer entre les différents modes de service envisagés : manuel, semi-automatique ou automatique. Elle se présente sous la forme d'un engin à chenillettes caoutchoutées, de faible puissance mais de forte adhérence au sol ce qui correspond parfaitement aux besoins ; elle présente en outre l'intérêt primordial d'utiliser des éléments de construction standard produit en grande série. L'assise de cet ensemble « standard » intègre déjà les deux des degrés de liberté nécessaires pour remplir les fonctionnalités recherchées :

- Les chenillettes assurent les déplacements linéaires et le changement de direction par variation des vitesses de rotation de l'une ou l'autre des deux chenillettes.
- Une plate-forme cabine, porte outillage permet un pivotement, sur place, de la charge sans déplacement des chenillettes.

Le principal défaut de ce type véhicule est le patinage des chenillettes pendant le pivotement sur place (sur la simulation, les rayons de rotation peuvent être relativement importants et les angles de pivotement faibles).

A cet ensemble sera adjoint un axe de dégagement pour effectuer la prise du porte-praticable et les éventuelles corrections de positionnement dans la direction perpendiculaire à l'axe de déplacement de la base. Mouvement dont les asservissements (puissance hydraulique, régulateur de pression, électrovannes...) sont déjà en place. Ce dernier mouvement porte un préhenseur donc la fonctionnalité est de transmettre, après bridage automatique au porte-praticable, l'air comprimé nécessaire aux éléments porteurs Bertin. Ce mouvement peut être équipé d'une liberté verticale pour répondre aux diverses variations que provoqueront les mises sous pression des éléments porteurs.

En partant de cette assise mécanique, il faut y adjoindre un compresseur qui fournit l'air nécessaire à l'alimentation et un système spécifique de commande (électrovannes...) dont la pression s'autorégule (suivant la charge à transporter) avec une sonde incorporée dans chaque élément porteur. Sur cette base standard et sur le dessus repose la cabine de pilotage... ou plus simplement une boîte de réception des informations provenant d'une boîte de télécommande qu'actionnerait un opérateur situé à distance.

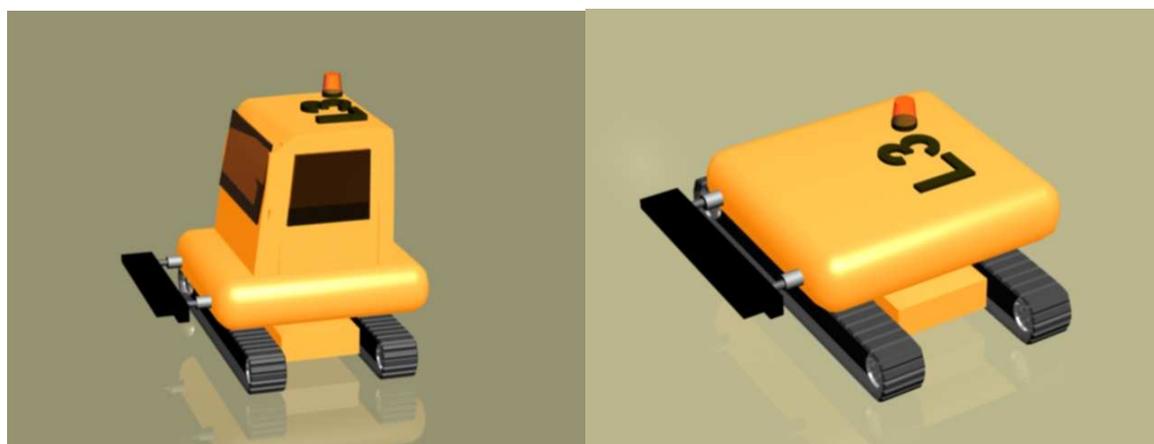


Figure 71 : Version manuelle et automatique de l'automanipulateur

La version automatique diffère de la version précédente par l'incorporation d'un système de suivie de trajectoire qui asservira les moteurs de déplacement, rotation de la base. Ce système de guidage peut, par exemple, être constitué par des lignes de filoguidage incorporées dans la dalle dont la programmation des points de changement directionnels est réalisée par le système central de transmission et de gestion des données. Ce système fonctionne d'une façon similaire aux lignes assemblage ou d'usinage couramment en service dans l'industrie : automobiles, mécanique ou électroménagères...L'emploi de l'une ou de l'autre de ces versions se fera suivant deux schémas possibles de fonctionnement, manuel ou automatique.

#### 8.2.4.5.2.3 Sens de la charge sur le wagon

Sur un convoi les charges sont (sur deux wagons successifs) orientées tête bêche. Cette contrainte impose un positionnement symétrique du porte-praticable en zone d'embarquement/débarquement (à droite ou à gauche) suivant le sens de retournement nécessaire aussi bien en sortie de l'alvéole d'embarquement qu'en sortie du wagon (de façon à présenter la remorque dans le bon sens pour sa reprise par le tracteur). Cette contrainte est beaucoup plus handicapante qu'il n'y paraît puisque qu'elle impose l'utilisation du même module « sens de prise » pour chaque sens de wagon au déchargement.

### 8.2.4.5.3 Partie ferroviaire

#### 8.2.4.5.3.1 Principe de fonctionnement

En amont et indépendamment de l'arrivée de la rame, le système de transfert (porte-praticable) s'est positionné avec sa charge le long du quai face à la position d'arrêt du wagon qui lui est affecté. La suite du cycle peut se dérouler suivant deux modes :

- Le porte-praticable fait immédiatement traverser la fosse au praticable en partance ; le porte-praticable reste en place pour recevoir le praticable qui sera déchargé de la rame.
- Les transferts attendent l'arrivée de la rame.

Pour réaliser cette opération des ponts doivent permettre de passer au-dessus de la fosse (d'une largeur d'environ 3,1 mètres pour matérialiser l'espace nécessaire au passage de la rame). Pour ce faire différents mécanismes ont été envisagés par les inventeurs du concept et l'INSA, et notamment le principe de mécanismes à tiroir présenté ci-dessous.

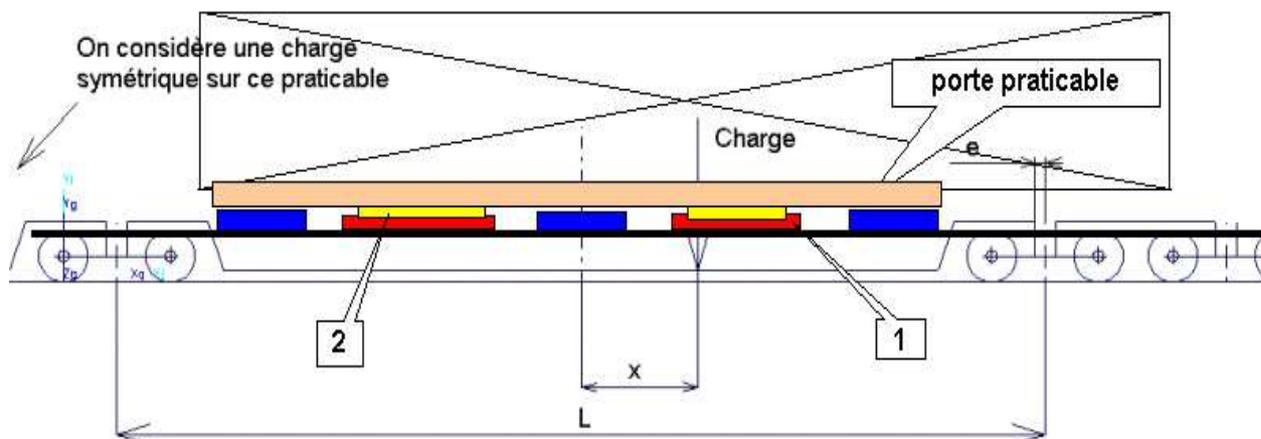


Figure 72 : Principe de fonctionnement du porte praticable

Le mécanisme d'obturation permet le transfert de la charge d'un bord à l'autre de la fosse. Ces ensembles ont un fonctionnement entièrement automatique. Dans un premier temps, la palette (1), implantée sur le côté opposé de la fosse, se déplace pour venir fermer le dessus de cette fosse, face à et contre des bossages fixes, de même section, situés sur l'autre bord entre les plateaux de la fourche du porte-praticable. La palette et le bossage forment en fin de course un cheminement de même hauteur sur laquelle se déplace le chariot (2) qui prendra en charge le praticable. Cette palette (1) ne supporte jamais la charge pendant ses déplacements.

#### 8.2.4.5.3.2 Processus de manutention

Le cycle de manutention suit dès lors le processus suivant :

- **Mise en place du praticable partant :** la fosse étant obturée, le chariot (2) se déplace à son tour sur la palette (1) et vient terminer sa course sur le bossage fixe du côté opposé de la fosse en dessous du praticable en attente. Après prise en charge du praticable le chariot (2) retourne vers son point de départ et dépose sa charge sur des références fixées au sol. La palette (1) reprend sa place.
- **Déchargement du praticable arrivant :** le train arrive et s'immobilise face au module. Après avoir déverrouillé le praticable quatre vérins incorporés dans le quai remontent le praticable à un niveau suffisant pour permettre le passage de la palette (1) et du chariot (2) sous le praticable. Le cycle précédent reprend avec un arrêt, à l'aller, du chariot au centre de la fosse pour prendre en charge le praticable arrivant, qu'il vient en poursuivant sa course déposer sur le porte-praticable qui est resté en place.
- **Chargement du praticable partant :** après dépose le chariot (2) revient en position arrière pour prendre en charge le praticable en partance et vient le présenter au-dessus du wagon où il est repris par les vérins de relevage. Ces derniers le descendront dans le wagon après retrait simultané de la palette (1) et du chariot (2). Chaque module incorpore deux ensembles identiques qui travaillent en synchronisation parfaite. La charge transportée quant à elle peut, suivant les phases du cycle opératoire, varier de 0 à 46 tonnes, et être décentrée de 0 à + 1,6 m par rapport à l'axe du praticable. Les déplacements verticaux que provoque la mise sous pression des éléments porteurs Bertin sont utilisés comme course de relevage dans les différentes phases du pas à pas de transfert. Ils servent à déposer, à prendre ou à laisser en place la charge.

#### 8.2.4.5.3.3 Construction et contraintes dimensionnelles et fonctionnelles

La palette (1) a une longueur d'environ 6500 mm pour une largeur possible comprise entre 950 à 1300 mm. Son épaisseur -tout en étant minimum- est fonction de la flèche admissible pour réaliser le transfert de la charge au-dessus de la fosse dans de bonnes conditions de fatigue et de flexibilité. Son guidage par rapport au sol est assuré par le système moteur, qui peut être soit un vérin sans tige, soit un système à chaîne du type Le Rapide (voir schéma proposé en annexe sans calcul). Nous considérons que les liaisons des éléments entre eux sont assurées par ce même système d'avance et reconnues sur les butées électriques. L'écartement possible entre les deux palettes (1) est d'environ 3000 mm, leurs mouvements n'ont pas à être synchronisés puisqu'ils ne portent jamais de charge pendant leurs déplacements. Pour rappel, la charge est excentrée de 1,6 m par rapport au praticable.

Le porte-charge (2) aura une longueur de 2900 mm (maxi 3000 mm) pour une largeur comme une hauteur nécessaire à sa rigidité et à la mise en place des coussins. Ces déplacements comme la reconnaissance de ces positions répondent aux mêmes contraintes que pour la palette avec cependant une nécessaire synchronisation de leurs déplacements.

Le support général (3) sert de base à chaque demi-ensemble, il peut se confondre avec la dalle de la gare. Il incorpore les éléments porteurs de la palette (1), les systèmes de déplacement de la palette (1) et du chariot (2). Il se prolonge, sur le côté opposé de la fosse, sous la forme d'une plaque de glissement de même profil.

La course est pour la palette (1) de 3400 mm pour reprendre appuis sur l'autre bord de la fosse, elle est parcourue 2x2 fois par cycle. Pour le chariot elle est de 2 fois 3300 mm avec une coupure et remise de la pression des coussins à chaque reprise ou dépose de la charge.

Le rythme de travail sera de quatre cycles par heure sur 24 heures par jour. Le temps de cycle sera le plus rapide possible, moins de 5 minutes.

### 8.2.4.6 *Caractérisation d'un module de base*

#### 8.2.4.6.1 *Définition*

La première partie du mode opératoire consiste à placer, face à chaque wagon, une zone d'embarquement/débarquement des charges (camion, remorque, conteneur, caisse européenne) composé de 3 alvéoles alignées perpendiculairement au rail.

La seconde consiste, avec un ensemble mécanique « manipulateur ou automanipulateur » accouplé à un système de gestion des déplacements, à assurer le transfert du porte-praticable entre les deux extrémités de sa zone d'action. Les deux parties de cycle fonctionnent de manière asynchrone l'une étant cadencée par la présence des conditionnements à embarquer/débarquer, l'autre par le chargement/déchargement de la rame présente.

Ces fonctionnalités constituent la base commune à toutes les gares (« module de base »).

#### 8.2.4.6.2 *Dimensionnement*

Chaque module regroupe les éléments et équipements requis pour assurer les fonctions nécessaires à son exploitation comme les lignes de guidage, les porte-praticables, et l'automanipulateur de transfert.

La surface de ce module est fixée par sa largeur, définie par le pas des wagons soit 15,750 mètres (second intérêt d'un wagon court) que multiplie la distance nécessaire aux manipulations des charges soit environ 40 mètres.

Chaque module d'une surface d'environ 600 m<sup>2</sup> permet de traiter journalièrement 96 (24\*4) wagons soit de manipuler 192 (24\*4\*2) conditionnements.

#### 8.2.4.6.3 *Composants*

Pour simplifier le raisonnement, il n'est considéré qu'un seul module de transfert face à une position d'arrêt d'un wagon. La séquence se répétera autant de fois qu'il y aura de wagons à décharger/charger de/sur la rame ou de postes prévus dans une gare pour assurer les transferts.

L'utilisation d'un système de filoguidage a été retenue en première approche pour le contrôle des déplacements. Cependant, d'autres techniques pourraient être envisagées. Tout comme le terme d'automanipulateur signifie un principe de manipulation des praticables, et non pas un système spécialement défini (et notamment un cycle semi-automatique voire manuel pourrait être envisagé pour cette séquence de fonctionnement).

Pour récapituler un module comporte :

- 3 alvéoles de préparation à l'embarquement/débarquement, implantées, comme on l'a dit, perpendiculaires à la voie et équipé d'un même nombre de porte-praticables que de praticables,
- 1 ligne A de guidage (unique sur toute la longueur de la gare) qui permet au moyen de manipulation de passer d'un module à l'autre,
- 3 lignes B (a-b-c) de guidages transversaux qui définissent sur la ligne A les points de retournement des porte-praticables, la ligne Bb se prolongeant jusqu'au poste de transfert de la charge
- 1 manipulateur des porte-praticables,
- 1 fosse pour le passage de la rame,
- 1 système de relevage des praticables au-dessus de la fosse,
- 1 système d'obturateur de fosse « palettes chariots »,

Certain de ces composants peuvent desservir plusieurs modules.

#### 8.2.4.6.4 Schématisation

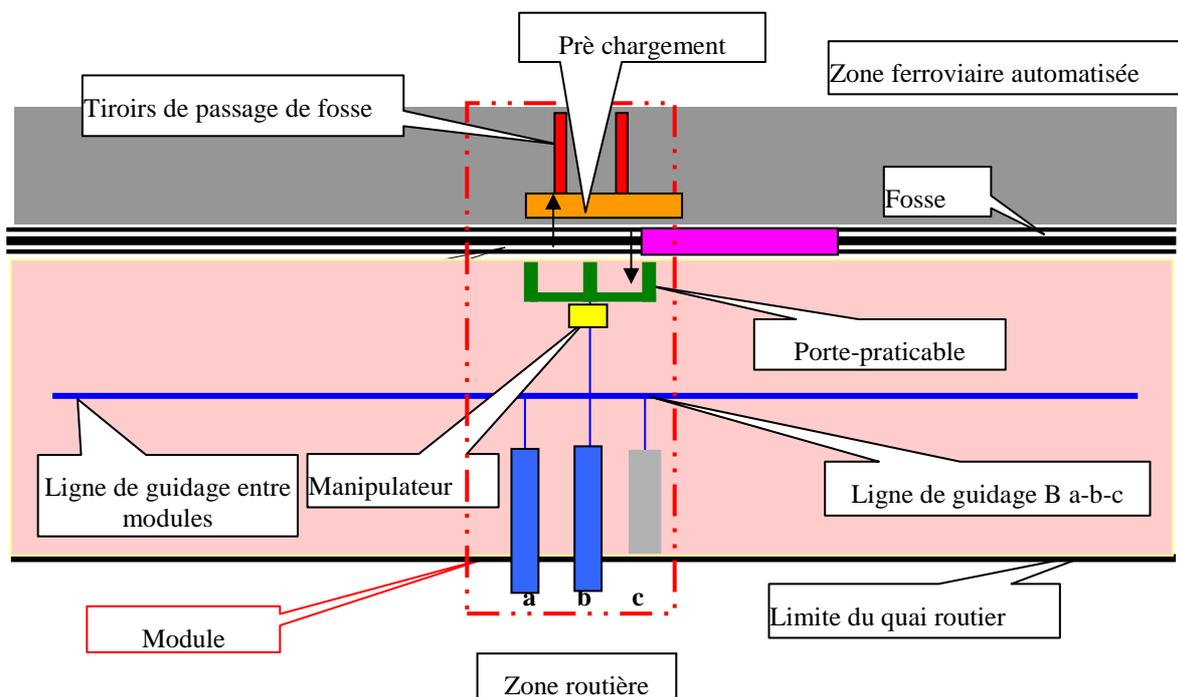


Figure 73 : Module de base avec des tiroirs de passage de fosse (schéma n° 1)

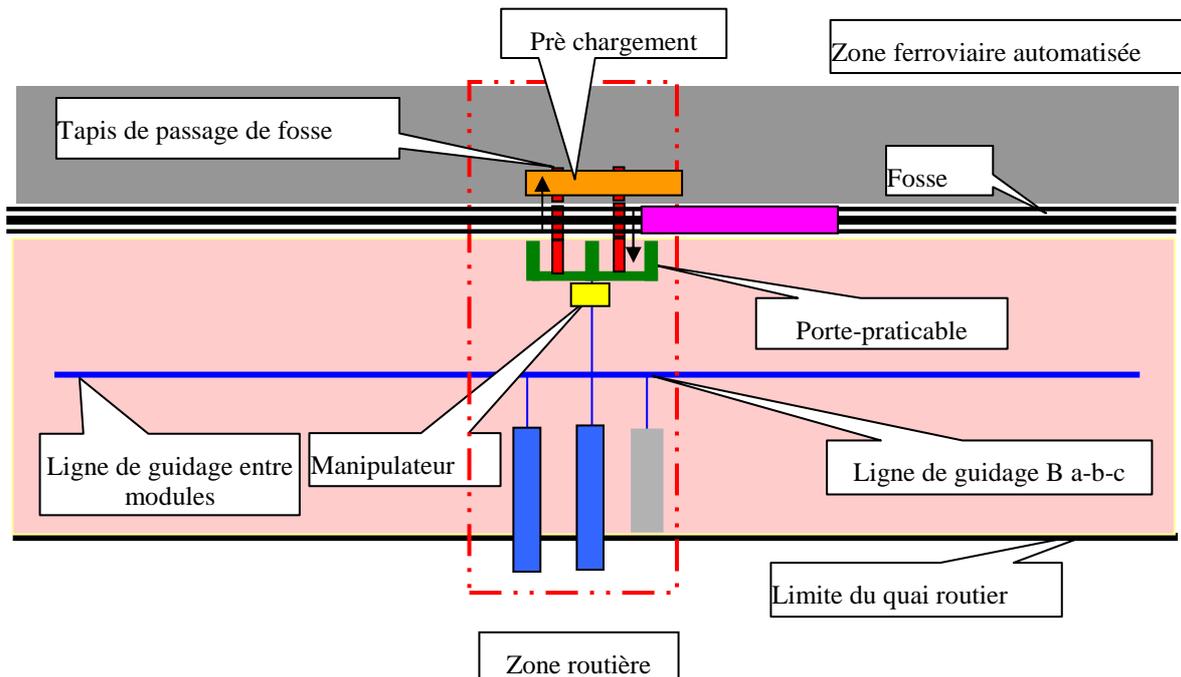


Figure 74 : Module de base avec des tiroirs de passage de fosse (schéma n° 1bis)

#### 8.2.4.6.5 Position des éléments en attente de la rame

Les différents éléments intervenants dans le processus de travail sont considérés comme positionnés en situation de fin de cycle en attente de la rame, situation qu'il sera obligatoire de confirmer pour autoriser la mise en place de la rame. Il faut aussi qu'une des alvéoles soit vide dans la zone d'embarquement/débarquement pour que le cycle se déroule normalement. Dans le cas contraire il sera nécessaire que l'automanipulateur change de module pour déposer le praticable arrivant.

Ainsi les éléments en attente de la rame sont positionnés comme suit :

- Un contenant (orange) est en attente de départ parallèlement à la voie sur le coté opposée de la fosse au porte-praticable (vert).
- Le contenant (mauve) du train arrivant en gare sera à évacuer.
- Le porte-praticable (vert) est en attente dans sa zone d'arrêt sur la fin de ligne de filoguidage (b)
- L'alvéole de pose c (grise) est vide.
- Les autres (bleu) sont dans divers état de chargement/déchargement.
- Les obturateurs de fosse (rouge) sont dégagés.
- Le manipulateur (jaune) est en attente.

#### 8.2.4.6.6 Cycle

La première partie du cycle débute à l'arrivée de la rame et regroupe plusieurs étapes :

- Arrivée de la rame, au moment de son arrêt le wagon a une position au-dessus de système de dépose la meilleure possible, + - 4cm,
- Libération de la charge (si nécessaire),
- Mise en place des obturateurs de fosse,
- Prise en charge du praticable par les obturateurs,
- Transfert du praticable du wagon vers le porte praticable et dépose,

Le cycle se sépare alors en deux séquences qui vont se dérouler simultanément :

- L'une toujours en présence la rame :
  - Prise en charge du praticable en attente et transfert vers le wagon,
  - Évacuation du système des obturateurs de fosse, descente et centrage du praticable dans le wagon,
  - Prise en charge de la remorque par son système d'immobilisation,
  - Contrôle général des paramètres de fonctionnement,
  - Départ du train N + 0,
- L'autre sur les porte praticable :
  - Prise en charge du porte-praticable par l'automanipulateur depuis sa position d'attente,
  - Retour par la ligne de filoguidage « Bb » jusqu'au point central de rotation,
  - Déplacement et rotation simultanés sur la ligne « A » jusqu'à la ligne « Ba » propre à l'alvéole 1,
  - Déplacement sur la ligne transversale Ba,
  - Arrivée sur point de débarquement fin de cycle pour chargement N+1

Le cycle suivant se divisera en plusieurs étapes :

- Retour - par la ligne A - de l'automanipulateur de l'alvéole n° 1 vers l'alvéole n° 2, 3 suivant l'ordre de départ programmé,
- Prise en charge du praticable n° 3,
- Retour sur le point de rotation par la ligne transversale Bc propre à l'alvéole n° 3, puis A puis Bb
- Avance vers les rails, dépose sur les obturateurs de fosse,
- Utilisation de l'automanipulateur pour une autre tâche, seconde cellule ou attente du train suivant.
- Remise en place des obturateurs de fosse, dès le départ de la rame,
- Transfert du praticable sur le coté opposé de la voie (avant l'arrivée de la rame N+1)

- Retrait des obturateurs de fosse,
- Attente du train N+1,

Le schéma qui suit présente les éléments dans les cinq phases principales du cycle, le fonctionnement étant considéré comme entièrement automatique :

- Phase 1 : avance du praticable vers le rail, obturateur de fosse est en place, la rame absente.
- Phase 2 : transfert du praticable sur le coté opposé de la voie, la rame est absente.
- Phase 3 : retrait de l'obturateur de fosse, on est en attente de la rame.
- Phase 4 : arrivée de la rame relevage du praticable arrivant et à la mise en place des obturateurs de fosse.
- Phase 5 : transfert du praticable arrivant vers le porte-praticable et du praticable en attente vers le wagon ; cette partie du cycle peut se faire simultanément ou successivement.

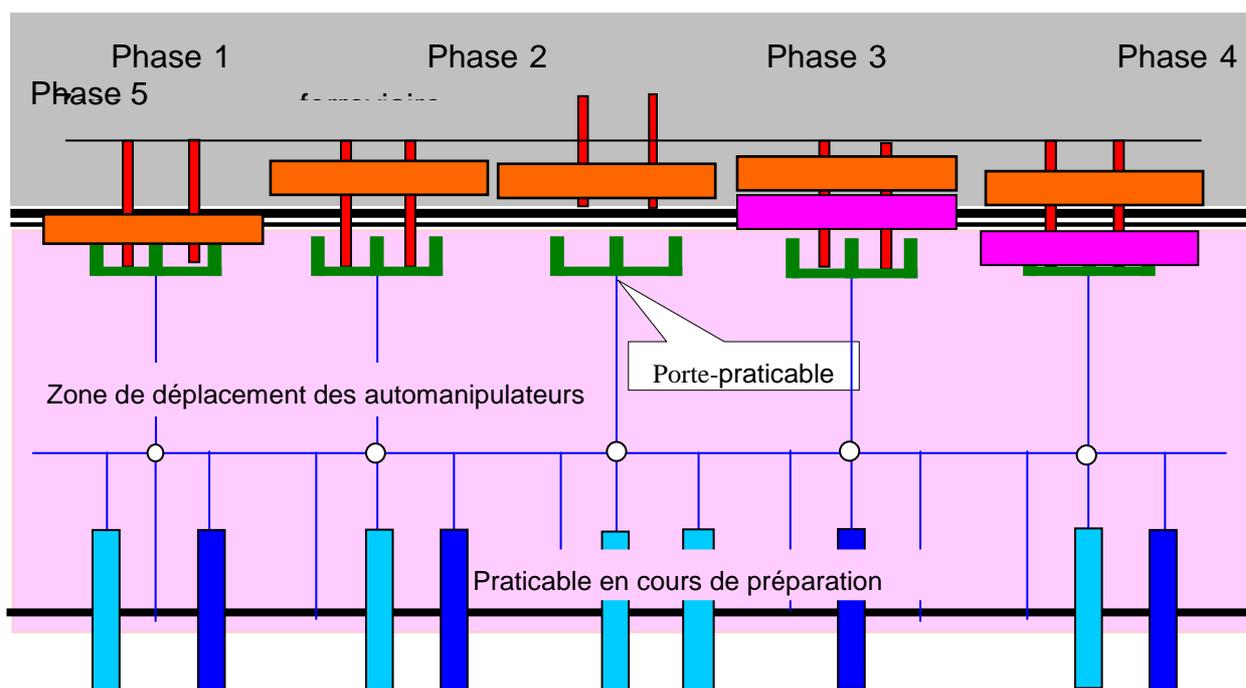


Figure 75 : Phases du cycle de manutention

A la différence du schéma précédent la notion de module déroge à la règle. Dans ce cas les parties embarquement/débarquement sont communes à plusieurs zone chargement/déchargement. Cette solution est possible dans la mesure où le rythme des rames sera plus faible, mais aussi du fait d'une utilisation à double sens de la voie. On constate sur ce schéma une réduction importante des postes d'embarquement/débarquement, ce qui représente parallèlement une réduction des coûts d'investissements. Le nombre de modules dans leur partie passage de fosse doit être parfaitement adapté au volume d'échanges à réaliser dans chaque gare. *La dernière partie du présent rapport aborde, pour un trafic donné, les besoins en équipement de chaque gare implantée le long d'une infrastructure.*

### 8.2.4.6.7 Diagramme des temps

La figure suivante propose le diagramme des temps associé :

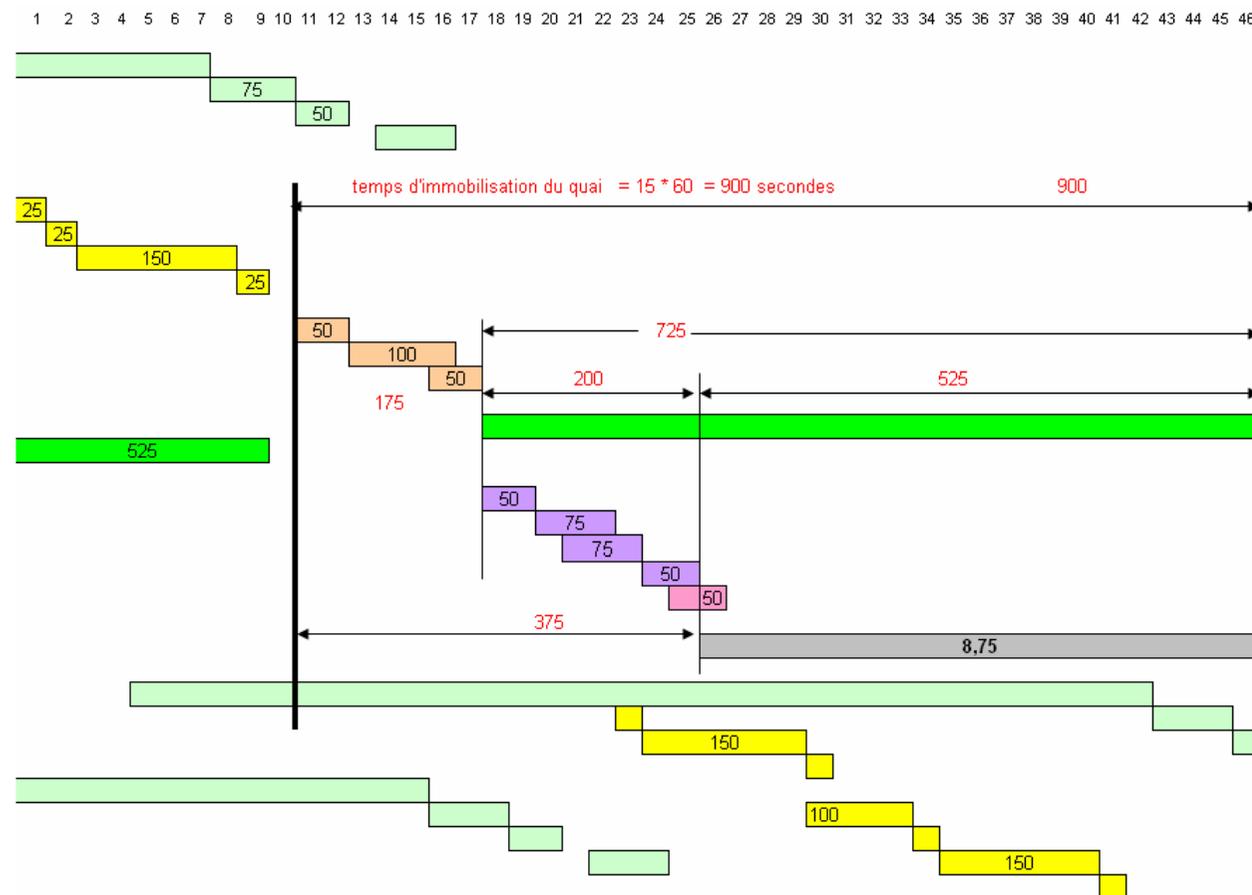


Figure 76 : Diagramme des temps du cycle de manutention

### 8.2.4.7 Présentation d'une gare R-shift-R avec un quai

Dans la représentation qui suit, la partie embarquement/débarquement comporte deux modules qui alimentent quatre zones de chargement/déchargement.

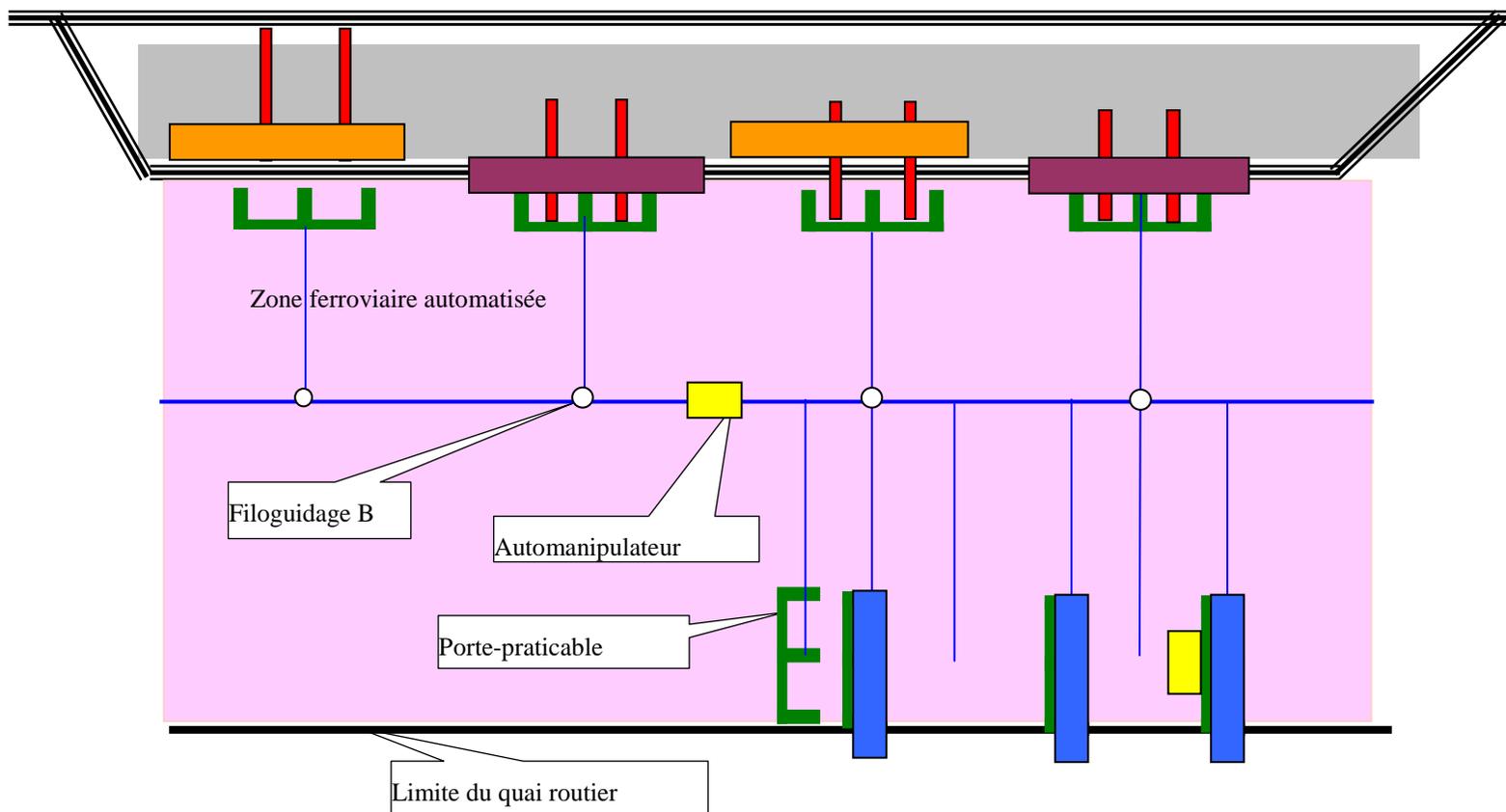


Figure 77 : Schématisation d'une gare R-shift-R avec un quai



Nombre de wagons pour rame de 1000 m	=	60
Nombre de wagons pour rame de 450 m	=	28
Praticables immobilisés par module	=	3
Masse roulante maximale	=	3060 tonnes
Masse minimale reportée sur les essieux moteurs	=	40 tonnes
Masse maximale reportée sur les essieux moteurs	=	1014 tonnes
Charge marchande maximale	=	2024 tonnes
Tare roulante	=	1036 tonnes
Rapport charge marchande sur tare roulante	=	2

*Les différentes valeurs de charge sont indiquées pour une rame de 46 wagons. Les cabines de pilotage situées en têtes et fin de rame sont équipées du même moteur d'entraînement ; elles ne font l'objet d'aucune recherche particulière.*

**Chantier :**

Profondeur de la zone embarquement /débarquement	=	40 m
Profondeur de la zone transfert	=	35 m
Profondeur de la zone (dé)chargement	=	9 m
Surface d'un module	84x15,75 =	1323 m <sup>2</sup>
Surface noble pour déplacement automatique	35x15,75 =	552 m <sup>2</sup>
Surface d'un chantier entièrement équipé	1323x46 =	60858 m <sup>2</sup>
Surface noble d'un chantier	552x46 =	25393 m <sup>2</sup>
Surface de raccordement aux réseaux ?	1000x10 =	10000 m <sup>2</sup>
Surface de stockage pré et post acheminement		à définir

*Les surfaces prises en compte (pour la zone embarquement/débarquement) permettent de constituer une réserve de pré stockage pour 6 trains complets, soit 276 contenants ; ou encore 1h30 d'autonomie. La zone « noble » sera à traiter suivant le mode de manipulation retenu ; dans tous les cas elle doit supporter la charge importante de 10 tonnes au m<sup>2</sup> ; ce qui fixera l'essentiel du prix.*

**Infrastructure :**

Pente	=	3,5%
Coefficient d'adhérence retenu	=	0,16
Vitesse recherchée	=	160 km/h
Vitesse en pente	=	80 km/h
Profil utilisable en tunnel avec remorque de 4,2 m	=	GB +
Profil bas hors tunnel et chantiers	=	standard

## 8.3 RECHERCHE ET EVALUATION DE SCENARIOS DE DEPLOIEMENT DU CONCEPT R-SHIFT-R

### 8.3.1 DESCRIPTION DES SCENARIOS ETUDIES

#### 8.3.1.1 Introduction

La suite de ce document présente plusieurs simulations réalisées sur des axes potentiels de desserte par R-S-R. Ces axes sont d'abord à considérer comme des idéaux-types dont la fonction est en premier lieu de tester la pertinence de R-S-R sur différentes configurations contrastées. Ainsi, les différentes configurations de mise en œuvre d'une autoroute ferroviaire sont étudiées :

- Franchissement d'obstacles (scénario 3)
- Longue distance (scénario 1 pour le transit, scénario 2 pour l'intégration de trafics portuaires)

Enfin, le scénario 4 propose de combiner les deux configurations au travers de leur interconnection.

Nous avons néanmoins jugé utile de situer géographiquement ces exemples d'application de manière à pouvoir appuyer les simulations sur des ordres de grandeurs réalistes de distances et de trafic (tant en volume qu'en répartition spatiale de la demande).

Les axes potentiels sur lesquels portent les simulations correspondent de fait à des grands itinéraires en France sur lesquels sont envisagés la mise en œuvre de services d'autoroute ferroviaire. De ce point de vue, les résultats concernant la pertinence d'un système R-S-R sur ces axes sont aussi de nature à enrichir la réflexion sur la pertinence, non pas de tel ou tel système particulier, mais plus largement de ce type de services sur le territoire français.

Les axes sur lesquels portent les simulations sont les suivants :

- Un axe Nord-Sud de Lille à la frontière espagnole (Hendaye) ;
- Un axe Nord-Sud du Havre à Marseille, donc entre deux grands ports maritimes ;
- Un itinéraire de franchissement d'un obstacle naturel entre Lyon et Turin ;
- Une combinaison des deux axes précédents avec une connexion à Lyon entre la desserte Nord-Sud et l'axe transalpin.

Sur chacun de ces axes, des arrêts intermédiaires près des grandes agglomérations et des nœuds de réseau importants sont pris en compte. On considère que les itinéraires ferroviaires correspondants existent (ce qui est toujours le cas) et sont disponibles pour recevoir les services simulés. Ce deuxième point est évidemment beaucoup plus problématique.

8.3.1.2 Scénario 1 (transit)

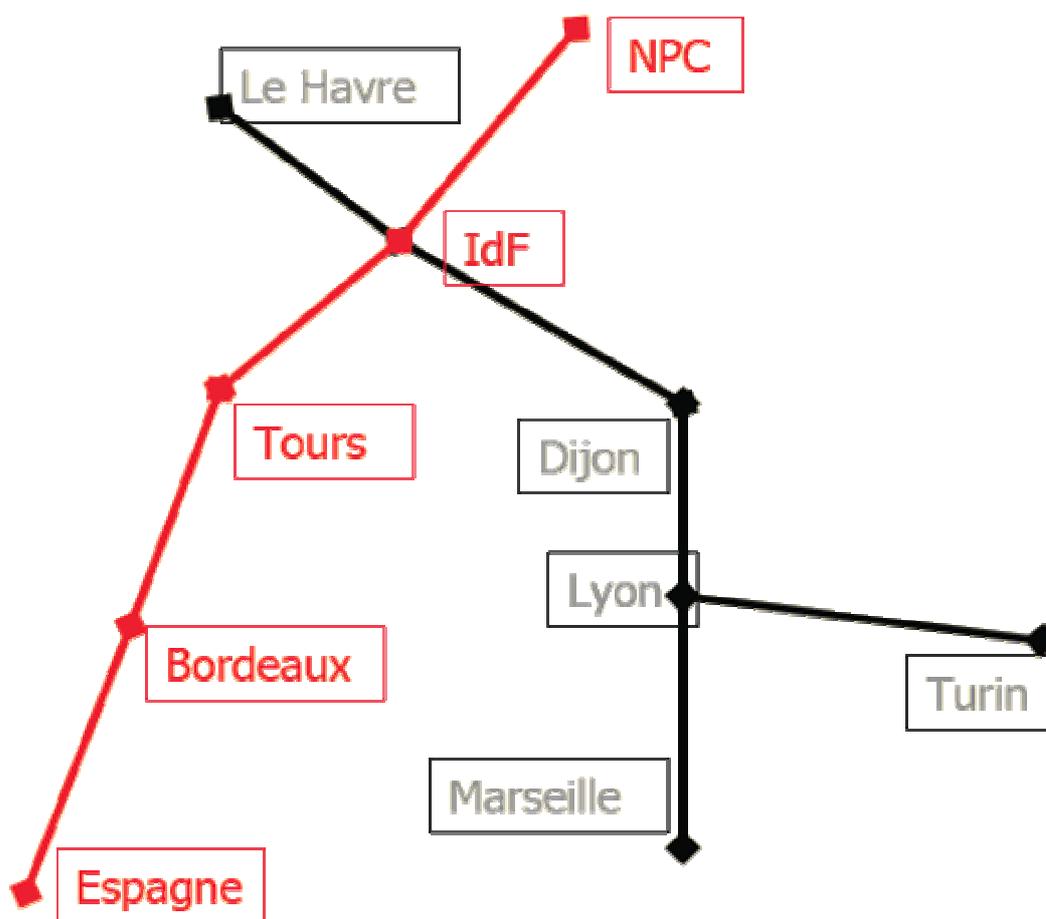


Figure 78 : Représentation du scénario 1 (Transit)

8.3.1.3 Scénario 2 (hinterland portuaire)

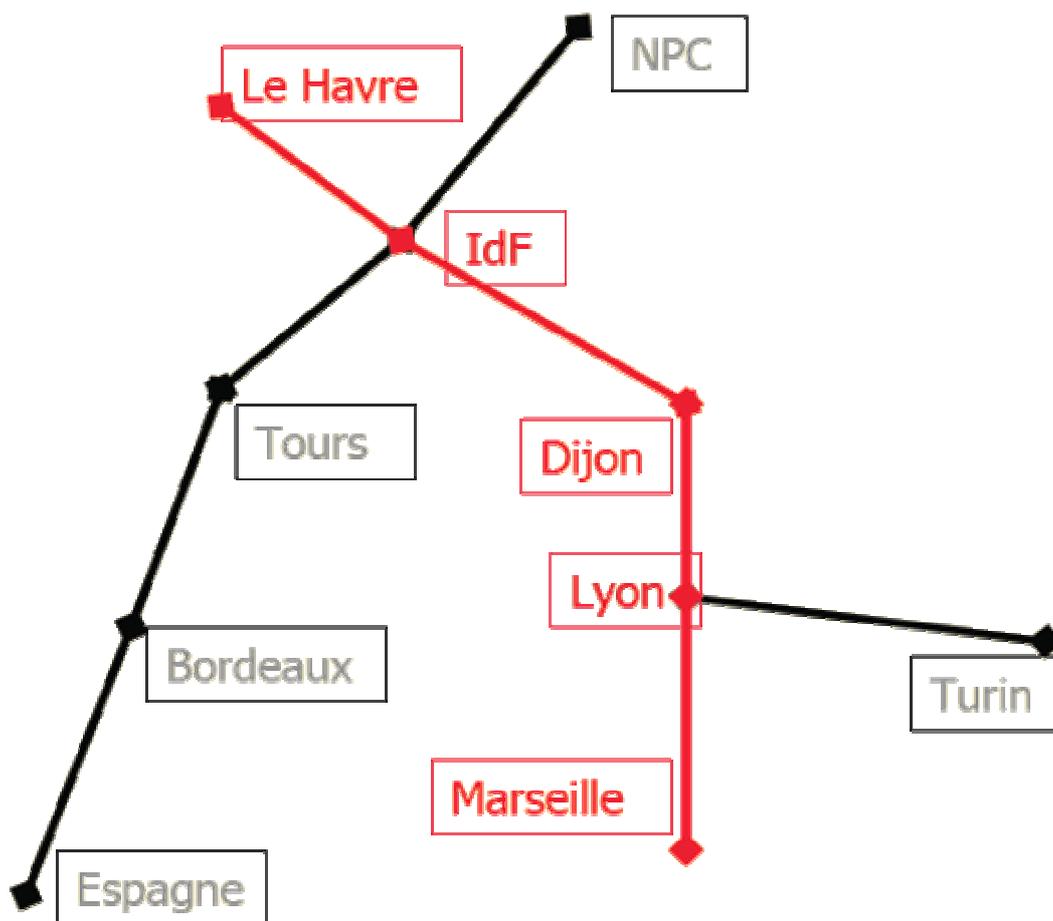


Figure 79 : Représentation du scénario 2 (Hinterland portuaire)

### 8.3.1.4 Scénario 3 (franchissement)

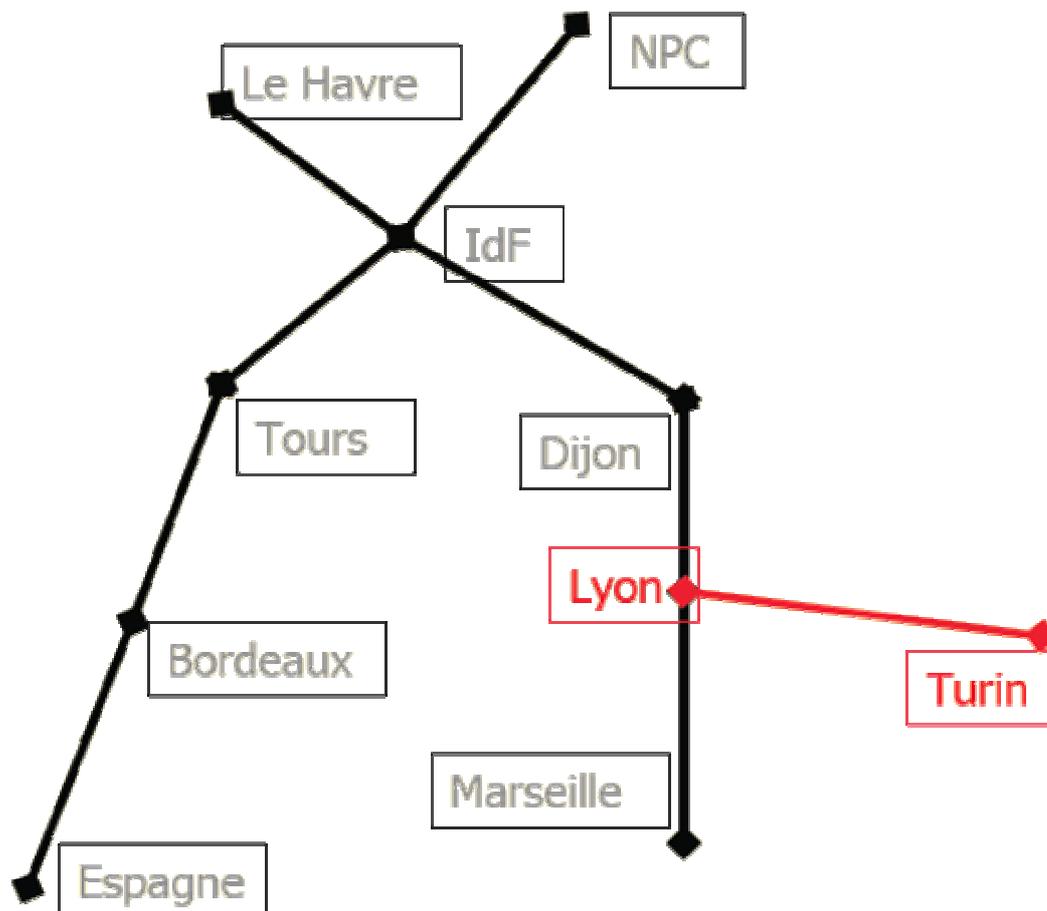


Figure 80 : Représentation du scénario 3 (Franchissement)

8.3.1.5 Scénario 4 (interconnections)

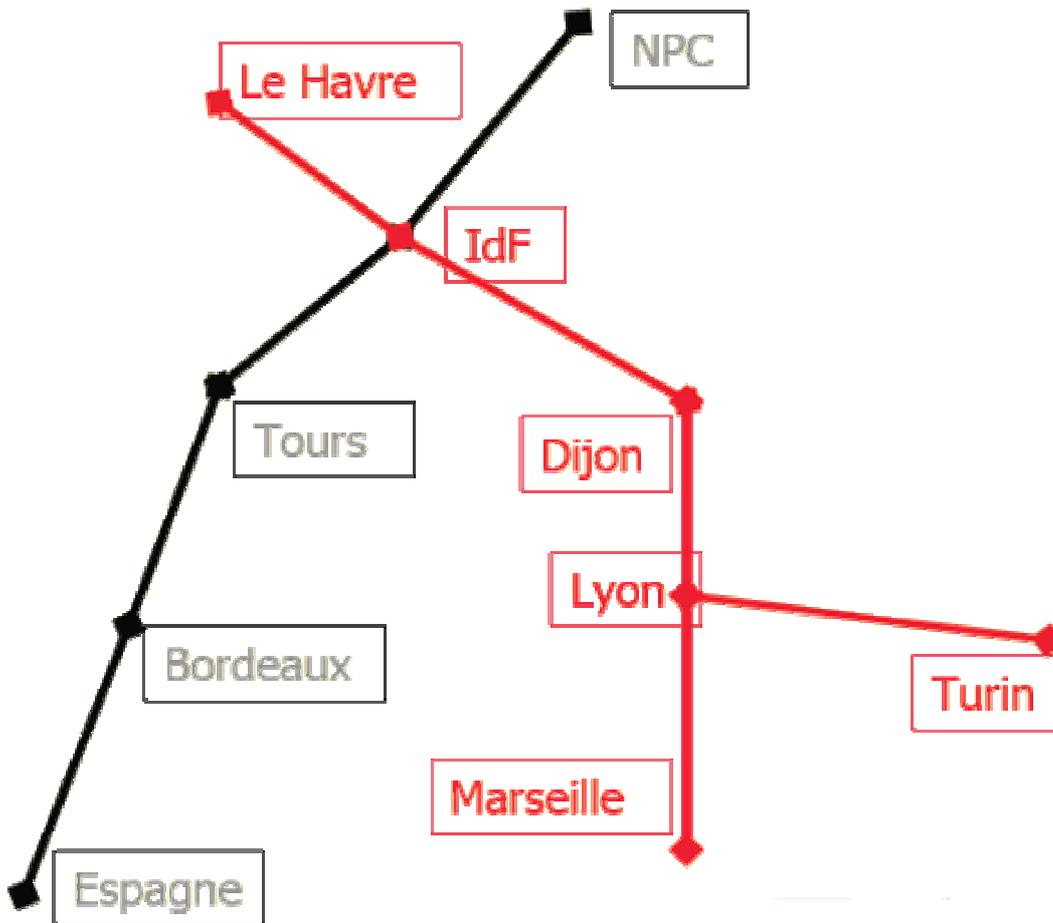


Figure 81 : Représentation du scénario 4 (Interconnections)

## 8.3.2 EVALUATION DES SCENARIOS

### 8.3.2.1 Préambule

Améliorer l'efficacité économique de l'offre ferroviaire est la préoccupation à l'origine de la réflexion sur le système de transbordement R-S-R. Le diagnostic initial est en effet d'emblée situé sur ce terrain économique. Il part de l'hypothèse selon laquelle, pour améliorer sensiblement le bilan économique du transport ferroviaire, il est nécessaire d'augmenter radicalement la productivité du matériel roulant. Ce n'est qu'ensuite, pour répondre à cette exigence et par analogie avec les processus mis en œuvre dans l'industrie, qu'est venue l'idée de simplifier au maximum les opérations d'embarquement/débarquement des charges sur le train en « délocalisant » leur chargement sur un support standard en amont de l'arrivée du train. Ce cheminement du processus d'innovation est suffisamment original pour être souligné. Qu'il soit le fait d'« inventeurs » opérant en dehors d'un cadre d'entreprise n'est peut-être pas si paradoxal qu'il y paraît. Dès lors, il n'est pas surprenant que la réflexion sur le concept technique R-S-R ait immédiatement été doublée d'une validation économique. Celle-ci a été réalisée à l'aide d'une feuille de calcul qui s'est progressivement étoffée pour prendre en compte les différents paramètres qui apparaissent influencer sur le bilan économique du système. Le simulateur STEF a donc été développé en parallèle avec le développement du concept technique. C'est dans ce contexte que le Laboratoire d'Economie des Transports a été amené à intervenir, dans le cadre de la présente étude inscrite au PREDIT, pour vérifier la faisabilité économique de la solution R-Shift-R. Cette intervention n'est pas celle d'un censeur extérieur au projet qui viendrait consacrer ou au contraire anéantir l'idée de concepteurs mal introduit dans le milieu technico-décisionnel des transports. Au contraire, la démarche engagée s'est voulue active, impliquée dans le développement d'un concept qui est fortement évolutif et non pas figé. Elle s'est voulue également libre de toute considération d'intérêt : l'avenir du LET n'est aucunement dépendant de la poursuite ou non de R-S-R ; la solution de ferroutage que ce système pourrait constituer n'est ni bonne ni mauvaise en soi mais doit être appréciée au regard de sa pertinence industrielle et économique ; nous n'avons ni mission ni intention de protéger ou d'attaquer aucun acteur qui pourrait se trouver dans l'aire d'influence de ce système. Ceci étant précisé, notre démarche de travail a d'abord été de comprendre le fonctionnement du simulateur STEF. Très rapidement, il est apparu que si les nombreuses hypothèses de calcul méritaient d'être vérifiées et validées, la feuille de calcul existante fournissait un outil intéressant, qui devait être enrichi, complété et précisé, mais pouvait servir de base de travail. Divers modules, fonctionnalités et paramétrages ont donc été ajoutés à mesure de l'avancée de l'étude, par Jean-Pierre Desmoulins, puis par le LET quand notre degré de maîtrise de l'outil est devenu suffisant. Il faut reconnaître que nous sommes arrivés aujourd'hui aux limites de ce qu'il est raisonnable de mettre en œuvre avec un outil de programmation tel que le tableur Excel. STEFv2.0, avec ses 24 onglets, l'enchaînement des étapes de calcul, le passif des variables qui ont été créées puis sont devenues obsolètes est devenu un outil dont la fiabilité d'utilisation a été testée, mais pour lequel toute tentative d'évolution est désormais coûteuse en temps de travail et en risque d'erreur. Dès à présent, l'utilisation de STEFv2.0 pour simuler le fonctionnement d'un réseau de desserte R-S-R constitué de deux services interconnectés (un axe N-S passant par Lyon et un axe Lyon-Turin par exemple) relève du « bricolage ». Pour une étape ultérieure, la programmation sur un outil et dans un langage logique adapté d'une nouvelle version qui pourra reprendre l'essentiel des fonctionnalités de la v2.0 sera nécessaire.

### 8.3.2.2 Présentation systématique de STEFv2.0

La présentation qui suit sera linéaire, reprenant ainsi pour l'essentiel la logique de la feuille de calcul. Les différents onglets constitutifs sont passés en revue, en précisant la nature des calculs qu'ils contiennent, les hypothèses et la source des données qu'ils intègrent et les éventuels choix qu'ils offrent à l'utilisateur.

#### 8.3.2.2.1 Onglet « Route »

L'onglet « Route » est le premier onglet véritablement constitutif de la simulation. Comme son nom l'indique, il fixe les paramètres économiques du transport routier. Ses résultats seront utilisés afin de reconstituer non seulement les coûts d'un acheminement routier alternatif à l'emprunt de R-S-R, mais aussi le coût des pré et post acheminement routier en cas d'utilisation de R-S-R. Ces coûts routiers ont été établis sur la base des éléments diffusés par le Conseil National des Transport. Enfin, quelques paramètres ont été introduits pour prendre en compte les coûts (hors pré et post-acheminements) induits par l'usage de R-S-R (immobilisation du véhicule et du chauffeur, coût « logistique » de gestion d'une semi-remorque non-accompagnée).

On notera que trois types de véhicules différents sont considérés :

- Les porteurs isolés
- Les ensembles tracteur + semi-remorque
- Les ensembles routiers porteur + remorques

La prise en compte des coûts de gestion d'une semi-remorque isolée permettra d'ajouter ce quatrième segment, absolument essentiel, au marché potentiellement captable par R-S-R.

#### 8.3.2.2.2 Onglet « Mat-roul »

L'onglet « Mat-roul » reprend les caractéristiques des rames ferroviaires constitutives du système R-S-R. Les autres volets de la recherche donnent des explications détaillées sur la conception spécifique de ce matériel. Rappelons simplement que le matériel R-S-R est constitué de wagons doubles, reposant sur trois bogies. Chaque wagon comprend deux unités de chargement (dénommées « unité de transport de fret » ou « UTF »). Les wagons sont assemblés en « rames » autonomes.

Dans certaines configurations, chaque wagon est motorisé ce qui dispense de l'utilisation d'une locomotive. La rame est alors conduite par un « élément de tête » qui est essentiellement une cabine de conduite. On parle alors de « motorisation répartie ». En l'absence de motorisation répartie, l'élément de tête, qui assure aussi la traction de la rame est une locomotive ordinaire. Une autre option de configuration est la mise en place d'un système permettant d'abaisser le niveau de la charge pour aider par exemple au franchissement d'un tunnel de gabarit limité. Ce système dit de « monte et baisse », décrit en détail dans la partie technique de cette étude, permet alors d'accepter dans le gabarit ferroviaire B1 des véhicules routiers de 4,20 m de hauteur, soit la quasi totalité du trafic routier. En l'absence du système de « monte et baisse » (MB), R-S-R est limité soit aux futurs axes à grand gabarit (tels la future liaison Lyon-Turin), soit à la part du trafic routier dont la hauteur ne dépasse pas 4m. Cette part est déterminée à l'onglet « Flux-dist ».

Chaque rame RSR comprend en outre une « unité de service », qui est un wagon de voyageur destiné à l'accueil des chauffeurs accompagnant leur véhicule. Une rame RSR est donc composée d'un élément de tête, d'une unité de service et d'un nombre qui peut varier d'ensembles de deux UTF accouplées.

L'onglet « Mat-roul » reprend d'abord des paramètres généraux modifiables par l'utilisateur.

Le coefficient technique d'adhérence demeure cependant lié au principe « roues en acier sur rails en acier ». La longueur des rames est tributaire des caractéristiques techniques du réseau (espacement de la signalisation, longueur des voies d'évitement,...). Une longueur de 750m est généralement admise sur le réseau principal en France. L'accouplement de deux rames pour former des trains de 1500m, comme il est envisagé sur certains grands axes en Europe, peut être simulé. La charge maximale sur une UTF doit être supérieure ou égale à la masse du chargement le plus lourd admissible, dans notre cas un porteur, une remorque un tracteur, une semi-remorque ou un conteneur de 20'. Cette charge, à laquelle il faut ajouter la tare de l'UTF, repose sur 3 essieux (3 bogies de 2 essieux par ensemble de 2 UTF). Pour les simulations, la vitesse maximale des rames R-S-R a été fixée à 120 km/h, néanmoins, la feuille de calcul permet de modifier ce paramètre, dans une certaine mesure (de 80 à 130 km/h), en imputant aux paramètres de coûts d'achat et de maintenance un coefficient d'évolution selon la vitesse (voir ligne 120 et suivantes).

L'onglet « Mat-roul » permet ensuite à l'utilisateur de choisir parmi quatre configurations du matériel roulant R-S-R :

- RSR1 correspond à la configuration « complète », intégrant la motorisation répartie et la fonctionnalité de « monte et baisse (MB).
- RSR2 désigne une rame à motorisation répartie, mais sans MB.
- RSR3 correspond à la version la plus simple : sans motorisation répartie et sans MB.
- RSR4 désigne une rame sans motorisation répartie, mais avec la fonctionnalité MB.

Une occurrence « Mod » permet le cas échéant à l'utilisateur de simuler toute autre configuration de son choix. Les lignes 19 à 39 donnent les paramètres techniques spécifiques des différentes configurations. Le tableau suivant (lignes 41 à 47) précise la valeur des coefficients d'évolution des différents coût d'achat et de maintenance des éléments de tête, des UTF et des unités de service selon la vitesse. Les coût eux-mêmes, estimés sur la base d'un matériel capable de rouler à 130 km/h figurent dans le tableau des lignes 49 à 56. Ils ont été estimés par les études techniques et à partir de nombreuses discussions avec des spécialistes du matériel roulant. Le reste de la feuille de calcul est occupé par la détermination des paramètres techniques et économiques en fonction de la configuration RSR et de la vitesse maximale retenues.

#### 8.3.2.2.3 Onglet « Liaisons »

Cet onglet décrit l'itinéraire de desserte R-S-R que l'on souhaite tester. STEF v2.0 permet de simuler un axe continu, comprenant au plus 12 points de dessertes. Il est possible de « supprimer » des gares intermédiaires. La grandeur caractéristique de l'itinéraire est donc la distance entre chaque gare successive. Chaque gare intermédiaire comporte 2 quais d'embarquement/débarquement, un dans le sens « montant », l'autre dans le sens « descendant ». Les gares d'extrémité ne comportent qu'un seul quai.

#### 8.3.2.2.4 Onglet « Gares »

Toutes les « demies gares » du système R-S-R ont les mêmes caractéristiques principales : installation en déviation de la voie principale, équipée d'un quai d'embarquement/débarquement des praticables sur les trains et d'alvéoles de chargement/déchargement des véhicules sur les praticables.

Dans STEF v2.0, la première caractéristique modulable est le taux d'équipement de la gare, c'est-à-dire la proportion des emplacements d'UTF qui recevront un équipement d'embarquement/débarquement. Ce paramètre, qui permet d'optimiser l'équipement d'une gare peu utilisée en réduisant le niveau, est cependant à utiliser avec prudence car le non équipement d'un emplacement induit une complexité dans la gestion en amont des positions d'embarquement sur les trains. Il ne s'agira donc pas d'ajuster le taux d'équipement de chaque demie gare à l'exacte capacité nécessaire.

Le taux d'équipement d'une demie gare détermine en effet directement la capacité de cette gare. Il convient seulement de prendre en compte un coefficient d'utilisation moyenne maximale des installations. A travers ce coefficient, il s'agit de prendre en compte la variabilité de la demande. Nous raisonnons en effet sur des valeurs moyennes de trafics qui, justement parce qu'elles sont moyennes, ne sont pas atteintes certains jours et sont au contraire dépassées d'autres jours. On fixe souvent ce coefficient à 85%.

L'onglet précise ensuite les caractéristiques techniques des gares telles que les vitesses d'entrée et sortie des trains, les vitesses d'embarquement/débarquement et les temps de pré-positionnement. Le choix de ces caractéristiques influe en partie sur le coût des équipements à mettre en œuvre pour obtenir les performances ainsi définies. Après divers essais, nous avons retenu un jeu de valeur fixe. Si l'utilisateur désire tester des performances différentes en matière de temps d'opération, il devra également se préoccuper de faire varier le paramètre économique associé : « Pxbasgar ».

L'onglet « gares » calcule enfin les coûts d'investissement et de fonctionnement des gares simulées. Les coûts d'investissements ferroviaires incluent les raccordements amont et aval de la demi-gare à la ligne principale qui la dessert et l'équipement spécifique à R-S-R. Les coûts de maintenance annuels ont été estimés forfaitairement à 8% du coût de l'investissement. Ce paramètre peut-être modifié.

#### 8.3.2.2.5 Onglet « Offre »

L'onglet « Offre » fixe d'abord la fréquence (en fait, l'écart entre deux trains successifs) de desserte R-S-R visée. Cette fréquence est ensuite comparée à l'espacement minimal entre deux trains successifs permis par le niveau de performance des gares. La fréquence visée ne sera prise en compte que si elle est rendue possible par l'équipement des gares. Sinon, c'est la performance des gares qui plafonnera la fréquence. L'onglet fixe ensuite l'amplitude journalière et annuelle du service, ainsi que le taux de remplissage moyen admissible pour tenir compte de la variabilité de la demande.

Il précise en troisième lieu le tarif pratiqué sur le service R-S-R. Le tarif est décomposé en un coût de transbordement d'une part et d'un coût d'acheminement par UTF au km. Le coût de transbordement est différencié suivant les types de véhicule à charger pour tenir compte de leur manœuvrabilité et de leur autonomie. Il tient compte en particulier de la mise en œuvre de camions-jockeys pour manœuvrer les semi-remorques non-accompagnées.

L'onglet calcule ensuite la matrice OD des temps de trajet hors attente (L38-52) puis la matrice OD des temps totaux passés par le client dans le système R-S-R (L54-68), incluant, outre le temps de trajet, le temps de prise en charge et le temps d'attente.

Ensuite, pour les quatre types de véhicules routiers pris en compte (porteurs isolés, véhicules articulés, ensembles routiers et semi-remorques seules), l'onglet calcule par OD le prix du prix pour un acheminement par R-S-R, le coût ferroviaire indirect (c'est-à-dire le coût d'immobilisation du véhicule dans le système) puis par addition le coût total de l'acheminement par R-S-R.

#### 8.3.2.2.6 Onglet « Flux-Dist »

Il précise les caractéristiques des flux routiers visés par R-S-R. La première variable donne la composition du trafic entre porteurs isolés, véhicules articulés et ensemble routiers. Cette composition est considérée uniforme sur l'ensemble des OD, ce qui est évidemment simplificateur. Cela étant, la prépondérance des véhicules articulés en France atténue la portée de cette simplification. L'utilisateur doit ensuite préciser la proportion de semi-remorques (véhicules articulés) qui voyageraient sur R-S-R en mode non-accompagné. Nous avons choisi une valeur de 80% qui peut paraître élevée (et peut être modifiée) pour tenir compte d'une hypothèse de banalisation de ce type de service et donc de la forte capacité des opérateurs routiers à s'organiser de manière efficace pour assurer les pré et post-acheminement des semi-remorques isolées.

Un dernier paramètre fixe la proportion du trafic susceptible d'être acceptée dans le gabarit autorisé par R-S-R. Cette proportion varie selon les versions de R-S-R testées (avec ou sans dispositif de monte et baisse). Notons que sur les services actuellement envisagés d'autoroutes ferroviaires en gabarit B1, la proportion de trafic routier qui pourrait être admis est encore largement débattue (après avoir été longtemps ignorée). Les campagnes de mesures récentes de RFF semblent établir un seuil très important autour d'une hauteur de véhicule routier située entre 4m et 4,05m. Les versions 1 et 4 de R-S-R peuvent être considérées comme acceptant la quasi totalité du trafic (on retiendra 95%) alors que les versions 2 et 3 semblent limitées à environ 25% du trafic.

L'onglet « Flux-dist » intègre ensuite une matrice OD de flux routiers interrégionaux en France (Alsace, Aquitaine, Auvergne, Bourgogne, Bretagne, Basse Normandie, Centre, Champagne Ardennes, Franche-Comté, Haute Normandie, Ile de France, Languedoc Roussillon, Limousin, Lorraine, Midi-Pyrénées, Nord - Pas de Calais, PACA, Pays de la Loire, Picardie, Poitou-Charentes, Rhône-Alpes). Cette matrice inclut par ailleurs les échanges entre la France et différents pays Européens (Allemagne, Belgique, Luxembourg, Pays-Bas, Italie, Espagne (flux Biriadou et Perthuis), Grande-Bretagne). C'est cette matrice qui sera ensuite utilisée pour la totalité des calculs. La matrice (L11-42) reprend les trafics PL annuels. La matrice suivante (L44-76) fixe les distances routières par OD. Elles sont habituellement mesurées depuis ou vers les capitales régionales. Pour les trafics d'échange et de transit, des grands pôles émetteurs ont été retenus (Cologne et Francfort pour l'Allemagne, Bruxelles, Luxembourg et Rotterdam au Benelux, Milan en Italie, Vittoria et Barcelone en Espagne et Calais, au débouché du tunnel transmanche pour la Grande-Bretagne). Ces distances par OD sont ensuite utilisées pour calculer le coût par OD des acheminements routiers selon le type de véhicule (porteurs isolés L79-111, véhicules articulés L114-146 et ensembles articulés L149-181).

#### 8.3.2.2.7 Onglet « Affect »

Dans cet onglet, chaque OD prise en compte est associée à un trajet R-S-R. L'affectation se fait « à la main », d'abord en choisissant, pour chaque OD, la gare d'entrée dans le système (souvent la gare la plus proche de l'origine, en tenant compte de la direction générale de l'OD), puis la gare de sortie du système (en fonction de la distance à la destination).

Dans une seconde étape, le tableur forme les couples de gares d'entrée et de sortie pour chaque OD (L69-101). Si la gare d'entrée est identique à la gare de sortie, la case reste vide.

#### 8.3.2.2.8 Onglet « Dist pré-post »

Cet onglet rassemble par OD les distances de pré-acheminement (de l'origine vers la gare d'entrée dans le système) et de post-acheminement (de la gare de sortie du système jusqu'à destination) dans le cas trajet utilisant R-S-R.

#### 8.3.2.2.9 Onglet « Coût RSR »

Cette feuille de calcul opère par type de véhicule pour établir le coût de l'acheminement ferroviaire par R-S-R (affectation du coût ferroviaire entre gares par type de véhicule calculé à l'onglet « Offre »), puis le coûts des pré et post-acheminements routiers impliqués par le trajet. Par addition des 2 matrices, on obtient le coût total d'un acheminement par RSR.

#### 8.3.2.2.10 Onglet « Marché »

Cet onglet permet de préciser la fonction de partage modal que l'on va utiliser. L'utilisateur peut choisir entre plusieurs « modèles » qui demeurent très simples (variable « Hyptaux »). Les valeurs « Haut », « Moy », « Bas » et « Log » renvoient à des fonctions qui relient la part de marché captée par R-S-R au rapport coût ferroviaire/coût routier. Les 3 premières sont des fonctions par morceaux. « Haut » par exemple, est définie par une part de marché de R-S-R maximum de 90% atteinte pour un ratio des coûts fer/route inférieur ou égal à 80%, une part de marché minimum de 0% dès que le ratio coûts fer/route dépasse 95% et une évolution linéaire de la part de marché entre ces deux valeurs. La valeur « Log » que nous utiliserons pour éviter les effets de seuil trop brutaux renvoie à une fonction logistique définissant une part de marché maximum de 85%. La valeur « Manu » renvoie à une matrice de part modales de R-S-R par OD (L42-74).

Les entretiens avec les opérateurs de transport ont mis en évidence qu'ils attendaient d'un système de ferroulage non seulement qu'il offre un niveau de performance globale, et notamment de fiabilité, au moins équivalent à celui de la route, mais aussi qu'il soit accessible pour un coût significativement inférieur à celui de la route. Cette revendication d'un coût inférieur n'est pas seulement l'expression d'une position stratégique de négociation. Elle répond aussi à la perception par les opérateurs du risque qu'il y a pour eux à modifier en profondeur l'organisation de leurs acheminements en intégrant au sein de la chaîne un élément qui sera toujours moins souple qu'un relais traction routier habituel. Dans le même temps, il convient de ne pas surestimer les difficultés d'intégration d'un maillon d'autoroute ferroviaire au sein de chaînes d'acheminements routiers qui évoluent déjà largement vers une structure séquentielle de maillons autonomes et dont les opérateurs ont prouvé leur capacité d'adaptation. Au total, il nous semble qu'une fonction de partage modal qui attribue encore

50% du marché à la route lorsque le coût de l'acheminement concurrent par autoroute ferroviaire représente 75% du coût routier est une hypothèse prudente.

#### 8.3.2.2.11 Onglet « CalcPart »

Sur la base de la fonction de répartition modale retenue à l'étape précédente, cet onglet calcule pour chaque OD et pour chaque catégorie de véhicule les parts de marché résultant du rapport entre le coût de l'acheminement ferroviaire (calculé à l'onglet « Coût RSR ») et le coût de l'acheminement routier (calculé à l'onglet « Flux-dist »).

#### 8.3.2.2.12 Onglet « Trafic pot. »

Les parts de marchés calculées à l'onglet précédent sont ensuite directement appliquées à la matrice des flux (onglet « Flux-dist »), en tenant compte de la part de trafic que représente chaque type de véhicule. Il s'agit donc à cette étape d'un trafic potentiel de R-S-R, ignorant en particulier toute contrainte de capacité.

#### 8.3.2.2.13 Onglet « Traf. pot. gare »

Cet onglet ré agrège les trafics potentiels par OD de l'étape précédente sur le réseau R-S-R. Cette opération s'effectue en s'appuyant sur l'affectation de chaque OD à un trajet sur le réseau R-S-R qui avait été réalisée à l'onglet « Affect ». On obtient donc un trafic potentiel à chaque gare et sur chaque tronçon du réseau R-S-R, toujours sans contrainte de capacité.

#### 8.3.2.2.14 Onglet « trafic réel gare »

Cette feuille introduit les contraintes de capacité du système. Elle plafonne donc le trafic réel à la capacité moyenne du système, c'est-à-dire la capacité théorique abattue d'une pondération (en général de 85%, voir onglets « XX » et « YY ») pour rendre l'impossibilité d'avoir un taux de remplissage moyen de 100% en situation de demande fluctuante d'un jour à l'autre.

Si le trafic potentiel calculé est inférieur à la capacité du système, cette valeur est donc acceptée. Si, au contraire, le trafic potentiel est supérieur à la capacité du système, il est écrêté. La demande non satisfaite est répartie sur les 4 segments pris en compte (porteurs isolés, véhicules articulés, ensembles routiers et semi-remorques non accompagnées). Les proportions initiales de chaque segment dans le trafic total sont conservées et chaque segment perd une part de son trafic potentiel.

Ensuite (L79-113), l'onglet effectue une vérification de la capacité au niveau de chaque gare en tenant compte des opérations d'embarquement/débarquement.

#### 8.3.2.2.15 Onglet « Exploit »

L'onglet « Exploit » calcule les coûts d'exploitation du système R-S-R. Il s'appuie sur une estimation des coûts de conduite à travers les trois paramètres suivants : coût salarial, durée du travail, part du temps de conduite dans le temps de travail.

Il prend également en compte le péage d'infrastructure selon un barème simplifié, mais proche de celui de RFF. Il reprend encore les coûts de maintenance des trains déterminés à l'onglet « Mat-roul », les coûts d'exploitation et les coûts de maintenance des gares et des frais de structure portant sur un pourcentage de l'ensemble des coûts d'exploitation.

Enfin, on calcule les recettes d'exploitation à partir du trafic réel et des tarifs déterminés à l'onglet « Offre ».

#### 8.3.2.2.16 Onglet « Bilan »

L'onglet « Bilan » précise d'abord les conditions d'amortissement des investissements à réaliser : les gares, l'acquisition des trains, l'acquisition des praticables. On a retenu une durée d'amortissement de 20 ans pour les gares et les trains, et une durée de 8 ans pour les praticables.

On mène ensuite une analyse coûts-avantages classique qui consiste à établir le bilan non-actualisé de l'opération année après année en soustrayant aux recettes d'exploitation annuelles les coûts d'exploitation annuels et les investissements de chaque année. Ces bilans annuels sont dans un second temps actualisés, c'est à dire que l'on calcule leur équivalent à l'année de référence (on a pris ici la première année d'exploitation du projet). On peut alors calculer la Valeur Actuelle Nette du projet, en sommant simplement les bilans annuels actualisés. On a choisi ici de mener le calcul du bilan sur 25 ans (mais la prise en compte de valeurs résiduelles des investissements rend le résultat en grande partie indépendant de ce choix).

La VAN du projet obtenue avec un taux d'actualisation de 4% est le premier indicateur que l'on retient. En simplifiant, si elle est positive, alors le projet pourra supporter des coûts de financement de 4% au moins. La comparaison de la VAN de différentes versions permettra de déterminer la viabilité financière respective de ces différentes versions.

Il convient de noter que la VAN est calculée en intégrant un niveau de péage équivalent à celui appliqué aujourd'hui par RFF. En revanche, elle n'intègre pas les éventuels investissements d'infrastructure qui pourraient être rendus nécessaires par la circulation.

A partir de la VAN, on calcule aussi le Taux de Rentabilité Interne du projet. Il s'agit du taux d'actualisation qui annule la VAN. Il indique ainsi directement le niveau de coût financier que le projet peut supporter. VAN et TRI sont deux indicateurs très proches, mais pas équivalents : le TRI est sensible à la répartition dans le temps des coûts et des avantages du projet.

L'onglet « Bilan » intègre en outre un tableau permettant de simuler d'une part une variation des tarifs de R-S-R (mesure de la sensibilité au tarif et recherche d'un optimum tarifaire) et d'autre part un abattement du trafic par rapport à celui estimé par la feuille de calcul. Ce coefficient d'abattement permet de calculer le point d'équilibre du dispositif R-S-R testé (il suffit de déterminer la valeur d'abattement qui annule la VAN). En réalité, ce calcul donne une évaluation pessimiste du point d'équilibre puisqu'il affecte les recettes sans affecter les coûts d'exploitation qui, en toute rigueur, dépendent aussi pour une certaine part du trafic.

#### 8.3.2.2.17 Onglet « km évités »

Sans réaliser un bilan socio économique complet, nous avons jugé utile de compléter le bilan par un calcul des km routiers évités par la mise en œuvre du système R-S-R testé. Ces km évités peuvent ensuite donner lieu à une valorisation économique.

### 8.3.2.3 La simulation économique du fonctionnement d'un service R-shift-R

L'objet de cette partie est de simuler d'un point de vue économique un projet de service R-S-R sur différents axes. On présentera d'abord les principales hypothèses de simulation avant de détailler les résultats des simulations et de conclure sur la pertinence de R-Shift-R.

#### 8.3.2.3.1 Les hypothèses de simulation

Toutes les simulations sont réalisées autour d'un jeu d'hypothèses de base que l'on peut rappeler ici, sachant que beaucoup d'entre elles sont paramétrables et feront l'objet d'essais de variation.

##### 8.3.2.3.1.1 Caractéristiques de la demande

Rappelons d'abord les trois types de véhicules routiers pris en compte :

- Les porteurs isolés
- Les ensembles tracteur + semi-remorque
- Les ensembles routiers porteur + remorques

Leur répartition dans le trafic est considérée comme invariante, quelle que soit l'OD considérée.

10%	Pourcentage de la demande en porteurs isolés
5%	Pourcentage de la demande en ensembles routiers
85%	Pourcentage de la demande en véhicules articulés
80%	Pourcentage de véh. art. dont la semi-rem. voyage seule sur RSR

La répartition du trafic routier selon le gabarit des véhicules (notamment concernant le gabarit de hauteur) est également considérée comme invariable. En fonction des caractéristiques du système R-S-R, on retient le pourcentage du trafic routier accepté sur R-S-R suivant :

RSR1	RSR2	RSR3	RSR4
95%	25%	25%	95%

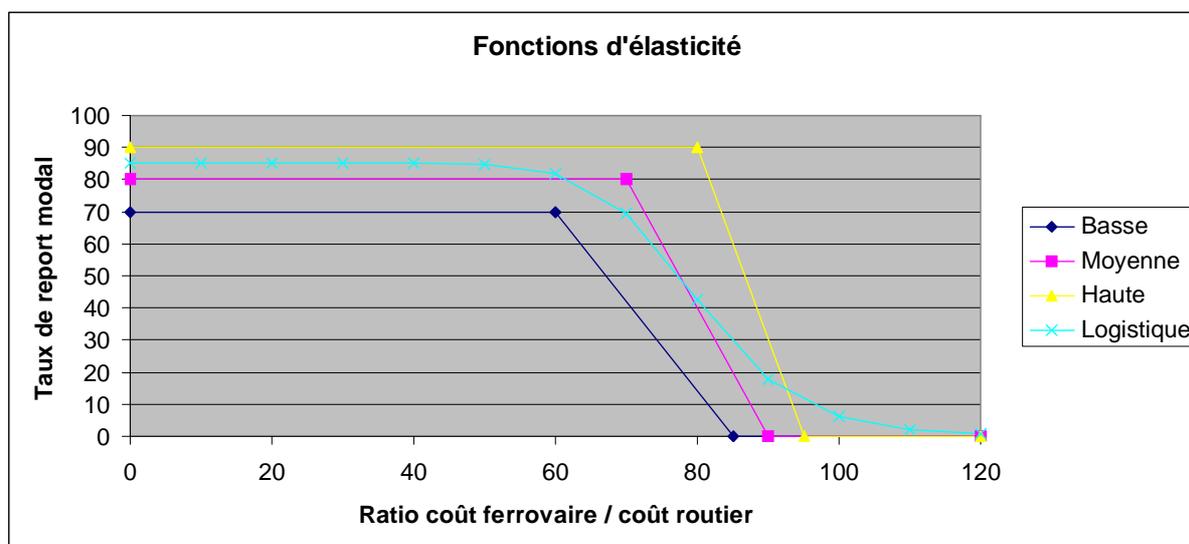
Rappelons enfin que le trafic routier est donné par OD selon une matrice interrégionale pour le trafic intérieur français à laquelle ont été ajoutés les pays voisins, tant pour le trafic d'échange que pour le transit.

Les variables économiques fixant les coûts du transport routier ont été calculées à partir des données fournies par le CNR. Elles sont résumées dans le tableau suivant :

Coûts kilométriques des différents véhicules			
Pktci	1,08	E / km	Coût kilométrique total (porteur isolé)
Pktca	1,04	E / km	Coût kilométrique total (véhicule articulé)
Pktce	1,18	E / km	Coût kilométrique total (ensemble routier)

Coûts supportés par les transporteurs si ferroutage			
Clgrs	60	E	Coût logistique d'une semi-remorque voyageant seule
Cd	14	E / h	Coût chauffeur à disposition en train (court trajet)
Cr	4	E / h	Coût chauffeur au repos en train (long trajet)
CfhPi	35,5	E / h	Coût fixe horaire d'un porteur isolé
CfhTr	15,3	E / h	Coût fixe horaire d'un tracteur
CfhSR	5,1	E / h	Coût fixe horaire d'une semi-remorque
CfhER	19,3	E / h	Coût fixe horaire d'un ensemble routier

Le partage modal, considéré comme déterminé par le rapport des coûts ferroviaires et routiers, est déterminé par la fonction « logistique » représentée sur le graphique suivant :



### 8.3.2.3.1.2 Hypothèses du système R-Shift-R

On ne rappellera pas ici les caractéristiques techniques du système, sauf pour mentionner les 4 versions qui feront l'objet des simulations :

- RSR1 = motorisation répartie et fonctionnalité de « monte-et-baisse » (MB).
- RSR2 = motorisation répartie, mais sans MB.
- RSR3 = sans motorisation répartie et sans MB.
- RSR4 = sans motorisation répartie, mais avec MB.

Sans la fonctionnalité de « monte-et-baisse », on considère que R-S-R n'accepte que les véhicules de hauteur ne dépassant pas 4m sur un réseau ferroviaire au gabarit B1. Avec le système MB, R-S-R accepte dans le gabarit B1, les véhicules jusqu'à 4,2m.

La prise en compte des limites de capacité du système intègre la contrainte de variation de la demande à travers un taux moyen maximum d'utilisation des capacités :

TrMax	85%	Taux de remplissage moyen maximum
TuMax	85%	Taux moyen maximal d'utilisation de la capacité d'une gare

Les tarifs appliqués à l'offre R-S-R seront évidemment modifiés au cours des simulations. On peut cependant illustrer l'hypothèse de départ retenue :

Prix des billets			
Bilfi	30	E	Transbordement pour un porteur isolé
Bilfae	40	E	Transbordement pour un véhicule articulé ou E.R.
Bilfsr	60	E	Transbordement d'une semi-remorque sans tracteur
Bilkm	0,55	E/km	Prix au km pour une UTF

La suite de ce chapitre présente plusieurs simulations réalisées pour les scénarios étudiés, pour rappel :

- Un axe Nord-Sud de Lille à la frontière espagnole (Hendaye) ;
- Un axe Nord-Sud du Havre à Marseille, donc entre deux grands ports maritimes ;
- Un itinéraire de franchissement d'un obstacle naturel entre Lyon et Turin ;
- Une combinaison des deux axes précédents avec une connexion à Lyon entre la desserte Nord-Sud et l'axe transalpin.

### 8.3.2.3.1.3 Distance minimale de pertinence du service R-Shift-R

Avant de débiter la simulation d'un service RSR aux caractéristiques précises de fréquence et de points de desserte, il est intéressant de préciser le domaine de pertinence économique d'un tel service. On va donc déterminer la distance à partir de laquelle le coût d'un acheminement par RSR devient inférieur au coût d'un acheminement routier.

On mènera le calcul pour ce qui constitue le « cœur de cible » d'un service de ferroutage : l'acheminement de semi-remorques non-accompagnées.

Le calcul du coût de l'acheminement routier est immédiat dans STEF, puisque nous y disposons d'un coût kilométrique total établi à partir des données diffusées par le Conseil National des Transports (valeur octobre 2007). Pour un ensemble tracteur+semi, ce coût ressort à 1,04 €/km.

Pour un acheminement par RSR, les éléments constitutifs du coût sont plus épars. On a déjà le prix au km parcouru, fixé dans l'hypothèse de base à 0,55 €/km pour une UTF, donc une

semi-remorque non accompagnée. Il faut ajouter le coût fixe de prise en charge et de transbordement de la remorque à acheminer : 60€ sebn l'hypothèse de base. STEF intègre aussi un coût logistique de gestion de cette semi-remorque qui voyage seule. Ce coût correspond à l'organisation des pré- et post-acheminement par le client. Il est estimé à 60€ par remorque. Il convient encore d'ajouter le coût de ces pré- et post-acheminement routier. Dans STEF, lorsque la région d'origine ou de destination est desservie par un terminal RSR, on considère une distance forfaitaire de pré/post-acheminement de 50 km, soit  $2 \cdot 50 \cdot 1,04 = 104$  €. On peut rappeler ici en contrepoint que la distance de l'acheminement routier retenue est la distance réelle entre les capitales régionales. Enfin, STEF prend en compte le coût fixe horaire de la remorque qui a été calculé à 5,10 €/h. Il s'applique au temps passé dans le système en incluant le temps de circulation et le temps d'attente, de transaction et d'embarquement/débarquement.

Avec l'ensemble de ces éléments, il est possible de calculer la distance qui égalise les coûts routiers et RSR. Le tableau suivant récapitule ces éléments et présente le résultat de ce calcul :

cout logistique	60,00
cout transbordement	60,00
immobilisation	25,94
nb arret	1
distance	508
pré-post achem	104,23
C km RSR	0,55
C km route	1,04
C route	529,69
C RSR	529,69
Diff	0,00

La distance d'équilibre entre les coûts routiers et RSR s'établit donc autour de 500 km compte tenu des hypothèses retenues ici. Cette distance s'explique par l'importance des coûts fixes (non liés à la distance parcourue), induits par l'utilisation de RSR : coûts de transbordement, coûts logistiques et coûts de pré/post-acheminement représentent 224 €, soit 215 km routiers. A titre d'illustration, la réduction de moitié des coûts logistiques de gestion des remorques non-accompagnées permet d'abaisser le seuil d'équilibre des coûts totaux d'acheminement à 440 km.

Il convient en outre de rappeler qu'avec la fonction logistique de répartition modale utilisée ici, cet équilibre des coûts aboutit à une part de marché pour le service RSR de 6%. Avec les fonctions – par morceaux – proposées par STEF, cette part de marché est nulle. Avec la fonction logistique, il faut que le coût total de l'acheminement par RSR ne représente que 75% du coût routier pour que RSR atteigne une part de 50%. Sur un itinéraire desservi par RSR, cette valeur correspond à une distance de 1200 km.

Ce calcul permet, outre son résultat, d'apprécier la prudence des hypothèses à partir desquelles vont être menées les simulations qui suivent.

### 8.3.2.3.2 Scénario 1 : simulation d'un axe Lille-Hendaye

L'axe Lille-Hendaye simulé s'allonge sur 1000 km environ et comprend trois arrêts intermédiaires, à Paris, Tours et Bordeaux.

Lille	0
Paris	220
Tours	460
Bordeaux	795
Hendaye	1011

#### 8.3.2.3.2.1 Evaluation de la performance de la version système RSR1 sur l'axe Lille-Hendaye

Rappelons que la version RSR1 désigne la version la plus complète du système R-S-R. Elle inclut la motorisation répartie et la fonctionnalité de « monte et baisse » (MB). Il s'agit donc aussi de la version du matériel roulant la plus onéreuse.

##### 8.3.2.3.2.1.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Avec les hypothèses de travail standard retenues en matière de prix et de fréquence, on obtient les résultats suivants :

VAN (4%)	4072	M€
TRI	26,50%	
Véh. Emb/j	6045	

La valeur actuelle nette calculée ici est celle du bilan économique du projet, intégrant les coûts d'investissement en matériel roulant et en installations de gare, les coûts d'exploitation d'un service R-S-R de fréquence élevée et les recettes de trafic générées par ce service. Ce bilan ne prend donc en compte que les éléments directs strictement financiers du projet, à l'exclusion de tout élément monétarisé (gain de temps des usagers, bilan environnemental ou de sécurité) ou extérieur au strict périmètre du projet (bilan monétaire des usagers du transport, de la puissance publique, etc.) qui forment le bilan socio-économique qui n'est pas calculé ici.

Le montant calculé de la VAN est important puisqu'il dépasse les 4 milliards d'euros. Il convient de rappeler ici qu'il a été calculé en considérant que les infrastructures nécessaires à la circulation des fréquences de services simulées sont disponibles. Cette hypothèse est bien entendu tout à fait irréaliste. Sans aller plus loin dans cette voie, on peut seulement souligner ici que les 4 milliards apparaissant à l'actif du bilan du projet sont, plutôt qu'un bénéfice du projet, un capital potentiel pour réaliser les aménagements d'infrastructure nécessaires. Il s'agit d'une part de financer les travaux de libération du gabarit bas des voies, là où R-S-R en version 1 devrait circuler en configuration abaissée. D'autre part, il faut aussi penser à résorber les goulots d'engorgement qui pourraient empêcher la circulation des services prévus.

### 8.3.2.3.2.1.2 Quelques éléments de bilan socio-économique

On peut néanmoins apporter quelques informations sur certains éléments constitutifs du bilan socio-économique. Ainsi, l'avantage environnemental peut être représenté par la consommation annuelle de carburant routier éludée par le transfert modal obtenu, soit 140 millions de litre de gazole. On peut calculer la valeur économique des pollutions atmosphériques locales et globales ainsi évitées. Sur la base de la monétarisation préconisée par l'instruction cadre du Ministère de l'Équipement relative aux méthodes d'évaluation économique des grands projets d'infrastructures de transport du 25 Mars 2004 mise à jour le 27 mai 2005, aux conditions de l'année 2000, on obtient un avantage environnemental annuel légèrement supérieur à 10 M€ et un avantage actualisé sur 25 ans de 170 M€ qu'il conviendrait d'ajouter à la Valeur Actuelle Nette du projet dans le cadre d'un bilan socio-économique. La valorisation des gains en matière de sécurité découlant du détournement d'une partie du trafic routier vers le rail donne en revanche des résultats très modeste. Sur la base du nombre des victimes d'accidents dus à la circulation des poids lourds et de l'estimation des kilomètres PL éludés par R-S-R, on peut estimer la valeur des gains en matière de sécurité procurés par R-S-R. On arrive à un montant annuel de l'ordre de 180.000 € et à un avantage actualisé cumulé sur 25 ans de moins de 3 millions d'Euros.

### 8.3.2.3.2.1.3 Une optimisation dans un cadre concurrentiel

Sous réserve des hypothèses avec lesquelles la simulation a été réalisée, la mise en œuvre d'un tel système d'autoroute ferroviaire donne un résultat très positif. Ce résultat peut même être encore amélioré en recherchant un prix optimum, à fréquence et donc capacité constante :

Coef var	-6%	-5%	-4%	-3%	0%
VAN (M€)	4369	4489	4492	4413	4072

On obtient ainsi une augmentation de la VAN de l'ordre de 10% en baissant le tarif de 4% par rapport à l'hypothèse de travail. Cette amélioration du bilan découle d'une croissance du trafic assuré par R-S-R de 8%.

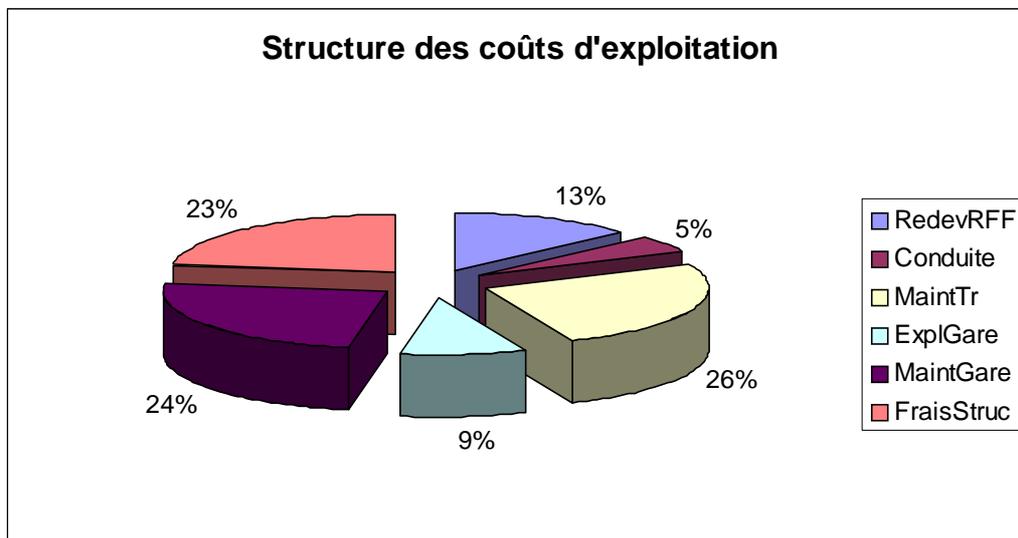
Véh. Emb/j	6548
------------	------

On perçoit à l'occasion de cette simulation deux caractéristiques importantes du bilan économique du système R-S-R :

- D'une part, la forte sensibilité du résultat aux conditions de concurrence entre les modes routiers et R-S-R. Avec les hypothèses retenues, R-S-R n'affiche pas un avantage concurrentiel absolu, même sur les OD qu'il dessert le mieux. Sur l'OD Lille-Bordeaux par exemple, la part de marché calculée est de 30% environ sur les remorques non accompagnées, donc évidemment très sensible aux variations de prix ou de temps de parcours de l'un des deux mode en compétition.
- D'autre part, le système R-S-R dégage de fortes économies d'échelle qui résultent en grande partie de l'importance des coûts fixes des installations en gares. Il convient de souligner que l'importance des coûts fixes dans les résultats de simulation est encore renforcée par le mode de calcul forfaitaire des coûts de maintenance qui a été adopté dans STEF.

#### 8.3.2.3.2.1.4 Le poids de la maintenance dans les coûts d'exploitation

La structure des coûts d'exploitation révèle la part très importante des coûts de maintenance dans le total. En effet, la maintenance des trains et des gares représente la moitié des coûts d'exploitation. Ce résultat de simulation désigne un aspect sensible du système R-S-R. Or, les coûts de maintenance pris en compte dans STEF sont estimés de manière forfaitaire, par référence à des installations comparables (en matière de matériel roulant d'une part et d'automatisme d'autre part). Il n'ont pas fait l'objet d'études spécifiques et sont de ce fait imprécis. Un réflexe de précaution a conduit à retenir dans STEF des estimations prudentes donc élevées pour les coûts de maintenance. Il reste à préciser et à optimiser le système R-S-R de ce point de vue avant de constater si oui ou non ces estimations sont trop élevées. Il s'agit là d'une piste importante pour la poursuite des études de mise au point de ce système.



#### 8.3.2.3.2.1.5 La recherche des points morts

STEF permet de mettre en œuvre deux modalités différentes de recherche du « point mort » du projet. Par « point mort », on entend le niveau de trafic qui annule la VAN. On peut alors abaisser directement le niveau de trafic pris en charge par R-S-R, sans modifier les conditions tarifaires, ni les capacités offertes par rapport aux hypothèses de travail retenues. Ce coefficient d'abaissement du trafic revient à simuler un écart entre les résultats de la fonction de détermination des parts de marché de R-S-R et la situation simulée. Il s'agit alors d'une conception du « point mort » non optimisé, ni techniquement (capacité), ni économiquement (prix).

On peut ensuite entreprendre la recherche d'un « point mort » optimisé techniquement en ajustant au fur et à mesure la capacité offerte par le système. Dans STEF, on choisira par exemple de faire varier la fréquence de desserte (l'espacement entre 2 trains successifs). Concrètement, cette optimisation technique du système amène à abaisser le « point mort ». En effet, lorsque le trafic a été abaissé pour annuler la VAN, une capacité résiduelle d'emport est libérée alors que sa mise en œuvre continue de peser sur les coûts d'investissement (acquisition des rames) et d'exploitation. La diminution de la fréquence de desserte permet alors de réaliser des économies que l'on peut à nouveau traduire en abaissement du niveau de trafic pour annuler la VAN.

On peut enfin chercher à annuler la VAN non seulement le ajustant la capacité d'emport offerte par le système, mais aussi en recalculant, pour chaque niveau d'abaissement du trafic, le tarif qui optimise le bilan du système. On obtient ainsi logiquement un « point mort » doublement optimisé, encore abaissé par rapport à l'étape précédente. Il convient cependant de souligner que si l'on fait varier simultanément les tarifs et la capacité, l'on risque d'aboutir à des convergences non stables, c'est-à-dire que plusieurs combinaisons des deux variables peuvent permettre d'obtenir un niveau identique de la VAN.

Ainsi, on peut dans un premier temps augmenter le coefficient d'abattement du trafic jusqu'à annuler la VAN en laissant inchangés le tarif et la fréquence de desserte par rapport à l'hypothèse de travail retenue. On obtient ainsi le « point mort » non optimisé pour un trafic diminué de 29%.

Mais le trafic ayant baissé, la fréquence initiale ne se justifie plus et une baisse de cette fréquence permet de retrouver une VAN positive qui permet à nouveau de baisser le trafic. Par itérations successives, on arrive à un nouveau point d'équilibre – le « point mort » optimisé techniquement – avec la combinaison suivante :

Fréquence de desserte :

22 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-37%

Enfin, à partir de la situation précédente, dans laquelle le trafic est contraint par la capacité, on peut tenter d'améliorer le bilan (la VAN) en augmentant la recette unitaire par véhicule transporté, donc en augmentant le tarif. On peut alors relancer un cycle d'itération en baissant la fréquence et augmentant le tarif. En réalité, jouer simultanément sur le tarif et le coefficient d'abattement du trafic mène à de nombreuses indéterminations puisque les deux paramètres influent directement sur la même variable de trafic. En conservant comme objectif la détermination d'un « point mort » doublement optimisé par rapport aux tarifs et à la capacité, il semble plus judicieux de mener les itérations en annulant le coefficient d'abattement du trafic. Un point d'attraction des itérations, sous la condition d'une VAN nulle, le « point mort » doublement optimisé, est alors obtenu avec les valeurs suivantes :

Fréquence de desserte :

60 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+30%

Avec ces trois définitions du « point mort » et leurs conditions d'obtention, on peut maintenant calculer le niveau de trafic minimal qui assure l'équilibre du système. On donne d'abord le trafic obtenu par les hypothèses de travail :

Véh. Emb/j	6045
------------	------

« Point mort » non optimisé

Véh. Emb/j	4292
------------	------

« Point mort » optimisé techniquement

Véh. Emb/j	3382
------------	------

« Point mort » doublement optimisé

Véh. Emb/j	1584
------------	------

On constate que les niveaux de trafic de “point mort” qui assurent l'équilibre économique du projet sont significativement inférieurs au niveau de trafic modélisé avec les hypothèses de travail retenues. Ces écarts importants sont un gage de solidité du projet. Le très faible niveau de « point mort » doublement optimisé ouvre en particulier une perspective de développement différente pour R-S-R. Il montre en effet que si de très hautes fréquences génèrent d'importantes économies d'échelle liées aux coûts d'investissement et de fonctionnement des gares, le système peut aussi trouver un équilibre pour des fréquences de desserte plus faibles. Un niveau de desserte de fréquence d'une heure apparaît en tout cas plus réaliste si il doit s'opérer sur u réseau partagé. Il correspondent néanmoins aux hypothèses hautes des autres projets de ferroutage mis en œuvre ou envisagés en France ou en Europe.

### 8.3.2.3.2.2 Test de la version système R-S-R 4 – avec «monte-et-baisse» mais sans motorisation répartie – sur l’axe Lille-Hendaye

Par rapport à la version 1, cette configuration du système R-S-R se distingue par une capacité plus faible des rames qui doivent intégrer les locomotives nécessaires à leur traction. En contrepartie, les coûts d’entretien des rames sont abaissés par la concentration des équipements de traction dans la locomotive.

#### 8.3.2.3.2.2.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Si l’on reprend les hypothèses de travail retenues, en particulier d’une fréquence de desserte de 15 mn, on obtient les résultats suivants :

VAN (4%)	3994	M€
TRI	27,50%	
Véh. Emb/j	5399	

Les résultats économiques de la version 4 de R-S-R sur l’axe Lille-Hendaye testé ne sont pas significativement différents de ceux de la version 1. La VAN apparaît en très légère baisse (de 4072 M€ à 3994 M€) alors que le TRI augmente d’un point (de 26,5% à 27,5%). En revanche, les résultats de trafic sont nettement moins favorables puisque l’on passe d’un nombre moyen de véhicules embarqués par jour de 6045 à 5399, en baisse de 10% qui correspond à la plus faible capacité du dispositif.

#### 8.3.2.3.2.2.2 Optimisation tarifaire du bilan

L’optimisation tarifaire du résultat permet dans ce cas encore d’améliorer significativement le résultat. Comme le montre le tableau suivant, on obtient un optimum pour un prix abaissé de 6% par rapport à l’hypothèse de travail retenue.

Coef var	-7%	-6%	-5%	0%
VAN (M€)	4568	4581	4497	3994

Cette simulation révèle que dans cette configuration v4, le projet est plus sensible à l’optimisation tarifaire. En effet, avec une variation de tarif de –6%, on améliore la VAN de 14%, pour atteindre un niveau légèrement supérieur à celui que l’on obtient en optimisant les tarifs de la version 1.

Le trafic assuré dans ces conditions augmente lui aussi dans une proportion importante (12%) :

Véh. Emb/j	6070
------------	------

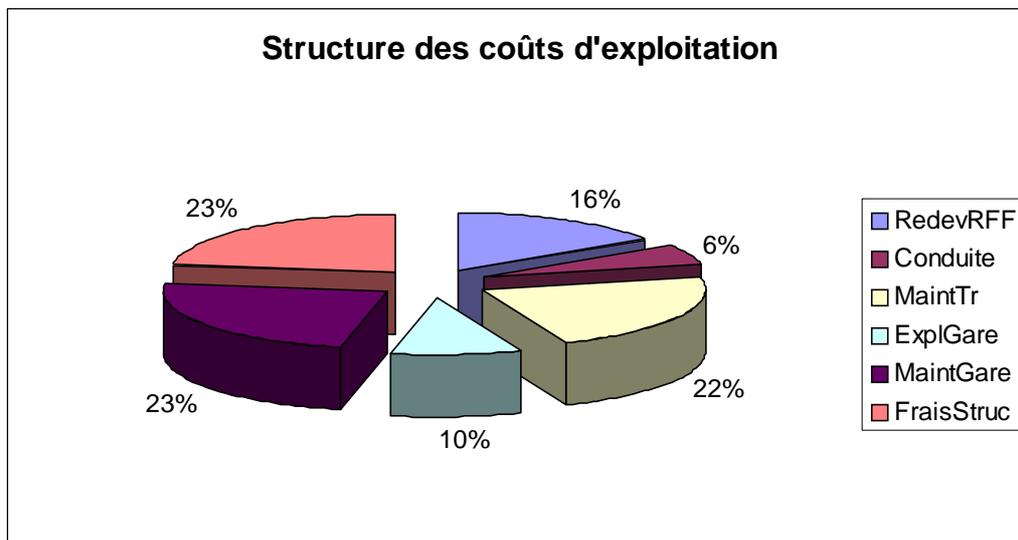
En revanche il demeure encore inférieur au niveau atteint par la version 1 avec tarifs optimisés (6548).

### 8.3.2.3.2.3 Eléments de bilan socio économique

En relation directe avec le niveau de trafic, les gains de pollution monétarisés sur 25 ans donnent un avantage global de 152 M€ (contre 170 M€ avec la version RSR1). Les gains de sécurité demeurent marginaux.

### 8.3.2.3.2.4 La structure des coûts d'exploitation

La structure des coûts d'exploitation révèle un poids toujours important des coûts de maintenance. Néanmoins, leur part dans le total n'est plus majoritaire.



### 8.3.2.3.2.5 Le point mort

La recherche du « point mort » non optimisé conduit à conserver les hypothèses de travail et à abaisser le trafic de -34% pour annuler la VAN :

Coefficient d'abattement du trafic :

-34%

Pour la version RSR1, le « point mort » non optimisé était atteint avec un abattement de trafic de -29%.

Le « point mort » optimisé techniquement s'obtient avec les conditions suivantes :

Fréquence de desserte :

20 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-38%

Ces conditions sont très proches de celles obtenues pour la version RSR1 (22 mn et -37%).

Le « point mort » doublement optimisé s'établit avec les valeurs suivantes :

Fréquence de desserte :

37 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+33%

Si la variation de tarif est très similaire à celle obtenue avec la version RSR1 (+30%), le niveau de fréquence en revanche est beaucoup plus élevé (il était de 60 mn).

En niveau de trafic, les résultats des différents « points morts » s'établissent comme suit (entre parenthèses, les valeurs de RSR1 pour mémoire) :

Hypothèses de travail :

Véh. Emb/j	5399	(6045)
------------	------	--------

« Point mort » non optimisé :

Véh. Emb/j	3684	(4292)
------------	------	--------

« Point mort » optimisé techniquement :

Véh. Emb/j	3092	(3382)
------------	------	--------

« Point mort » doublement optimisé :

Véh. Emb/j	1573	(1584)
------------	------	--------

On constate donc que les niveaux de “point mort” sont toujours très significativement inférieurs au niveau de trafic obtenu avec les hypothèses de travail. C'est une confirmation de la solidité économique du système sur l'axe Lille-Hendaye considéré.

### 8.3.2.3.2.3 Test de la version système R-S-R 2 (sans « monte-et-baisse » mais avec motorisation répartie) sur l'axe Lille-Hendaye

Les versions sans monte-et-baisse du système R-S-R se caractérisent dans le bilan économique par le fait qu'elles n'acceptent qu'une part réduite du trafic routier. Avec le gabarit ferroviaire B1 (ou B+), on considère dans les simulations que seuls les véhicules routiers de 4 m ou moins peuvent être acceptés sur R-S-R. Cette contrainte a été traduite en part du trafic routier potentiellement concerné par R-S-R, soit 25%. Cette limitation est évidemment très discriminante.

#### 8.3.2.3.2.3.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Si l'on reprend les hypothèses de travail retenues, en particulier d'une fréquence de desserte de 15 mn, on obtient les résultats suivants :

VAN (4%)	-5112	M€
TRI	nd	
Véh. Emb/j	1601	

Avec la version RSR2, le système présente donc un bilan fortement négatif. Non seulement le montant des investissements initiaux n'est pas amorti, mais les bilans annuels d'exploitation sont eux même négatifs (-204 M€).

#### 8.3.2.3.2.3.2 Optimisation technique et tarifaire du bilan

Ce bilan négatif tient à la faiblesse du trafic potentiellement captable. Cette faiblesse est incompatible avec une fréquence de desserte élevée. Aussi est-il logique, dans cette configuration, de chercher un modèle économique du système R-S-R qui puisse se fonder sur un niveau beaucoup plus faible de fréquences de desserte. Le simulateur permet de chercher la valeur de fréquence qui maximise la VAN :

VAN (4%)	-1146	M€
fréquence	60	mn
Véh. Emb/j	1499	

Le bilan du projet reste donc négatif, de même que les bilan annuels d'exploitation dont la valeur s'amenuise néanmoins fortement à -23 m€ « salement ». On remarque que le trafic diminue dans une faible proportion seulement, justifiant ainsi a posteriori cette recherche d'optimisation avec une fréquence dégradée.

On cherche ensuite sur cette base une optimisation tarifaire du projet :

Coef var	-25%	-20%	-15%	0%
VAN (M€)	-871	-828	-871	1146

Véh. Emb/j	2154
------------	------

En abaissant fortement les tarifs, on augmente significativement le trafic. Le bilan global reste néanmoins négatif, en revanche les bilans annuels d'exploitation sont presque équilibrés, à -3 M€.

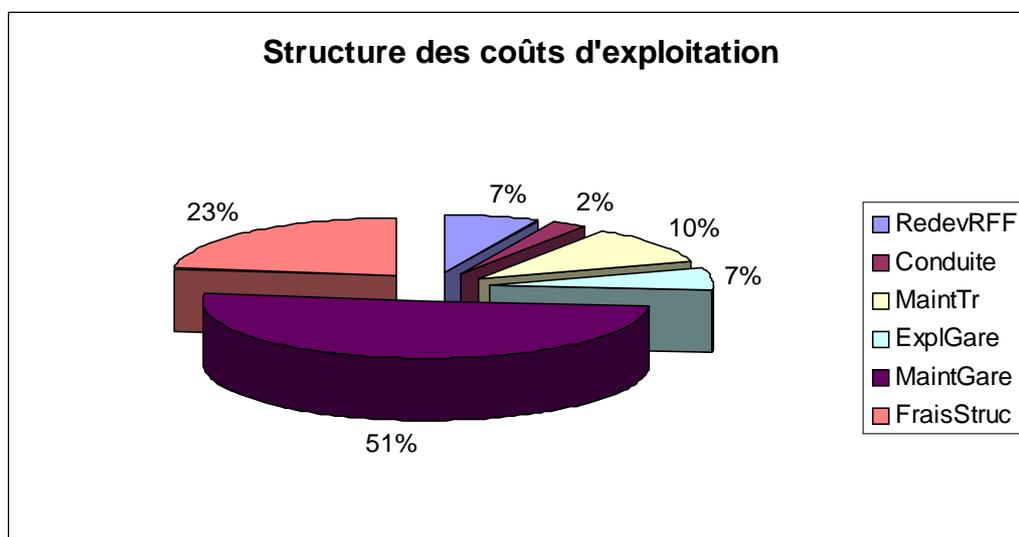
L'équilibre du projet semble donc pouvoir être trouvé dans la version RSR2 si l'on exclut les coûts d'investissement du bilan. On peut alors imaginer une prise en charge publique intégrale de l'investissement. Il convient cependant de remarquer la relative faiblesse du trafic reporté de la route. Peut-il justifier ce concours public de 800 M€ ?

#### 8.3.2.3.2.3.3 Eléments de bilan socio économique

Cette faiblesse du trafic reporté se traduit en effet par une faiblesse des avantages collectifs du projet. La valeur monétarisée actualisée des gains environnementaux sur 25 ans s'établit à 57 M€, alors que les gains de sécurité sont négligeables (autour de 1 M€).

#### 8.3.2.3.2.3.4 La structure des coûts d'exploitation

En version RSR2, les coûts d'exploitation sont écrasés par le poids des frais de maintenance des gares. Cette structure traduit le déséquilibre, dans cette configuration, entre des investissements en gares élevés (les frais de maintenance sont proportionnels aux coûts d'investissement) et un trafic, tant en train qu'en véhicules routiers, faible.



#### 8.3.2.3.2.4 Test de la version système R-S-R 2 (sans « monte-et-baisse » mais avec motorisation répartie) sur l'axe Lille-Hendaye avec un itinéraire à grand gabarit

Il est intéressant de simuler la solution RSR2 sur l'axe Lille-Hendaye, si elle pouvait disposer sur cet axe d'un itinéraire sans limite de gabarit qui lui permettrait d'accepter la totalité des véhicules routiers. Dans les faits, cela revient à simuler une infrastructure nouvelle ou entièrement rénovée dédiée au fret (voire au ferroutage, vus les fréquences simulées).

##### 8.3.2.3.2.4.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Les résultats sont évidemment positifs, meilleurs encore que ceux obtenus avec la version RSR1 puisqu'en se libérant des suggestions du dispositif de « monte-et-baisse », on réduit les coûts d'investissement et de maintenance du matériel roulant. Le tableau suivant donne les résultats obtenus :

VAN (4%)	5048	M€
TRI	37%	
fréquence	15	mn
Véh. Emb/j	6045	

Ces résultats flatteurs sont évidemment à considérer dans la perspective du financement d'une infrastructure nouvelle. En prenant un prix moyen de 15 M€/km comme coût de réalisation d'une ligne fret, les 5 milliards dégagés permettent de financer environ 340 km de ligne nouvelle, c'est à dire environ un tiers seulement du parcours Lille-Hendaye. Cela étant, il convient d'ajouter, dans l'hypothèse d'une ligne nouvelle dédiée, une partie de la redevance à RFF qui s'élève avec ces hypothèses à 1155 M€. En outre, il faut comparer ce résultat à ceux qui sont aujourd'hui courant en France, où le fret couvre mal les coûts d'entretien et d'exploitation des voies qu'il utilise et où, dans le cas des projets d'infrastructure nouvelle, sa capacité contributive à l'investissement est très faible. Enfin, une fréquence de 15 mn laisserait sans doute encore inoccupée une moitié de la capacité de la ligne.

##### 8.3.2.3.2.4.2 Optimisation technique et tarifaire du bilan

Une optimisation tarifaire permet d'améliorer encore, et de manière sensible, le bilan du projet. Elle conduit alors à baisser de 20% le tarif pour provoquer une croissance de près de 43% du trafic.

Coef var	-21%	-20%	-19%	0%
VAN (M€)	6320	6341	6322	5048
Véh. Emb/j		8691		

La VAN dégagée permet alors de financer 420 km de ligne nouvelle. Le report modal suscité par le projet devient alors tout à fait conséquent à plus de 8500 véh/j.

On peut terminer ces simulations en prenant en compte le fait que l'utilisation d'une ligne nouvelle dédiée permet sans doute de faire circuler des trains plus longs. Néanmoins, la simulation dans STEF de trains composés de 2 rames accouplées conduit à des résultats plus faibles de l'ordre de 3,5 milliards de VAN sans optimisation tarifaire, mais avec un optimum de fréquence lui aussi diminué (26 mn) qui laisse donc une forte capacité disponible pour d'autres services.

Ces résultats semblent confirmer l'hypothèse selon laquelle la viabilité économique d'un système moderne, performant et massifié de transport par rail implique de disposer d'une infrastructure dédiée.

### 8.3.2.3.2.5 Test de la version système R-S-R 3 (sans «monte-et-baisse» et sans motorisation répartie) sur l'axe Lille-Hendaye

En version RSR3, le projet garde ses limites de gabarit. On sait donc d'ores et déjà que le bilan du projet dans ces conditions sera très négatif. L'abandon de la motorisation répartie implique une diminution de la capacité et une baisse des coûts d'investissement et d'entretien. La comparaison entre les version RSR1 et RSR4 semblait donner un léger avantage à la version à motorisation répartie.

#### 8.3.2.3.2.5.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Si l'on reprend les hypothèses de travail retenues, en particulier d'une fréquence de desserte de 15 mn, on obtient les résultats suivants :

VAN (4%)	-3960	M€
TRI	nd	
Véh. Emb/j	1592	

La VAN est donc fortement négative, mais en comparaison avec la version RSR2, le déficit passe de 5 à 4 milliards. En revanche, le trafic assuré est quasiment identique.

#### 8.3.2.3.2.5.2 Optimisation technique et tarifaire du bilan

De la même manière que pour la version RSR2, on va chercher à diminuer la fréquence pour améliorer le bilan. Le simulateur permet de chercher la valeur de fréquence qui maximise la VAN :

VAN (4%)	-784	M€
fréquence	60	mn
Véh. Emb/j	1340	

Le bilan du projet reste donc négatif, mais les bilan annuels d'exploitation sont presque équilibrés à « seulement » -5 m€.

On cherche ensuite sur cette base une optimisation tarifaire du projet

Coef var	-7%	-6%	-5%	0%
VAN (M€)	-644	-637	-660	-784
Véh. Emb/j		1508		

Contrairement à la version RSR2, l'optimum tarifaire ne conduit pas à baisser fortement les tarifs. En conséquence, le trafic obtenu reste très en deçà du niveau atteint avec la version motorisée. En revanche, les bilans annuels d'exploitation deviennent positifs (4M€).

Le test de la version RSR3 confirme qu'avec une limite de gabarit contraignante, l'équilibre économique du projet ne peut être atteint qu'en excluant les investissements du bilan. Là encore, la faiblesse des avantages collectifs estimés sur la base des valeurs d'évaluation du Ministère de l'Équipement (42 M€ sur 25 ans pour les gains de pollution) interroge sur la pertinence d'un concours public important.

### 8.3.2.3.2.5.3 RSR3 sans limite de gabarit

De même que pour RSR2, on peut tester l'hypothèse d'une ligne sans limite de gabarit. Le tableau suivant donne les résultats obtenus :

VAN (4%)	4754	M€
TRI	36%	
fréquence	15	mn
Véh. Emb/j	5399	

Ces résultats très positifs sont néanmoins un peu moins favorables que dans la version RSR2

Une optimisation tarifaire permet d'améliorer encore, et de manière sensible, le bilan du projet. Elle conduit alors à baisser de 20% le tarif pour provoquer une croissance de près de 43% du trafic.

Coef var	-10%	-9%	-8%	0%
VAN (M€)	5334	5342	5338	4754
Véh. Emb/j		6337		

Les résultats restent inférieurs à ceux obtenus avec la version RSR2.

### 8.3.2.3.3 Scénario 2 : simulation d'un axe Nord-Sud du Havre à Marseille entre ports maritimes

Cette simulation porte sur un axe Nord-Sud de 1024 km reliant les deux principaux ports français, Le Havre et Marseille. Trois gares intermédiaires sont simulées : en région parisienne, dans l'agglomération dijonnaise et aux alentours de Lyon.

Le Havre	0 km
Paris	197 km
Dijon	512 km
Lyon	709 km
Marseille	1024 km

L'objectif de cette simulation n'est pas à proprement parler de tester à nouveau la pertinence d'un service RSR sur un axe de longue portée. Le choix d'une liaison entre les deux principaux ports français vise à examiner comment un tel service RSR pourrait participer à la desserte des hinterlands de ces plates-formes maritimes majeures. A cet effet, une fonctionnalité spécifique a été ajoutée au simulateur STEF pour prendre en compte que pourrait offrir un service RSR de charger non seulement des véhicules et des remorques routières, mais aussi des conteneurs maritimes.

Compte tenu de cet objectif et des acquis de la simulation de l'axe Lille-Hendaye, on n'explorera pas systématiquement toutes les versions de RSR mais on se concentrera sur celles qui sont apparues les plus pertinentes : RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de « monte-et-baisse ») et RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de « monte-et-baisse ») soit sur réseau classique, soit sur ligne nouvelle.

Avant de présenter les simulations intégrant la prise en charge de conteneurs, il est apparu nécessaire de donner un aperçu des potentialités de l'axe considéré pour le seul acheminement de véhicules et remorques routières. Cette vision d'un autre axe à longue portée viendra compléter celle issue de la simulation de Lille-Hendaye.

### 8.3.2.3.3.1 Evaluation de la performance de la version système RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de “monte-et-baisse”) sur l’axe Le Havre-Marseille

Rappelons que la version RSR1 désigne la version la plus complète du système R-S-R. Elle inclut la motorisation répartie et la fonctionnalité de « monte et baisse » (MB). Il s’agit donc aussi de la version du matériel roulant la plus onéreuse.

On simulera dans cette partie des trains composés d’une seule rame (750m).

#### 8.3.2.3.3.1.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Avec les hypothèses de travail standard retenues en matière de prix et de fréquence, on obtient les résultats suivants :

Fréquence de desserte :

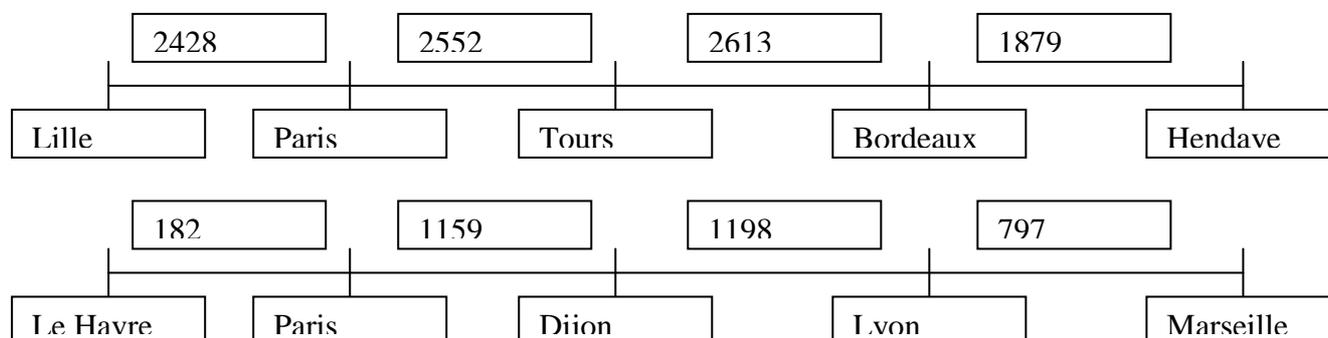
15 mn

VAN (4%)	- 8639	M€
TRI	--	
Véh. Emb/j	2577	

Sur cet axe, le bilan obtenu est très négatif. La VAN dépasse la valeur de - 8 milliards d’€uros et les bilans d’exploitation de toutes les années prises en compte sont négatifs. Il n’est donc pas possible de calculer le taux de rentabilité interne. Sur un axe de longueur comparable, reliant des grands pôles d’activité, le niveau de trafic embarqué par un service RSR entre Marseille et Le Havre est pourtant la moitié de celui atteint sur l’axe Lille-Hendaye. Le déficit du bilan est composé à hauteur de 2.163 M€ de l’investissement et de 6.476 M€ du déficit d’exploitation cumulé. Cette structure du déficit met clairement en évidence l’insuffisance du trafic au regard de l’offre mise en place.

Cette situation fortement négative s’explique par la structure géographique des trafics routiers. En effet, l’existence d’un flux de transit importants entre le Benelux et l’Espagne assure à un service de ferroutage Lille-Hendaye un trafic de bout en bout, au moins potentiel, important. Du Havre à Marseille, la situation n’est pas la même. Les flux à longue distance éventuellement captables sont plus faibles ou sont sujets à un détour important pour rejoindre l’axe RSR. En outre, de ou vers Le Havre, les 2/3 des flux sont en provenance ou à destination des régions immédiatement adjacentes (Picardie, IdF et Basse-Normandie). Ils parcourent des distances faibles qui les rendent difficilement captables par un service de ferroutage.

Le résultat de cette structure géographique est une charge de l’axe très déséquilibrée. La comparaison des charges de l’axe Lille-Hendaye et de l’axe Le Havre-Marseille rend bien compte de la relative constance du trafic tout au long du premier alors que les segments d’extrémité du deuxième axe sont très peu chargés.



Outre cette structure déséquilibrée, l'axe Le Havre-Marseille pâtit également d'une trop faible distance entre les grands émetteurs de trafic qu'il dessert. Ainsi, la distance entre Paris et Lyon – 500 km – est-elle exactement celle du seuil d'équilibre entre le coût total d'un acheminement routier et celui d'un acheminement par RSR. Sur cette relation, la plus importante en termes de flux, la part de RSR demeure donc très faible.

#### 8.3.2.3.3.1.2 Recherche d'un optimum fréquence-tarif

On peut chercher à améliorer le bilan en diminuant la fréquence de desserte et en recherchant le prix optimum. On obtient alors le résultat suivant :

Fréquence de desserte :

55 mn

Variation de tarif

+2%

VAN (4%)	-2.438	M€
TRI	--	
Véh. Emb/j	1795	

Le bilan est très nettement amélioré puisque la VAN augmente de plus de 6 milliards. Elle demeure en revanche négative, ainsi que les bilans annuels d'exploitation. Le déficit d'exploitation cumulé sur 25 ans atteint 1.609 M€ qui viennent s'ajouter aux 829 M€ d'investissement. On remarque la faible variation du tarif à laquelle la recherche de l'optimum conduit. Elle indique une situation concurrentielle fragile de RSR sur cet axe.

### 8.3.2.3.2 Evaluation de la performance de la version système RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de “monte-et-baisse”) sur l’axe Le Havre-Marseille avec des trains de 1500 m

On teste ici la même version système de RSR, à savoir RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de “monte-et-baisse”), mais en prenant en compte la circulation de trains composés de 2 rames accouplées pour former des convois de 1500 m.

Compte tenu de l’offre déjà excédentaire avec les hypothèses de base (fréquence de 15 mn) pour des trains de 750 m, il est sans intérêt de présenter une simulation de trains de 1500 m cadencés au quart d’heure. On recherche directement l’optimum tarif-fréquence d’une telle solution.

Fréquence de desserte :

97 mn

Variation de tarif

0%

VAN (4%)	- 4.791	M€
TRI	--	
Véh. Emb/j	2025	

Par rapport à la situation optimisée avec des trains de 750 m, l’optimum est atteint avec un espacement entre les trains successifs allongé de 50% (97 mn contre 55). L’ajustement tarifaire optimal est nul par rapport à l’hypothèse de base et conduit à un trafic augmenté de 13%. En revanche, le bilan économique du service est très nettement dégradé puisque la VAN tombe à presque – 4,8 milliards. Les bilans annuels d’exploitation demeurent évidemment négatifs. Le déficit d’exploitation cumulé sur 25 ans atteint 3.549 M€ qui viennent s’ajouter aux 1.242 M€ d’investissement. Les 2,4 milliards de déficit supplémentaires par rapport à l’hypothèse de trains de 750 m optimisée sont générés pour 1/6 par la croissance des coûts d’investissement et pour les 5/6 par le creusement du déficit d’exploitation.

On a sur cet exemple une nouvelle illustration de la difficulté pour RSR de faire valoir les économies d’échelle qui résultent normalement d’un allongement des trains. Dans la simulation, cette situation s’explique par l’importance des coûts directement proportionnels à la longueur des trains – investissement en matériel roulant (pour partie seulement puisque des trains longs permettent théoriquement des fréquences plus faibles) et surtout investissement et maintenance des gares (qui représente plus de la moitié des coûts d’exploitation avec des trains de 1500 m).

### 8.3.2.3.3.3 Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de “monte-et-baisse”) sur l’axe Le Havre-Marseille sans itinéraire à grand gabarit

Rappelons que la version RSR2 désigne la version du système R-S-R qui inclut la motorisation répartie mais abandonne la fonctionnalité de « monte et baisse » (MB). Son utilisation sur un itinéraire au gabarit B+ limite fortement la proportion du trafic routier qui peut être acceptée sur RSR.

25%	Pourcentage du trafic routier au gabarit accepté par RSR
-----	--

#### 8.3.2.3.3.3.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Avec les hypothèses de travail standard retenues en matière de prix et de fréquence, on obtient les résultats suivants :

Fréquence de desserte :

15 mn

VAN (4%)	- 10.969	M€
TRI	--	
Véh. Emb/j	672	

Logiquement, la limitation du trafic transférable sur RSR se traduit par une forte dégradation d’un bilan qui était déjà négatif. La VAN affiche donc un déficit de 11 milliards pour un trafic réduit au quart de ce qu’il était sans limitation de gabarit. Par rapport à la version RSR1, le déficit dû à l’investissement se réduit à 1.888 M€ (contre 2.163 M€) en raison du moindre coût du matériel roulant alors que le déficit d’exploitation se creuse fortement pour atteindre 9.081 M€ (contre 6.476 M€).

#### 8.3.2.3.3.3.2 Recherche d’un optimum fréquence-tarif

On peut chercher à améliorer le bilan en diminuant la fréquence de desserte et en recherchant le prix optimum. On obtient alors le résultat suivant :

Fréquence de desserte :

240 mn

Variation de tarif

+2%

VAN (4%)	- 2775	M€
TRI	--	
Véh. Emb/j	416	

L'optimisation fréquence-tarif aboutit à un fort allègement du service offert puisque les pertes sont minimales pour un espacement de 4h00 entre chaque train. En revanche, on remarque la faible variation du tarif à laquelle la recherche de l'optimum conduit qui indique une situation concurrentielle fragile de RSR sur cet axe. Le bilan, certes en partant d'une situation désastreuse, est très nettement amélioré puisque la VAN augmente de plus de 8 milliards. Elle demeure en revanche fortement négative, ainsi que les bilans annuels d'exploitation. Le déficit est composé à hauteur de 435 M€ par l'investissement et de 2.340 M€ par le déficit d'exploitation cumulé.

Il est intéressant de noter que cette fréquence optimale résulte de très faibles variations de la VAN sur une large plage de fréquences. Ainsi, pour une fréquence de 150 mn (2h30), la VAN est déjà réduite à - 2.858 M€ (dont 2.353 M€ de déficit d'exploitation cumulé).

#### 8.3.2.3.3.4 Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de «monte-et-baisse») sur l’axe Le Havre-Marseille avec un itinéraire à grand gabarit

Rappelons que la version RSR2 désigne la version du système R-S-R qui inclut la motorisation répartie mais abandonne la fonctionnalité de « monte et baisse » (MB). Son utilisation sur un itinéraire à grand gabarit permet d’accepter la quasi-totalité du trafic routier RSR.

95%	Pourcentage du trafic routier au gabarit accepté par RSR
-----	--

##### 8.3.2.3.3.4.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Avec les hypothèses de travail standard retenues en matière de prix et de fréquence, on obtient les résultats suivants :

Fréquence de desserte :

15 mn

VAN (4%)	- 7468	M€
TRI	--	
Véh. Emb/j	2577	

La possibilité de se passer du dispositif de « monte-et-baisse » si l’on dispose d’un itinéraire à grand gabarit permet une légère amélioration du bilan par rapport à la version RSR1. La VAN qui affichait un déficit de 8,6 milliards pour un trafic identique n’est plus « que » de 7,5 milliards. Cette amélioration, très relative puisque le bilan reste nettement négatif – comme les bilans annuels d’exploitation d’ailleurs – est due pour un quart à la diminution du prix des rames (l’investissement s’élève à 1.888 M€ contre 2163 M€ en version RSR1) et pour le reste à la diminution de leur coût d’exploitation. Le déficit d’exploitation cumulé est de 5.580 M€ contre 6.476 M€ en version RSR1.

##### 8.3.2.3.3.4.2 Recherche d’un optimum fréquence-tarif

On peut de nouveau chercher à améliorer le bilan en diminuant la fréquence de desserte et en recherchant le prix optimum. On obtient alors le résultat suivant :

Fréquence de desserte :

50 mn

Variation de tarif

+0%

VAN (4%)	- 2094	M€
TRI	--	
Véh. Emb/j	1979	

L'optimisation fréquence-tarif aboutit à diminuer la fréquence de desserte qui passe à 50 mn. On remarque toujours la faible variation du tarif à laquelle la recherche de l'optimum conduit, indiquant une situation concurrentielle fragile de RSR sur cet axe. Le bilan est très nettement amélioré avec une VAN augmentant de plus de 5 milliards. Elle demeure en revanche négative, ainsi que les bilans annuels d'exploitation. L'investissement se monte à 789 M€ et le déficit d'exploitation cumulé à 1.305 M€.

Cette simulation d'un service RSR limité aux véhicules et remorques routières sur l'axe Le Havre-Marseille met en évidence le handicap que constitue une structure géographique des trafics défavorable. Elle justifie en contrepoint que l'on cherche à élargir la gamme de prestations fournie par le système RSR en incluant l'évacuation des conteneurs depuis les ports maritimes des deux extrémités.

### 8.3.2.3.3.5 La prise en compte de l'évacuation des conteneurs depuis les ports

La prise en compte de l'évacuation des conteneurs depuis les ports de Marseille et Le Havre a nécessité une adaptation conséquente du simulateur STEF et surtout la définition de procédures de détermination du trafic concerné bien spécifiques.

Dans STEF, le calcul du trafic routier reporté de la route vers le service de ferroutage est fondé sur une matrice OD interrégionale d'une part, sur un calcul des coûts d'un acheminement routier et d'un acheminement par RSR sur l'ensemble des OD d'autre part et enfin sur un modèle, certes très simplifié, de partage modal fondé sur le rapport des coûts route/RSR pour chaque OD.

La prise en compte du trafic de conteneurs est radicalement différente. Le trafic n'est tout d'abord considéré qu'au départ (réciproquement à destination) des 2 ports de Marseille et Le Havre. Les seules destinations (réciproquement origines) prises en compte sont les gares de l'axe de desserte par RSR : Paris, Dijon, Lyon et Marseille (au départ ou à destination du Havre) ou Le Havre (au départ ou à destination de Marseille). Le potentiel de trafic transférable est supposé infini : il n'est en réalité défini que par la capacité du système RSR, laquelle est paramétrable (de 0 à 100% de la capacité des rames RSR). La seule contrainte appliquée pour rendre cohérente la captation du trafic par le service RSR est le calcul forfaitaire du tarif d'acheminement d'un conteneur comme égal à 90% du même acheminement par la route.

L'affectation du trafic de conteneurs issu ou à destination de Marseille ou du Havre entre les différentes gare desservies par RSR est réalisé au prorata du rapport « population régionale »/« distance au port ». Au départ de Marseille par exemple, chaque train RSR est supposé emporter un nombre de conteneurs correspondant au taux de remplissage maximal admissible (capacité totale\*0,85 – valeur paramétrable dans STEF). Dans chaque gare de son parcours jusqu'au Havre, il va laisser une part ( $Pop_a/d_a / \sum Pop_j/d_j$ ) des conteneurs chargés à Marseille et embarquer d'autres conteneurs à destination du Havre. Il arrivera au Havre chargé du nombre maximal admissible de conteneurs.

On ne rappellera des caractéristiques techniques des wagons porte-conteneurs de RSR que leur parfaite homogénéité en longueur avec les wagons portes-véhicules et leur absence de dispositif de « monte-et-baisse » rendu inutile par le gabarit des conteneurs. Ainsi, dans les versions à motorisation répartie RSR1 ou 2, les rames de 46 UTF comportent-elles une proportion variable (de 0 à 46) d'UTF porte-conteneurs et une proportion complémentaire (de 46 à 0) d'UTF porte-véhicules.

#### 8.3.2.3.3.5.1 Simulation d'une proportion variable de conteneurs au départ du Havre et de Marseille en version RSR1

La simulation va d'abord consister à faire varier la proportion de wagon porte-conteneur au sein des rames RSR. On réalise d'abord la simulation sur une version système RSR1 avec les hypothèses de fréquence et de tarif de base, puis à partir de la situation optimisée fréquence-tarif.

Fréquence de desserte :

15 mn	55 mn
-------	-------

Variation de tarif

0%	+2%
----	-----

% porte-cont.	VAN (15,0)	VAN (55,2)
<b>0%</b>	-8639	-2438
<b>10%</b>	-5624	-1941
<b>20%</b>	-2609	-1431
<b>30%</b>	-198	-1039
<b>40%</b>	2817	-557
<b>50%</b>	5171	-191
<b>60%</b>	7739	274
<b>70%</b>	9973	745
<b>80%</b>	11444	1072
<b>90%</b>	13165	1472
<b>100%</b>	14358	1785

La simulation nous indique que plus la capacité offerte aux conteneurs est importante, plus le bilan est positif. Cette situation est liée à plusieurs des hypothèses de calcul. Tout d'abord, la capacité offerte aux conteneurs est systématiquement utilisée (dans la limite de 85%). En second lieu, la tarification adoptée pour les conteneurs, fixée de manière à ce que le coût total de l'acheminement par RSR représente 90% du coût total de l'acheminement routier, est en moyenne plus rémunératrice pour l'exploitant de RSR que la tarification appliquée aux véhicules et remorques routières. En troisième lieu, la prise en charge d'un conteneur est un peu moins onéreuse que celle d'une remorque routière. La combinaison de ces hypothèses aboutit à ce que le résultat s'améliore continuellement avec la capacité offerte aux conteneurs.

Il semble que sur la relation considérée, sur laquelle le trafic routier capté par RSR n'est pas très intense, le taux de remplissage maximal que la manière de prendre en compte les conteneurs garantit, soit la variable qui détermine largement l'économie du système. L'influence du tarif appliqué aux conteneurs a été testée. Il faut imposer un tarif qui ramène le coût total de l'acheminement d'un conteneur par RSR à 30% du coût routier correspondant pour voir apparaître une proportion optimale de capacité réservée aux conteneurs qui ne soit pas de 100%. Ce résultat confirme la prépondérance de l'influence du taux de remplissage.

### 8.3.2.3.3.5.2 Performance d'un service combiné de ferroutage et d'acheminement de conteneurs au départ du Havre et de Marseille en version RSR1

L'objectif de cette étude n'est pas d'étudier un service dédié à l'évacuation des conteneurs portuaires, mais plutôt d'examiner les conditions dans lesquels un tel service pourrait être rendu de manière combinée à un service de ferroutage. Dans cette optique, ce travail d'exploration va être poursuivi sur la base d'une composition des rames RSR comprenant 50% de wagons portes-conteneurs (soit 23 UTF dans les version à motorisation répartie RSR1 et RSR2) et autant de wagons dédiés aux véhicules et remorques routières. Ce partage correspond d'ailleurs à la valeur qui équilibre le bilan dans l'hypothèse RSR1 avec une fréquence de 55 min.

Dans ces conditions, le bilan du service RSR mixte est le suivant :

Fréquence de desserte :

55 mn

Variation de tarif (/hypothèse de base, pour véh. et remorques uniq.)

+2%

Proportion de capacité conteneurs :

50%

VAN (4%)	- 191	M€
TRI	0,33%	
Véh. Emb/j	982	
Cont Emb/j	1700	

Le volume de conteneurs indiqué correspond au nombre de conteneurs chargés chaque jour sur le système RSR. Pour l'interpréter, il faut garder en mémoire qu'il est composé de 4 flux distincts : au départ du Havre, au départ de Marseille, vers le Havre et vers Marseille. Dans la simulation, ces 4 flux sont exactement équivalents en volume : ils représentent chacun 425 boîtes/j. Pour indication, les 850 boîtes quotidiennes de et vers Marseille représentent à peu près le quart du million de conteneurs que le PAM a effectivement traité en 2007.

On remarque qu'il est de nouveau possible de calculer le taux de rentabilité interne. En effet, renforcé des conteneurs, le bilan d'exploitation annuel du service est redevenu positif. Le bilan d'exploitation cumulé est positif à + 392 M€, mais ne suffit pas à compenser entièrement l'investissement qui s'élève à 583 M€.

### 8.3.2.3.3.5.3 Tentatives d'optimisation d'un service combiné de ferroutage et d'acheminement de conteneurs au départ du Havre et de Marseille en version RSR1

A partir de la situation qui vient d'être décrite, on peut chercher à améliorer le bilan en jouant sur les différents paramètres de l'offre. Le résultat d'une variation de la fréquence est connu : le mode de prise en compte des conteneurs fait que plus on augmente la fréquence des trains, plus le bilan s'améliore. Pour une fréquence de 40 mn, on obtient les résultats suivants :

Fréquence de desserte :

40 mn

Variation de tarif (/hypothèse de base, pour véh. et remorques uniq.)

+1%

Proportion de capacité conteneurs :

50%

VAN (4%)	+ 763	M€
TRI	14%	
Véh. Emb/j	1319	
Cont Emb/j	2344	

A titre indicatif, pour une fréquence de 15 mn avec le tarif de base, la VAN atteint 5.171 M€.

On conserve ensuite la fréquence de 55 mn pour mener une optimisation tarifaire portant sur les prix applicables aux véhicules et remorques routières.

Fréquence de desserte :

55 mn

Variation de tarif (/hypothèse de base, pour véh. et remorques uniq.)

+17%

Proportion de capacité conteneurs :

50%

VAN (4%)	- 120	M€
TRI	1,78%	
Véh. Emb/j	888	
Cont Emb/j	1700	

L'optimum est atteint pour un tarif en hausse de 17% par rapport à l'hypothèse de base. Cette hausse résulte de la contrainte de capacité induite par la réservation de la moitié des UTF aux conteneurs. On remarque d'ailleurs que le volume du trafic routier embarqué ne diminue que de 9,6% suite à la hausse de 17% des tarifs. Le trafic embarqué de conteneurs, qui ne dépend que de la capacité, ne varie pas.

Néanmoins, on doit souligner le faible impact de l'optimisation tarifaire sur le résultat. La VAN reste faiblement négative (il convient de garder à l'esprit, pour apprécier un déficit de 120 M€, qu'il s'agit du résultat calculé sur 25 ans). Le bilan d'exploitation cumulé, positif, se monte à 463 M€ et ne couvre donc pas totalement un investissement de 583 M€.

#### 8.3.2.3.3.5.4 Recherches de points morts pour l'acheminement des conteneurs

Dans les simulations précédentes, on a vu que l'acheminement des conteneurs au départ et à destination des ports du Havre et de Marseille génère globalement des revenus pour l'opérateur des services RSR. On va chercher ici les conditions dans lesquels on pourrait annuler ces revenus.

Dans les simulations précédentes, on impose que le coût total d'un acheminement d'un par RSR soit inférieur de 10% au coût total de l'acheminement routier correspondant. On va dans un premier temps chercher à quel niveau il faut descendre le coût d'un acheminement RSR par rapport au coût routier pour annuler la rémunération de l'opérateur des services RSR. Dans cette première recherche de point mort, on diminue les recettes de l'opérateur.

Dans un second temps, on reviendra à un tarif mettant le coût de l'acheminement RSR à 90% du coût de l'acheminement routier. A partir de cette situation, on va jouer sur les coûts de l'opérateur, et non plus sur ces recettes. Le coût spécifiquement lié aux conteneurs que supporte l'opérateur est celui du transbordement de la boîte. Dans l'hypothèse de travail, il a été fixé à 15 €. On va donc augmenter ce coût jusqu'à annuler la VAN.

Pour mener ces deux recherches qui portent spécifiquement sur les coûts et les revenus de l'acheminement des conteneurs, on doit s'abstraire des perturbations apportées par les autres trafics de RSR. C'est particulièrement simple avec les hypothèses de simulation puisque la demande infinie de conteneurs permet de se placer dans la situation où RSR n'acheminerait que des conteneurs portuaires. On va donc partir d'une situation dans laquelle 100% de la capacité de RSR est dévolue aux conteneurs.

On présentera donc successivement la situation de départ d'un train de 750 m par heure entièrement réservé aux conteneurs, puis le résultat de la recherche du point mort sur les recettes de l'opérateur et enfin le résultat de la recherche du point mort sur les coûts de l'opérateur.

### Situation initiale

Fréquence de desserte :

60 mn

Proportion de capacité conteneurs :

100%

Coût d'acheminement RSR par rapport au coût routier

90%

Coût de transbordement d'un conteneur :

15 €

VAN (4%)	+ 1.399	M€
TRI	33,36%	
Véh. Emb/j	0	
Cont Emb/j	3128	

La situation initiale est évidemment très favorable. Le bilan nettement positif confirme que l'acheminement des conteneurs est rémunérateur pour l'opérateur RSR. On peut néanmoins ajouter que le résultat est très sensible à la fréquence de desserte. On a déjà vu qu'une fréquence de 15 mn menait à une VAN de plus de 14 milliards dans le cas d'un service entièrement dévolu aux conteneurs. Dans l'autre sens, les importants coûts fixes de RSR ne sont plus amortis lorsque la fréquence est inférieure à 90 mn.

### Recherche du point mort sur les recettes de l'opérateur

Dans cette recherche, on va abaisser les recettes de l'opérateur en accentuant la différence imposée entre le coût pour le client de l'acheminement par RSR et le coût routier.

Fréquence de desserte :

60 mn

Proportion de capacité conteneurs :

100%

Coût d'acheminement RSR par rapport au coût routier

70%

Coût de transbordement d'un conteneur :

15 €

VAN (4%)	0	M€
TRI	4%	
Véh. Emb/j	0	
Cont Emb/j	3128	

Le point mort est atteint lorsque l'on impose une tarification aux prestations RSR qui rendent l'acheminement par RSR 30% moins cher que l'acheminement routier. On peut noter que la valeur du point mort trouvé dépend de la fréquence de desserte adoptée. Ainsi, avec une fréquence de 15 mn et non plus de 60 mn, il faut imposer au coût de revient de RSR qu'il soit 62% moins élevé que le coût routier pour annuler le bilan. Dans cette variation, on retrouve l'influence des coûts fixes de RSR qui sont évidemment mieux amortis avec une fréquence de desserte élevée.

Recherche du point mort sur les coûts de l'opérateur

Ici, on va chercher à annuler le bilan en augmentant le coût pour l'opérateur RSR du transbordement d'un conteneur.

Fréquence de desserte :

60 mn

Proportion de capacité conteneurs :

100%

Coût d'acheminement RSR par rapport au coût routier

90%

Coût de transbordement d'un conteneur :

156 €

VAN (4%)	0	M€
TRI	4%	
Véh. Emb/j	0	
Cont Emb/j	3128	

L'équilibre est atteint pour un coût de gestion et de transbordement par boîte de 156 €. Là encore, ce résultat dépend de la fréquence de desserte adoptée. Avec une fréquence de 15 mn, le coût d'équilibre s'établit à 377 €. Indépendamment de la fréquence, le coût du transbordement qu'il faut atteindre pour annuler le bilan est très élevé, largement supérieur en tout cas aux coûts usuels dans ce domaine (un peu inférieurs à 30€). Ce résultat donne une idée de la marge existante dans le cadre du concept RSR quant aux coûts variables d'exploitation. En contrepoint, il confirme que la question-clé de la pertinence économique de RSR porte sur ses coûts fixes.

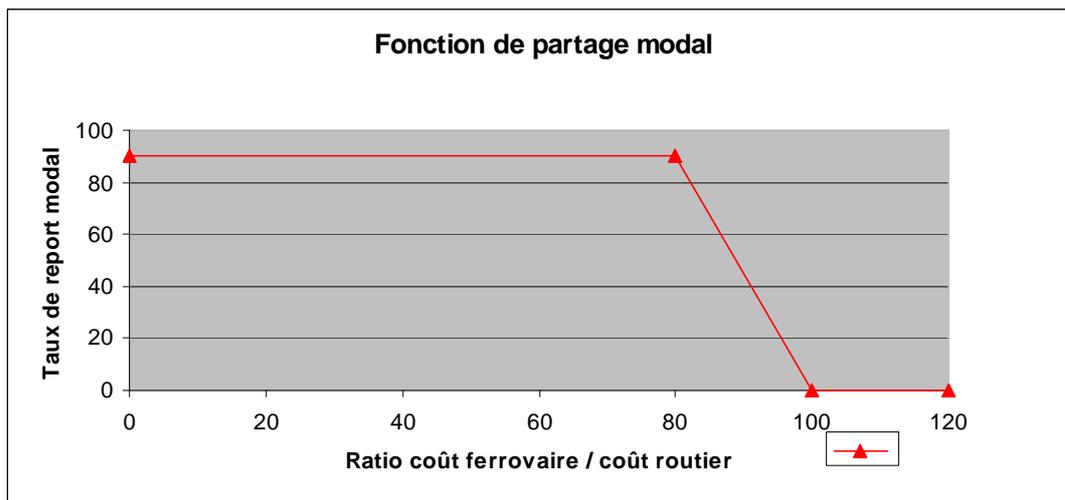
#### 8.3.2.3.4 Scénario 3 : simulation du franchissement d'un obstacle naturel entre Lyon et Turin

Cette partie simule l'établissement d'un service RSR entre Lyon et Turin, dans une logique de franchissement d'obstacle. Plusieurs combinaisons seront testées. Elles distingueront d'abord les différentes versions de RSR

L'hypothèse de représentation du partage modal adoptée pour les simulation sur cet axe sera une fonction par morceaux définie par les paramètres suivants :

90%	Taux de report modal maximum
100%	Ratio coût ferroviaire / coût routier au taux de report modal min
80%	Ratio coût ferroviaire / coût routier au taux de report modal max

La fonction est représentée sur le graphique suivant :



L'abandon d'une fonction de type logistique sur cet axe s'explique par la faible diversité des itinéraires routiers susceptibles d'être affectés par le report modal (seuls les itinéraires vers l'Italie, soit une ligne et une colonne de la matrice OD de travail, sont concernés). De ce fait, les « queues » de la fonction logistique induiraient des aberrations (dans les reports marginaux d'itinéraires ne concernant pas l'Italie) que l'absence de foisonnement rendrait sensible. On préfère donc une fonction qui interdise tout report dès que le coût RSR dépasse le coût routier.

### 8.3.2.3.4.1 Evaluation de la performance de la version système RSR1 (avec motorisation répartie et dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin

L'hypothèse testée ici sur l'itinéraire Lyon-Turin correspond à l'utilisation de la ligne historique (tunnel du Mont-Cenis) par un matériel RSR compatible avec un gabarit B+. Dans ces conditions, la presque totalité du trafic routier serait acceptée sur le service de ferroutage.

95%	Pourcentage du trafic routier au gabarit accepté par RSR
-----	--

#### 8.3.2.3.4.1.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Fréquence de desserte :

15 mn
-------

VAN (4%)	4581	M€
TRI	109,64%	
Véh. Emb/j	6252	

Avec une fréquence très élevée, sans doute irréaliste sur une ligne sur laquelle devraient coexister en outre, des services voyageurs et de fret conventionnel, le système RSR affiche néanmoins une performance économique tout à fait importante, supérieure à 4,5 milliards d'Euros. Dans la situation testée, les coûts routiers sont plus élevés que sur d'autres itinéraires, ce qui correspond bien à l'objectif de simulation de franchissement d'un obstacle naturel. Il en résulte une compétitivité particulière du service RSR.

Ce résultat est cependant à relativiser au regard du coût particulier des infrastructures qu'il s'agirait de mobiliser pour le service testé. Dans une hypothèse où la capacité actuelle serait presque entièrement occupée par RSR, il conviendrait d'imputer à ce service la mise au gabarit B+ actuellement en cours. Il faudrait encore ajouter la modification de certaines voies de stationnement pour accepter des rames de 750 m. Cela étant, l'ensemble des travaux nécessaires ne consommeraient pas la totalité de la VAN simulée.

#### 8.3.2.3.4.1.2 Bilan socio-économique

Pollution atmosphérique :

Consommation annuelle éludée : 54 millions de litres de GO

Valeur de la pollution évitée : 4 M€/an, soit 66 M€ actualisés sur 25 ans

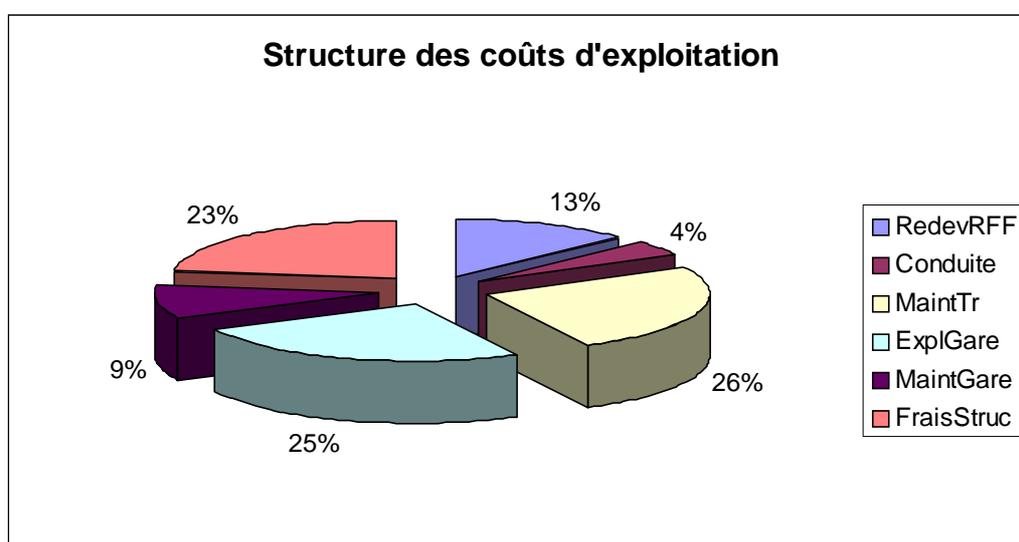
Gains de sécurité routière : 70.000€/an, soit environ 1M€ actualisés sur 25 ans

Rappelons que sur l'itinéraire testé (franchissement des Alpes entre Lyon et Turin), la consommation moyenne des poids lourds est supérieure à celle que l'on constate en plaine. Par ailleurs, Il est communément admis qu'à niveau d'émission équivalent, les conséquences environnementales de la pollution atmosphérique sont plus importantes dans le milieu confiné et fragile des vallées de montagne. L'instruction cadre d'évaluation à laquelle nous nous

sommes référés préconise par exemple d'appliquer un coefficient multiplicateur compris entre 1,5 et 2,1 aux valeurs environnementales. Enfin, dans les longs tunnels, qu'ils soient routiers ou ferroviaires, l'estimation des gains de sécurité à partir de niveaux et de coûts moyens d'accidents par véh.km est peu pertinente.

Quoi qu'il en soit, l'avantage collectif issu de la diminution de la pollution atmosphérique et de l'insécurité routière apparaît minime par rapport au niveau atteint par la VAN, mais aussi par rapport au montant des investissements en jeu, qu'il s'agisse de ceux directement liés au service RSR ou de ceux consécutifs à la modernisation d'une ligne de montagne (dégagement du gabarit B+, possibilité de trains longs...).

#### 8.3.2.3.4.1.3 Structure des coûts d'exploitation



Les coûts d'exploitation restent pour moitié concentrés sur les deux postes d'exploitation des gares et de maintenance des trains. On retrouve sur ce cas de franchissement une caractéristique forte du système RSR qui concentre les moyens sur les gares et les trains pour en accroître l'efficacité.

#### 8.3.2.3.4.1.4 Optimisation fréquence et fréquence-tarif

##### Recherche d'une fréquence optimale

La recherche d'une fréquence optimale (qui maximise la VAN) conduit à adopter un espacement minimal entre deux trains successifs. La valeur atteinte est en fait la valeur limite autorisée par le système technique.

Fréquence de desserte :

12,17 mn

VAN (4%)	5544	M€
----------	------	----

TRI	117,59%
Véh. Emb/j	7587

On constate que cette augmentation de la capacité du service RSR (de 160 à 197 trains quotidiens, soit +23%) conduit à une amélioration sensible du bilan. La VAN augmente d'un milliard (+22%) et le trafic embarqué de 1300 unités quotidiennes (+21%). Cette sensibilité à la capacité illustre la position compétitive de l'offre RSR simulée. Elle est représentative d'une situation sous-capacitaire.

#### Recherche d'un optimum fréquence-tarif

Tarif RSR	+10%	+11%	+12%	+13%	+14%	+15%	+16%	+17%	+18%	+19%	20%
VAN (M€)	5709	5718	5734	5718	5725	5730	5724	5711	5720	5720	5711

Fréquence de desserte :

12,17 mn

Variation de tarif

+15%

VAN (4%)	5730	M€
TRI	123,37%	
Véh. Emb/j	6977	

Il est donc possible d'améliorer encore le bilan économique en conservant la fréquence maximale et en augmentant le tarif de 15% par rapport à l'hypothèse de travail. La VAN augmente alors de 3,4% alors que le trafic embarqué baisse de 8%.

#### 8.3.2.3.4.1.5 Recherche d'un optimum avec une fréquence de 60 mn

Pour asseoir les résultats de simulation sur une hypothèse de service plus réaliste, on peut tester une fréquence de 60 mn entre deux trains successifs, soit 40 trains quotidiens (Les 2 sens confondus).

Coef var	0%	+16%	+18%	+20%	+22%	+24%	+26%	+28%	+30%	+32%	+34%
VAN (M€)	772	1090	1129	1169	1209	1248	1288	1257	1204	1144	1069

Coef var	112%	114%	116%	118%	120%	122%	124%	126%	128%	130%	132%
----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

VAN (M€)	1826	1855	1883	1912	1930	1937	1923	1915	1764	1505	1254
----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

La simulation permet d'observer plusieurs situations. Tout d'abord, lorsque l'on ne modifie pas le tarif (Coef var = 0%), on obtient les résultats suivants :

Fréquence de desserte

60 mn

Variation de tarif

0%

VAN (4%)	772	M€
TRI	34%	
Véh. Emb/j	1560	

Logiquement, la division par 4 de la capacité (par rapport à la fréquence initiale de 15 mn) conduit à une division par 4 du trafic embarqué (dans ce cas, la capacité offerte est totalement saturée). En raison des dés-économies d'échelle dues au poids des coûts de maintenance des gares, la VAN baisse plus que proportionnellement. En revanche, on peut insister sur le fait qu'elle demeure largement positive, en contraste fort avec les résultats – opérationnels ceux-là – des services de ferroutage de franchissement des Alpes existant actuellement sur les passages franco-italiens ou à l'étranger.

Lorsqu'on augmente les tarifs de RSR, on repère un premier sommet autour de +26%. Ce sommet correspond en réalité au seuil de saturation du système : pour un tarif variant de 0 à +26%, le trafic embarqué reste inchangé ; il ne commence à diminuer qu'avec un tarif de +27%.

A +26%, on a les résultats suivants :

Fréquence de desserte

60 mn

Variation de tarif

+26%

VAN (4%)	1288	M€
TRI	54,17%	

Véh. Emb/j	1558
------------	------

La VAN se trouve donc substantiellement améliorée augmentant encore le contraste avec les services que l'on peut observer aujourd'hui à travers les Alpes. N'oublions pas néanmoins que cette VAN devrait financer les travaux nécessaires à l'allongement des trains et justifier (bien qu'*a posteriori*) les sommes dépensées pour la mise au gabarit B+ de l'itinéraire.

Si l'on continue à augmenter le tarif, le résultat diminue tout d'abord, puis réaugmente pour atteindre un nouvel optimum à +122% :

Fréquence de desserte

60 mn
-------

Variation de tarif

+122%
-------

VAN (4%)	1937	M€
TRI	82,92%	
Véh. Emb/j	1242	

Dans ces conditions, la VAN atteint presque 2 milliards alors que le trafic reste encore appréciable montrant l'avantage concurrentiel fort de la desserte testée sur un certains nombre d'itinéraires routiers.

Structure des coûts d'exploitation

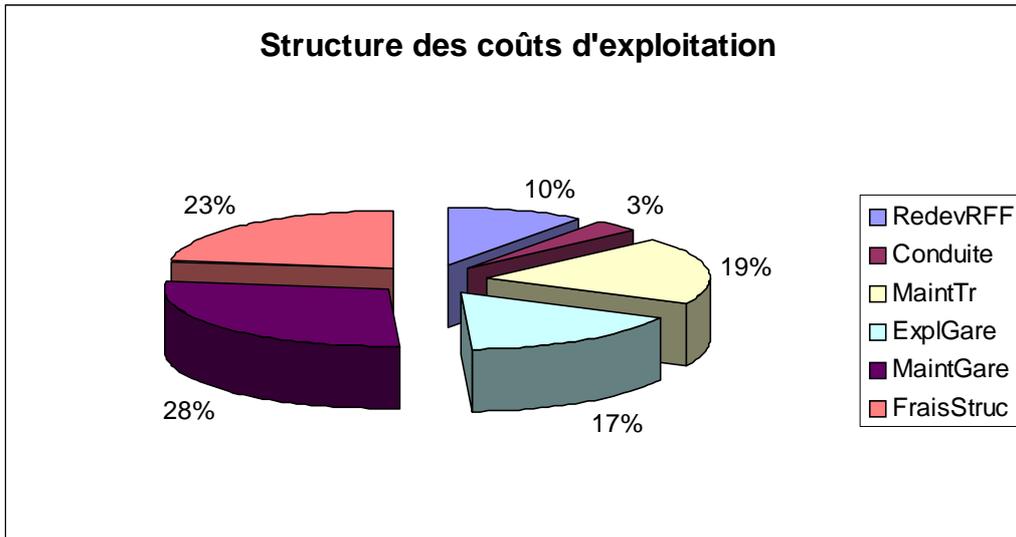
Avec ces hypothèses, la structure des coûts d'exploitation prend l'allure suivante :

Fréquence de desserte

60 mn
-------

Variation de tarif

+122%
-------



On remarque le poids désormais prépondérant de la maintenance des gares, traduisant la dés-économie induite par la diminution du trafic.

#### 8.3.2.3.4.1.6 Recherche de points morts

La recherche du point mort est effectuée à partir de l'hypothèse de base de fréquence de desserte, soit 15 mn.

##### Point mort non optimisé :

Rappelons qu'il s'agit ici de trouver le coefficient d'abattement du trafic qui, toutes choses égales par ailleurs, annule la VAN.

Fréquence de desserte :

15 mn

Variation de tarif

0%

Coefficient. d'abattement du trafic :

-65%

Véh. Emb/j 2193

La valeur très élevée du coefficient d'abattement indique que, pour imprécis qu'il soit, le résultat positif de la VAN est néanmoins très solide, au moins quant aux hypothèses représentant le report modal.

##### Point mort optimisé techniquement

Dans cette seconde recherche d'un point mort par abattement du trafic, on optimise la fréquence à chaque itération

Fréquence de desserte

12,17 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-65%

Véh. Emb/j 2632

La recherche conduit à la fréquence maximale permise par le système technique. Le coefficient d'abattement obtenu est toujours de 65% confirmant la solidité du bilan positif trouvé.

Point mort optimisé sur le tarif

Dans cette nouvelle recherche, il n'y a plus d'abattement forfaitaire du trafic embarqué, mais une augmentation de tarif menée jusqu'à l'annulation de la VAN.

Fréquence de desserte :

12,17 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+126%

Véh. Emb/j 1252

Là encore, le niveau de tarif nécessaire pour annuler le bilan est très supérieur au niveau de l'hypothèse de base et même à celui (+15%) qui optimise le bilan. C'est encore une confirmation de la solidité de la position constatée par simulation

Point mort doublement optimisé

Dans cette ultime recherche de point mort, on modifie alternativement le tarif pour annuler la VAN et la fréquence pour maximiser la VAN, jusqu'à l'obtention d'un couple fréquence-tarif qui annule la VAN.

Fréquence de desserte :

170 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+144%	
Véh. Emb/j	236

La recherche converge vers une situation d'équilibre caractérisée par un niveau de tarif beaucoup plus élevé que l'hypothèse de base et un niveau de fréquence faible puisque l'on est dans l'ordre de grandeur d'un train toutes les 3 h. Ce résultat tend à confirmer la présomption de pertinence économique du service de ferroutage simulé. Le point d'équilibre très bas illustre l'avantage de RSR pour les dessertes massifiées, mais montre aussi que le système est intéressant à de faibles niveaux de service.

#### 8.3.2.3.4.2 Evaluation de la performance de la version système RSR4 (sans motorisation répartie mais avec dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin

L'hypothèse testée ici sur l'itinéraire Lyon-Turin correspond à l'utilisation de la ligne historique (tunnel du Mont-Cenis) par un matériel RSR compatible avec un gabarit B+. Dans ces conditions, la presque totalité du trafic routier serait acceptée sur le service de ferroutage.

95%	Pourcentage du trafic routier au gabarit accepté par RSR
-----	--

En revanche, l'absence de motorisation répartie oblige à diminuer la capacité des rames qui passent de 46 UTF en version RSR1 à 36 UTF en version RSR4.

##### 8.3.2.3.4.2.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Fréquence de desserte :

15 mn
-------

VAN (4%)	3380	M€
TRI	81,94%	
Véh. Emb/j	4892	

La version RSR4 est plus défavorable en raison de sa moindre capacité. Or, sur ce trajet où la tarification routières rend le trajet compétitif, c'est la capacité qui détermine le résultats.

La nécessité de renforcer de manière spécifique la traction de chaque rame l'ajout de locomotives sur la partie montagneuse du trajet est un autre élément à prendre en compte qui plaide fortement en faveur d'une version à motorisation répartie sur l'axe Lyon-Turin testé.

##### 8.3.2.3.4.2.2 Bilan socio-économique

Les résultats sont présentés ici pour mémoire. Ils restent d'un ordre de grandeur très inférieur aux montants de coûts d'investissement et de fonctionnement mis en jeu par le projet.

Pollution atmosphérique :

42 millions de litres de GO

3 M€/an

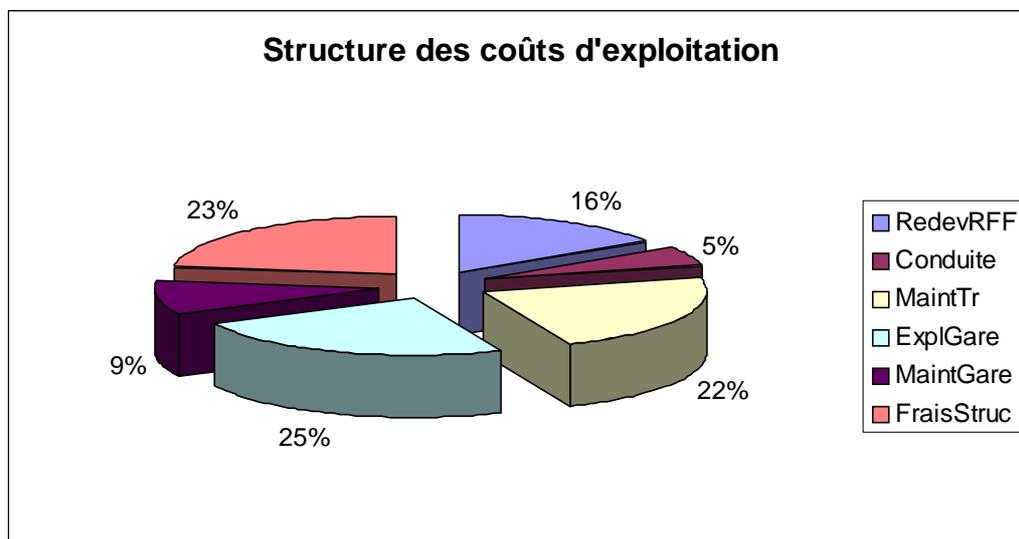
52 M€ actualisés sur 25 ans

sécurité :

50.000€/an

environ 1M€ actualisés sur 25 ans

### 8.3.2.3.4.2.3 Structure des coûts d'exploitation



On retrouve dans la structure des coûts d'exploitation la prépondérance des coûts relatifs à la maintenance des trains et à l'exploitation des gares.

La version RSR4, sans motorisation répartie, présente un bilan significativement moins favorable que la version 1. Dans la suite de l'exploration de la mise en œuvre d'un service RSR sur la relation Lyon-Turin, on privilégiera les options avec motorisation répartie (RSR1 ou 2)

### 8.3.2.3.4.3 Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie et sans dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin actuel

Sur l'itinéraire Lyon-Turin existant actuellement, que l'on considère d'ores et déjà au gabarit B+, l'absence du dispositif de « monte-et-baisse » se traduit par une limitation forte de la proportion du trafic que le gabarit permet d'accepter sur RSR. C'est donc ce jeu d'hypothèse qui est testé ici.

25%	Pourcentage du trafic routier au gabarit accepté par RSR
-----	--

#### 8.3.2.3.4.3.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Fréquence de desserte :

15 mn
-------

VAN (4%)	1442	M€
TRI	35,45%	
Véh. Emb/j	3429	

Avec une fréquence de desserte très élevée, la VAN calculée reste positive malgré la limitation de gabarit. On note également que le trafic détourné de la route est appréciable : il correspond à la totalité du trafic du tunnel du Fréjus. En revanche, et logiquement, le résultat obtenu est très inférieur à celui que permet d'atteindre le dispositif de « monte-et-baisse ».

Ces conclusions tendent à indiquer le fort intérêt du dispositif de « monte-et-baisse » dont l'étude et la validation semble, au vu des résultats économiques, devoir être encouragées malgré les difficultés. Mais elle montrent aussi l'intérêt sur les itinéraires du type « franchissement d'obstacle » du concept R-Shift-R en lui même. En effet, dans cette configuration non-optimisée, le résultat positif de la VAN démontre la pertinence d'un tel service.

#### 8.3.2.3.4.3.2 Bilan socio-économique

Les résultats sont présentés ici pour mémoire. Ils restent d'un ordre de grandeur très inférieur aux montants de coûts d'investissement et de fonctionnement mis en jeu par le projet.

Pollution atmosphérique :

29 millions de litres de GO

2 M€/an

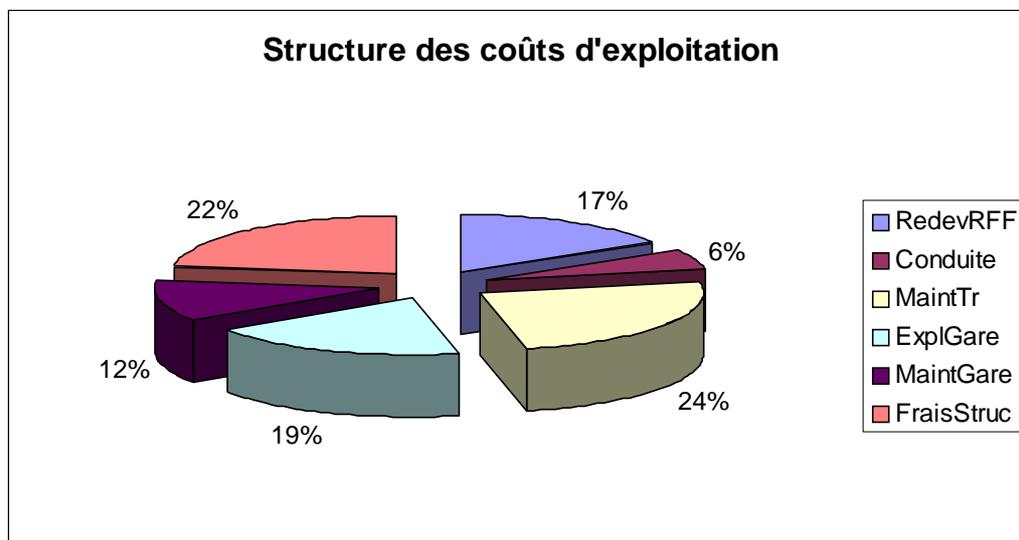
35 M€ actualisés sur 25 ans

sécurité :

40.000€/an

environ 0,6M€ actualisés sur 25 ans

### 8.3.2.3.4.3.3 Structure des coûts d'exploitation



On retrouve ici la prépondérance de la maintenance des trains et de l'exploitation des gares, mais on remarque le poids de la redevance d'infrastructure.

### 8.3.2.3.4.3.4 Optimisation fréquence et fréquence-tarif

#### Optimisation de la fréquence de desserte :

L'optimisation de la fréquence conduit à baisser le nombre de trains mis en circulation. Cette diminution est cohérente avec la limitation importante du trafic routier potentiellement transférable

Fréquence de desserte :

24 mn

VAN (4%)	2063	M€
TRI	67,32%	
Véh. Emb/j	3415	

On notera que par rapport à une fréquence au quart d'heure, la fréquence optimale permet d'améliorer sensiblement la VAN qui augmente de 30% et dépasse les 2 milliards sans quasiment modifier le trafic embarqué qui reste important.

#### Optimum fréquence/tarif

Fréquence de desserte :

25 mn

Variation de tarif

Coef var	+14%
----------	------

VAN (4%)	2170	M€
TRI	73,93%	
Véh. Emb/j	3082	

Une élévation de 14% du tarif par rapport à l'hypothèse de base, combinée à une fréquence de desserte de 25 mn, permet d'améliorer encore le résultat. La VAN augmente de 5% environ mais le trafic embarqué baisse de 12%.

#### 8.3.2.3.4.3.5 Recherche de points morts

##### Point mort non optimisé

Partant de l'hypothèse de base, avec une fréquence de 15 mn et un tarif qui n'a pas varié, on cherche le coefficient d'abattement qu'il faut appliquer au trafic annuler la VAN.

Fréquence de desserte :

15 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-40%

Véh. Emb/j 2060

On constate que le seuil de trafic trouvé est significativement inférieur à celui auquel conduit la simulation, indiquant ainsi une certaine robustesse du résultat.

##### Point mort optimisé techniquement

Lorsque l'on ajuste la fréquence au fur et à mesure de l'abattement du trafic, on aboutit à une valeur d'abattement du trafic très élevée qui confirme la robustesse de la simulation.

Fréquence de desserte :

25 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-58%

Véh. Emb/j	1408
------------	------

Point mort optimisé sur le tarif

Sans abattement du trafic, il faut doubler le tarif par rapport à l'hypothèse de base pour annuler la VAN.

Fréquence de desserte :

15 mn
-------

Coefficient d'abattement du trafic :

0%
----

Variation de tarif

+96%
------

Véh. Emb/j	1056
------------	------

Point mort doublement optimisé

Lorsque l'on joue alternativement sur la fréquence et le tarif, on aboutit à un point mort particulier, avec une fréquence très faible d'un train par sens toutes les 5 cinq heures et un tarif fortement augmenté. Le trafic embarqué devient très faible. Ce résultat tend à nouveau à confirmer la pertinence d'un service RSR, même pour de faibles fréquences de desserte, que l'on peut par exemple imaginer principalement dédié à des trafics spécifiques tels celui des matières dangereuses.

Fréquence de desserte :

310 mn
--------

Coefficient d'abattement du trafic :

0%
----

Variation de tarif

+133%
-------

Véh. Emb/j	222
------------	-----

#### 8.3.2.3.4.4 Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin avec une ligne à grand gabarit

On choisit ici un jeu d'hypothèses qui revient à tester le service RSR sur une infrastructure à grand gabarit, donc sur la ligne nouvelle Lyon-Turin.

95%	Pourcentage du trafic routier au gabarit accepté par RSR
-----	--

On simulera des trains composés d'une seule rame (750m)

##### 8.3.2.3.4.4.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Fréquence de desserte :

15 mn
-------

VAN (4%)	4885	M€
TRI	145%	
Véh. Emb/j	6252	

Pour une fréquence de desserte très élevée, on obtient une VAN largement positive. Le trafic détourné de la route est lui aussi tout à fait important puisqu'il est de l'ordre de grandeur de la totalité du trafic routier empruntant aujourd'hui les 2 tunnels routiers des Alpes franco-italiennes, le Mont-Blanc et le Fréjus.

Il faut néanmoins confronter le montant de la VAN obtenue au prix de revient de l'infrastructure nécessaire, estimé autour de 15 milliards d'Euros. Sur cette base, le service RSR testé ici permettrait de dégager environ un tiers du financement nécessaire, pour une occupation de capacité de l'ordre de la moitié. On peut d'ailleurs calculer le revenu annuel généré par sillon occupé en divisant la VAN par le nombre de trains quotidiens (160 pour une fréquence de 15 mn). On obtient un revenu annuel par sillon occupé de 30,5 M€.

##### 8.3.2.3.4.4.2 Bilan socio-économique

Avec les hypothèses standards adoptées, le bilan des externalités évitées s'établit comme suit :

Pollution atmosphérique :

54 millions de litres de GO

4 M€/an

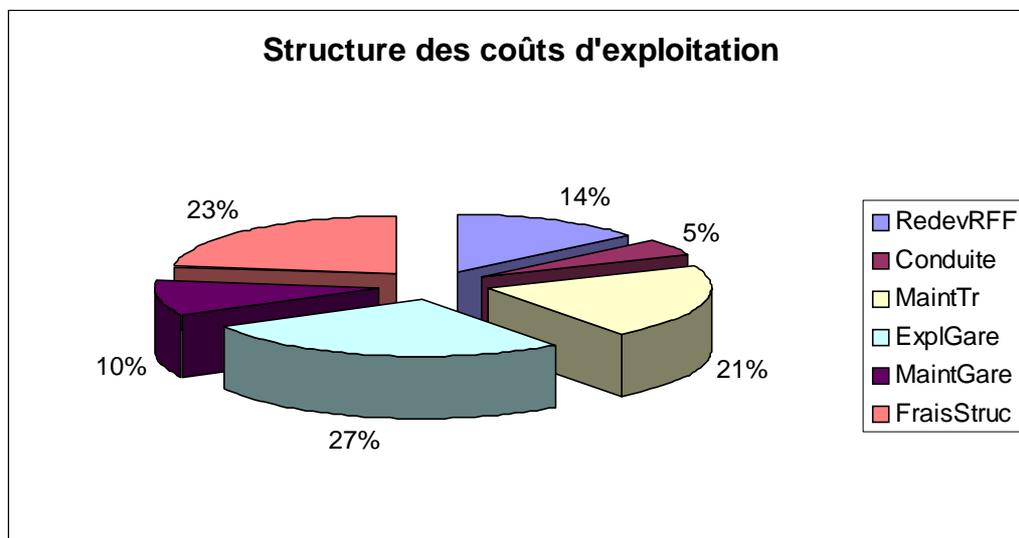
66 M€ actualisés sur 25 ans

sécurité :

70.000€/an

environ 1,13M€ actualisés sur 25 ans.

#### 8.3.2.3.4.4.3 Structure des coûts d'exploitation



Compte tenu du trafic élevé, l'exploitation des gares est le principal poste de dépense, suivi par la maintenance des trains et leur exploitation (redevance RFF + conduite).

#### 8.3.2.3.4.4.4 Optimisation fréquence et fréquence-tarif

##### optimum fréquence

L'optimisation du service selon la fréquence conduit à adopter la fréquence maximale permise par le système technique.

Fréquence de desserte :

12,17 mn

VAN (4%)	5917	M€
TRI	161%	
Véh. Emb/j	7587	

Dans ces conditions, La VAN s'améliore fortement puisqu'elle croît de 20% environ correspondant à la croissance de 20% du nombre de trains.

##### Optimum fréquence/tarif

Dans ces conditions où la capacité du système semble déterminante, il est encore possible d'améliorer le bilan en jouant sur le tarif.

Fréquence de desserte :

12,17 mn

Variation de tarif :

+15%

VAN (4%)	6104	M€
TRI	168%	
Véh. Emb/j	6977	

Dans ces conditions, une augmentation de 15% du tarif par rapport à l'hypothèse de base permet à la VAN de dépasser la valeur de 6 milliards d'€uros pour un trafic embarqué de l'ordre de 7000 véhicules/jour. Le revenu moyen généré alors par chaque sillon occupé (la VAN divisée par le nombre de trains circulants par jour) s'établit à 31,8 millions d'€uros.

#### 8.3.2.3.4.4.5 Recherche d'un tarif optimum avec une de fréquences de desserte de 30 mn

On peut chercher à simuler un service fondé sur des fréquence de desserte plus faible. Compte tenu du niveau de trafic élevé et de l'hypothèse d'une infrastructure nouvelle, on s'en tiendra ici à une fréquence de 30 mn. On cherche alors le niveau de tarif qui optimise la VAN.

Fréquence de desserte :

30 mn

Variation de tarif :

+18%

VAN (4%)	2926	M€
TRI	118%	
Véh. Emb/j	3121	

La limitation de la capacité du service se traduit par un optimum de tarif plus élevé que précédemment. En revanche, cette optimisation n'évite pas une division par deux de l'ensemble des résultats, qu'il s'agisse de la VAN qui s'établit désormais à 3 milliards d'€uros, ou du trafic, autour de 3000 véhicules/jours. Dans cette combinaison, le revenu moyen généré par chaque sillon occupé (la VAN divisée par le nombre de trains circulants par jour) s'établit à 36,6 millions d'€uros.

#### 8.3.2.3.4.4.6 Recherche de points morts

### Point mort non optimisé

Logiquement, la recherche de la valeur d'abattement qui annule la VAN conduit à une valeur élevée.

Fréquence de desserte :

15 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-70%

Véh. Emb/j 1876

### Point mort optimisé techniquement

De la même manière, la même recherche menée en optimisant la fréquence confirme à nouveau la solidité de la simulation.

Fréquence de desserte :

12,17 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-70%

Véh. Emb/j 2352

### Point mort optimisé sur le tarif

La recherche du point mort sur le seul tarif confirme de nouveau la robustesse des résultats de la simulation.

Fréquence de desserte :

15 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+132%

Véh. Emb/j 908

### Point mort doublement optimisé

Enfin, la recherche du point mort sur le tarif combinée à une optimisation de la fréquence conduit à observer un service de fréquence très faible. L'équilibre est atteint avec des trains échelonnés toutes les 3H50 et un tarif de 144% plus élevé que l'hypothèse de base. Ce résultat confirme la possibilité économique d'un service de faible fréquence.

Fréquence de desserte :

232 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+144%

Véh. Emb/j 234

### 8.3.2.3.4.5 Evaluation de la performance de la version système RSR2 (avec motorisation répartie mais sans dispositif de « monte-et-baisse ») sur l'axe Lyon-Turin avec une ligne à grand gabarit et des trains de 1500m

On conserve l'hypothèse de la disposition d'une ligne à grand gabarit permettant à des rames RSR sans dispositif de « monte-et-baisse » d'accepter la quasi totalité du trafic PL. On se situe donc sur une ligne nouvelle Lyon-Turin.

95%	Pourcentage du trafic routier au gabarit accepté par RSR
-----	--

On se propose de tester ici l'hypothèse de la circulation de trains longs, composés de 2 rames (1500m). Cette simulation résulte du constat du caractère déterminant de la capacité du système dans le jeu d'hypothèses précédent. Il répond aussi au souci d'optimiser l'usage de l'infrastructure.

#### 8.3.2.3.4.5.1 Valeur Actuelle Nette et Taux de Rentabilité Interne

Fréquence de desserte :

15 mn
-------

VAN (4%)	8568	M€
TRI	130%	
Véh. Emb/j	11424	

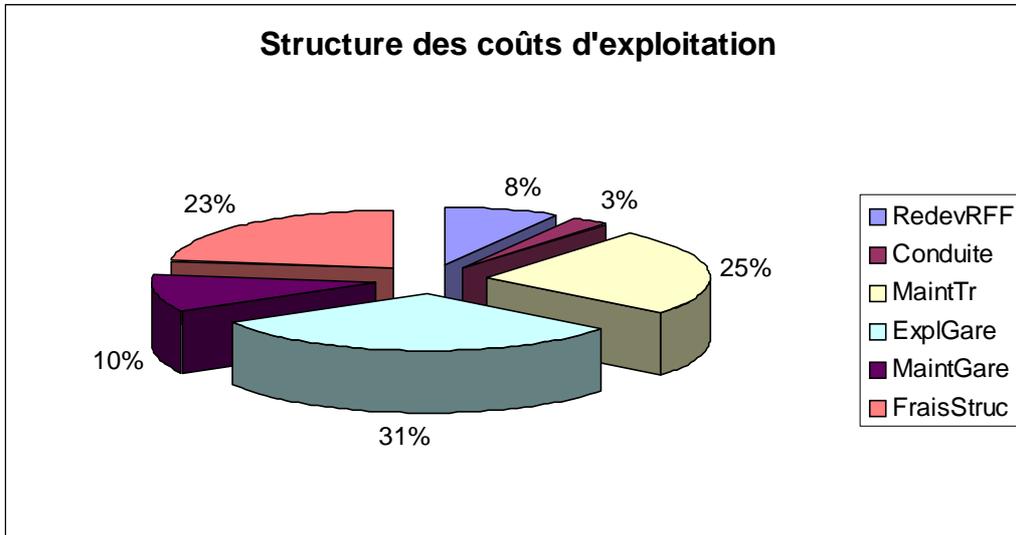
Avec des rames de 1500 m, la capacité double par rapport à l'hypothèse de trains de 750m, la VAN augmente de 75%, et le trafic embarqué de 83%. Sur cette relation, compte tenu des coûts routiers et avec les tarifs de RSR retenus, le service de ferroutage apparaît très compétitif et son trafic semble largement dimensionné par les capacité offerte. Le trafic embarqué est très élevé : il est proche de la totalité du trafic traversant la frontière franco-italienne à Vintimille et aux tunnels du Mont-Blanc et du Fréjus. Par ailleurs, avec un niveau de fréquence de desserte très élevé (15 mn), le montant de la VAN obtenu finance une part très significative (57% si l'on considère un coût total de 15 milliards) de la nouvelle liaison Lyon-Turin. Cette part de financement correspond d'ailleurs à l'ordre de grandeur de la part de la capacité que le service RSR testé consommerait sur la ligne nouvelle. On peut calculer le revenu annuel généré par sillon occupé en divisant le montant de la VAN par le nombre de trains quotidiens. On obtient 53,5 M€.

#### 8.3.2.3.4.5.2 Bilan socio-économique

Les valeurs de pollutions et d'insécurité donnent des résultats d'un ordre de grandeur toujours très inférieur aux montants d'investissement ou de coûts d'exploitation :

- Pollution atmosphérique : 97 millions de litres de GO, 7 M€/an, 118 M€ actualisés sur 25 ans
- Sécurité : 130.000€/an, environ 2,05M€ actualisés sur 25 ans

### 8.3.2.3.4.5.3 Structure des coûts d'exploitation



La structure des coûts d'exploitation est très concentrée sur l'exploitation des gares et la maintenance des trains.

### 8.3.2.3.4.5.4 Optimisation fréquence et fréquence-tarif

#### Optimum fréquence

Fréquence de desserte :

14,44 mn

VAN (4%)	8767	M€
TRI	126%	
Véh. Emb/j	11784	

La recherche de l'optimum sur la seule fréquence conduit à choisir la fréquence maximale techniquement admissible, laissant penser qu'à ce niveau, c'est encore la capacité qui détermine principalement la performance du système. Cet effet de la capacité doit ensuite s'atténuer par simple épuisement du trafic captable. Une simulation de trains de 2250 m (3 rames accouplées) montre cet épuisement avec la VAN qui ne dépasse pas 9 milliards et le trafic en augmentation de 10% seulement, à 13000 véhicules embarqués par jours. Le revenu annuel par sillon occupé demeure à 53 M€.

#### Optimum fréquence/tarif

Fréquence de desserte :

14,44 mn

VAN (4%)	9622	M€
TRI	144%	
Véh. Emb/j	10785	
Coef var	+20%	

L'optimisation tarifaire améliore sensiblement le résultat financier du service. Une augmentation du tarif de RSR de 20% génère en effet une augmentation de la VAN de 855 M€ (+9,8%) en contrepartie d'une baisse de trafic de 999 véhicules/j (-8,5%). Le revenu annuel par sillon occupé atteint alors 58 M€.

#### 8.3.2.3.4.5.5 Recherche du tarif optimum pour des fréquences plus faibles (30 et 60 mn)

Il est intéressant de tester la possibilité d'un service moins intensif en fréquence, mais peut-être plus réaliste (en tout cas plus facile à imaginer au regard de ce que l'on connaît actuellement). Compte tenu des enjeux en matière de report modal, nous avons choisi de conserver des fréquences qui demeurent très élevés par rapport aux standards actuels de service de ferroutage. Quoi qu'il en soit, on trouvera quelques éléments concernant la possibilité d'un service à très faible fréquence dans la partie immédiatement suivante (8.3.2.2.4.5.6) portant sur la recherche des points morts.

#### Recherche d'un tarif optimum avec une fréquence de 30 mn

Fréquence de desserte :

30 mn

VAN (4%)	5164	M€
TRI	110%	
Véh. Emb/j	6046	
Coef var	+9%	

La recherche d'un optimum tarifaire pour une fréquence de 30 mn aboutit à une VAN dépassant 5 Milliards et un trafic embarqué de 6000 véhicules/j. Cette simulation, comme la suivante, montre que dans la situation testée, la pertinence du système RSR n'est pas cantonnée aux niveaux de fréquence les plus élevés. En laissant une place significative à d'autres services sur la liaison testée, le service de ferroutage envisagé contribue encore de façon proportionnée au financement de l'infrastructure qu'il utilise. Le revenu annuel par sillon occupé monte d'ailleurs à 64,5 M€.

Recherche d'un tarif optimum avec une fréquence de 60 mn

Fréquence de desserte :

60 mn

VAN (4%)	2676	M€
TRI	67%	
Véh. Emb/j	3116	
Coef var	+18%	

Avec une fréquence d'une heure, l'optimisation tarifaire de la VAN génère un revenu annuel par sillon occupé de 67 M€

8.3.2.3.4.5.6 Recherche de points morts

Point mort non optimisé

On retrouve une valeur d'abattement du trafic très élevée nécessaire pour annuler la VAN, confirmant ainsi les résultats obtenus.

Fréquence de desserte :

15 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-70%	
Véh. Emb/j	3398

Point mort optimisé techniquement

On retrouve une valeur d'abattement du trafic très élevée nécessaire pour annuler la VAN, confirmant ainsi les résultats obtenus.

Fréquence de desserte :

14,44 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

-70%	
Véh. Emb/j	3543

### Point mort optimisé sur le tarif

On retrouve une valeur d'augmentation du tarif par rapport à l'hypothèse de base très élevée nécessaire pour annuler la VAN, confirmant ainsi les résultats obtenus.

Fréquence de desserte :

15 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+121%

Véh. Emb/j 1591

### Point mort doublement optimisé

Avec un train toutes les 5h30 et un tarif en augmentation de 140%, un service RSR atteint l'équilibre sur la liaison testée. La possibilité économique de services à faible fréquence est ainsi confirmée.

Fréquence de desserte :

330 mn

Coefficient d'abattement du trafic :

0%

Variation de tarif

+141%

Véh. Emb/j 388

#### 8.3.2.3.5 Scénario 4 : simulation de la combinaison de la desserte Nord-Sud Le Havre-Marseille et de l'axe transalpin Lyon Turin avec une connexion à Lyon

Il s'agit dans cette partie de simuler les possibilités de RSR sur un réseau constitué de 2 axes – l'un nord-sud et l'autre est-ouest – connectés au niveau d'une gare commune. Les 2 axes considérés sont les suivants : Le Havre-Paris-Dijon-Lyon-Marseille d'une part et Lyon-Turin d'autre part, Lyon étant la gare commune aux 2 axes. Dans cette gare, les véhicules ou remorques peuvent être pris en charge et embarqués sur RSR, ou débarqués et remis au client, comme dans toute autre gare. Ils peuvent aussi arriver du nord, du sud ou de Turin par RSR, être débarqués, puis rembarqués, à destination de Turin dans les deux premiers cas, vers une autre gare de l'axe N-S dans le dernier cas.

##### 8.3.2.3.5.1 Limites, paramètres et hypothèse de la simulation

L'idée directrice de cette simulation est de tester l'industrialisation des opérations de chargement/déchargement qu'intègre le concept RSR. Le surcroît d'efficacité qui découle de l'industrialisation de ces opérations permet d'imaginer un réseau maillé d'axes de desserte RSR avec la possibilité pour une charge de passer de manière efficace d'un axe à l'autre.

Tel qu'il est conçu, le simulateur STEF ne permet pas de tester la configuration de 2 axes avec une « correspondance », et encore moins celle d'un véritable réseau maillé. C'est un des aspects qui justifie un développement du simulateur dans le sens d'une plus grande souplesse de paramétrage.

L'engagement pris consistait à tester la configuration suivante :

- Un axe Le Havre-Marseille, desservant Paris, Dijon et Lyon ;
- Un axe Lyon-Turin sans gare intermédiaire ;
- Une connexion à Lyon entre les deux axes.

La simulation, impossible à mener avec STEF, ne sera pas réalisée complètement. Mais pour l'approcher, nous proposons de recomposer « à la main » et selon les hypothèses prises en compte dans STEF, les coûts et les parts de marché correspondantes pour une semi-remorque non accompagnée effectuant un trajet IdF-Milan d'une part, et Barcelone-Milan d'autre part.

Dans les deux cas, il s'agit d'un voyage qui, s'il il est effectué par les dessertes RSR, est constitué des séquences suivantes :

- Pré-acheminement jusqu'à la gare d'embarquement (Paris ou Marseille) ;
- Prise en charge et embarquement sur RSR ;
- Trajet RSR jusqu'à Lyon ;
- Débarquement ;
- Embarquement sur la navette RSR Lyon-Turin ;
- Trajet RSR jusqu'à Turin ;
- Débarquement et remise au transporteur
- Post-acheminement jusqu'à destination

De manière cohérente avec les calculs réalisés avec STEF, il convient d'ajouter au coût de l'ensemble de ces séquences, le coût forfaitaire dénommé « coût logistique de gestion d'une remorque non-accompagnée » dans l'onglet « Route » du simulateur et d'isoler le coût d'immobilisation de la semi-remorque dans le système que RSR inclut à chaque séquence.

Rappelons les principales hypothèses de prix et coûts prises en compte dans STEF.

Les principaux paramètres de prix du transport routiers retenus sont les suivant :

1,04	€/kr	Coût kilométrique total (véhicule articulé)
5,10	€/t	Coût d'immobilisation d'une semi-remorque
60,00	€	Coût de gestion d'une remorque non-accompagnée

L'hypothèse de base des tarifs RSR à partir de laquelle ont été menées les simulations se définit ainsi :

60,00	€	Transbordement d'une SR sans tracteur
0,55	€/kr	Prix au km pour une UTF

A ces valeurs, il convient d'ajouter le prix spécifique du débarquement/embarquement à Lyon, nécessaire pour passer la remorque de l'axe N/S à l'axe E/O. Il a été estimé à la moitié du prix de transbordement sur RSR qui inclut, outre une opération d'embarquement/débarquement, la prise en charge de la remorque et son chargement sur un praticable à la gare de départ, puis son déchargement et sa remise au transporteur à l'arrivée.

30,00	€	Rupture de charge entre 2 axes RSR
-------	---	------------------------------------

### 8.3.2.3.5.2 Calcul de la part de marché de RSR avec connexion

Avec les hypothèses précédentes, les résultats sont les suivants :

Trajet	IdF-Milan		Barcelone-Milan	
	RSR	route	RSR	route
Pré-acheminement	52,00 €		532,48 €	
Transbordement sur RSR	60,00 €		60,00 €	
Trajet RSR jusqu'à Lyon	281,60 €		173,25 €	
Débarquement/embarquement à Lyon	30,00 €		30,00 €	
Trajet RSR jusqu'à Turin	171,05 €		171,05 €	
Post-acheminement	147,68 €		147,68 €	
Coût gestion remorque non-accompagnée	60,00 €		60,00 €	
Coût d'immobilisation de la SR	43,57 €		34,23 €	
<b>Total</b>	<b>845,90 €</b>	<b>1 278,00 €</b>	<b>1 208,69 €</b>	<b>1 402,00 €</b>
<b>Part modale</b>	<b>76%</b>	<b>24%</b>	<b>26%</b>	<b>74%</b>

Les parts modales obtenues sur RSR sont conséquentes. Pour savoir si la connexion de ces deux axes permettrait d'améliorer le bilan de chacun des axes pris séparément, il faut encore comparer les parts modales obtenues ici à celles que permettraient les 2 axes isolés. Le tableau suivant présente cette comparaison.

Part de marché de RSR	Axe Lyon-Turin seul	Axe Le Havre-Marseille seul	Lyon-Turin + Le Havre-Marseille
IdF-Milan	60%	6%	76%
Barcelone-Milan	42%	1%	26%

On constate une situation contrastée. Sur la liaison IdF-Milan, la connexion des 2 axes permet d'augmenter globalement la compétitivité de RSR qui devrait accroître sa pénétration sur chacun des tronçons composant la liaison. Le service RSR entre Lyon et Turin seul détournait déjà 60% du trafic IdF-Milan. Sa connexion avec un service (Le Havre-)IdF-Lyon(-Marseille) permet de monter à 76% de détournement sur RSR. Entre la région parisienne et Lyon, la progression est plus spectaculaire car le service RSR (Le Havre-)IdF-Lyon(-Marseille) n'attirait que 6% du trafic IdF-Milan.

Sur la liaison Barcelone-Milan, l'offre RSR entre Marseille et Turin avec une connexion à Lyon paraît au contraire moins compétitive que la simple offre directe de Lyon à Turin. De fait, le simulateur STEF calcule un coût total de 1126€ dans le cas d'un trajet Barcelone-Milan composé d'un pré-acheminement routier jusqu'à Lyon, puis d'un parcours RSR jusqu'à Turin et d'un post-acheminement routier jusqu'à Milan. Cette situation s'explique par le détour qu'impose la position du terminal RSR à Marseille et par la faible amplitude du parcours RSR Marseille-Lyon qui ne suffit pas à compenser la rupture de charge et le détour qui vient d'être mentionné. Sur la liaison Barcelone-Milan, la connexion considérée des 2 axes ne changerait vraisemblablement pas le choix des opérateurs qui continueraient pour 42% d'entre eux à aller chercher le service RSR de franchissement des Alpes à Lyon et à 58% à réaliser le trajet complet par la route.

### 8.3.2.3.5.3 La sensibilité aux prix des prestation RSR

Le calcul des parts modales est évidemment réalisé sur la base d'hypothèses de prix facturés au client (pour les postes de 2 à 5 qui correspondent aux prestations RSR, les autres étant des prix de revient directement supportés par le client), éléments qui vont déterminer son choix. De fait, le prix du débarquement/embarquement n'apparaît pas très pénalisant puisqu'il représente une augmentation du coût de l'acheminement de la remorque par RSR de 3,7% dans le cas d'un trajet IdF-Milan et 2,5% sur Barcelone-Milan. Dans ces conditions, la rupture de charge, grâce à son industrialisation, n'obère que de manière marginale la compétitivité de RSR sur les liaisons observées. Ainsi, sur la liaison IdF-Milan, la part de marché d'un service RSR direct serait de 79% que la rupture de charge abaisse à 76%. On constate donc une élasticité-prix inférieure à 1. Sur la liaison Barcelone-Milan, un service direct permettrait à RSR d'atteindre une part de marché de 31%, contre 26% avec une rupture de charge. On constate néanmoins dans ce cas, où la position de RSR est plus fragile, une élasticité-prix proche de 2.

On peut poursuivre en testant un prix de l'embarquement/débarquement à Lyon de 60€. On obtient alors des parts de marché de 72% sur la liaison IdF-Milan et de 21% sur la liaison Barcelone-Milan. Le tableau suivant résume cette sensibilité au prix de la rupture de charge :

Prix rupture de charge	IdF-Milan	Barcelone-Milan
0 €	79%	31%
30 €	76%	26%
60 €	72%	21%
254 €	32%	5%
490 €	5%	--

Ce tableau présente aussi les prix du débarquement/embarquement à Lyon qu'il faudrait atteindre pour ramener la part de marché de l'une puis de l'autre liaison considérée à 5%. On constate que les valeurs atteintes sont très élevées, bien supérieures au coût de transbordement (quelle que soit la technique employée) d'un véhicule ou d'une remorque routière d'un train à l'autre. Ce dernier résultat confirme l'existence d'un « marché d'interconnexion » économiquement viable dans le cas où deux services RSR coexisteraient avec un point de connexion.

On peut aussi tester la sensibilité des trafics en « correspondance » à l'intérieur d'un système RSR combinant plusieurs lignes à une variation de l'ensemble des prix RSR (il s'agit des postes de 2 à 5).

Variation des prix RSR/hypothèse de base	IdF-Milan	Barcelone-Milan
-40%	85%	60%
-30%	84%	52%
-20%	83%	42%
-10%	81%	34%
0%	76%	26%
10%	69%	19%
20%	58%	14%
30%	46%	10%
40%	33%	7%
50%	23%	5%
60%	15%	4%
70%	10%	3%

On constate évidemment une forte sensibilité au prix facturé des prestations RSR. Cette sensibilité n'est pas constante et est maximale pour des parts de marché situées entre 30 et 70% alors qu'elle s'atténue aux extrêmes. Pour situer les variations de tarif envisageables, on peut se référer aux prix qui optimisent le bilan de chacun des axes pris isolément. La faible compétitivité de l'axe Le Havre-Marseille ne permettait pas une variation de prix importante : en version RSR1, l'optimum était atteint à +2%. Sur l'axe Lyon-Turin, l'optimum trouvé correspondait à une variation de 15% par rapport au prix de base. En se situant autour de 10% de hausse par rapport au tarif de base sur les trajets avec connexion, on constate sur les 2 exemples retenus ici que l'on conserve une pertinence à la solution RSR

#### 8.3.2.3.5.4 Simulation avec un axe Le Havre-Paris-Dijon-Lyon-Fos-Béziers

L'utilisation de la combinaison des axes N-S et E-O sur la liaison Barcelone-Milan est handicapée par la faible longueur de la première étape du parcours RSR entre Marseille et Lyon. Nous proposons de tester ici les conséquences d'un allongement de l'axe N-S entre la région marseillaise et Béziers, en direction de la Catalogne.

Cette prolongation du service RSR à travers la plaine du Languedoc raccourcit d'autant le pré-acheminement nécessaire au départ de Barcelone pour rejoindre le premier terminal RSR (qui passe de 512 km pour rejoindre Marseille à 282 km pour rejoindre Béziers). Bien entendu, la longueur du parcours RSR sur laquelle peut être amorti le coût de la rupture de charge s'accroît en proportion.

Avec cette hypothèse, on obtient les résultats suivants :

Trajet	IdF-Milan		Barcelone-Milan			
	RSR	route	RSR	route		
Pré-acheminement	52,00 €		293,28 €			
Transbordement sur RSR	60,00 €		60,00 €			
Trajet RSR jusqu'à Lyon	281,60 €		272,80 €			
Débarquement/embarquement à Lyon	30,00 €		30,00 €			
Trajet RSR jusqu'à Turin	171,05 €		171,05 €			
Post-acheminement	147,68 €		147,68 €			
Coût gestion remorque non-accompagnée	60,00 €		60,00 €			
Coût d'immobilisation de la semi-remorque	43,57 €		34,23 €			
<b>Total</b>	<b>845,90 €</b>		<b>1 278,00 €</b>		<b>1 059,04 €</b>	<b>1 402,00 €</b>
<b>Part modale</b>	<b>76%</b>		<b>24%</b>		<b>54%</b>	<b>46%</b>

On constate tout d'abord un net redressement de la part de marché de RSR avec connexion qui double sur la liaison Barcelone-Milan. Avec le prolongement du service RSR jusqu'à Béziers, on obtient surtout un coût total pour l'acheminement par RSR avec connexion à Lyon qui devient inférieur à celui du même trajet effectué par la route jusqu'à Lyon et utilisation de RSR entre Lyon et Turin seulement.

La prolongation du service RSR jusqu'à Béziers fait non seulement augmenter la part de marché de RSR sur la liaison Barcelone-Milan de 42 à 56%, mais elle permet aussi la prise en charge ce trafic par RSR sur un parcours beaucoup plus long (sur 797 km contre 311).

## 8.4 SYNTHÈSE ET BILAN

### 8.4.1 INTRODUCTION

Avant de faire la synthèse des simulations qui viennent d'être exposées et d'en tirer un bilan, il convient de rappeler quelles en sont les limites. En effet, la multiplicité des chiffres présentés et leur apparente précision pourraient faire oublier que le développement du concept RSR n'en est qu'à ses débuts. Les résultats des simulations économiques présentées ne sont à prendre que comme des ordres de grandeur, en accordant souvent plus d'importance au sens des variations lorsque l'on modifie une hypothèse qu'aux valeurs absolues.

La plupart des hypothèses de coût utilisées sont des ordres de grandeurs établis par analogie ou à dire d'experts. Concernant les paramètres techniques, la poursuite du développement du concept RSR devra progresser dans le sens du dimensionnement des différents composants et du chiffrage précis de leur coût. De même, les grandeurs proprement économiques, et en particulier la représentation du choix modal, devront être affinées afin de progresser vers une réponse fiable aux questions sur la pertinence économique et la solvabilité de projets opérationnels de mise en œuvre d'un service RSR.

La nécessité de ces démarches de précision du projet se conçoit aisément. Dans le même esprit, il convient d'insister sur ce qui est apparu à bien des égards déterminant dans le travail tant technique qu'économique qui est l'objet de ce rapport : la définition des procédures opérationnelles qui vont permettre de chiffrer enfin les différentes composantes du coût d'exploitation. En effet, sans anticiper sur le bilan des simulations, on peut déjà souligner la prépondérance des coûts d'opération et de maintenance des trains et des gares parmi l'ensemble des charges que doit couvrir un service RSR.

Cette prépondérance n'appelle pas seulement un chiffrage précis de ces différents postes, elle milite aussi fortement à un vigoureux effort d'optimisation, en particulier dans le but de diminuer les coûts fixes du système, ceux qui ne dépendent ni du niveau de service offert, ni du trafic effectif. Cet enjeu est essentiel afin d'étendre le domaine de pertinence d'une solution RSR.

Enfin, l'effort de définition des variables influant sur le bilan économique d'un projet de service RSR doit aussi conduire à intégrer de nouveaux paramètres jusque là traités de façon forfaitaire, voire ignorés. Ainsi, les contraintes concrètes de l'exploitation ferroviaire devront pour la suite être progressivement mieux appréhendées. A cette étape de prise en considération, on peut accepter les principales « impasses » délibérées de cette exploration :

- Raisonner avec une vitesse moyenne,
- Faire abstraction des contraintes de capacité,
- Ignorer les obstacles éventuels à la circulation de trains de 750 m, voire de 1500 m, de longueur,
- Ne pas aborder les problématiques spécifiques liées à traversées des grands nœuds ferroviaires,
- Traiter forfaitairement la maintenance des trains...

Ces limites et approximations sont inévitables dans un travail d'exploration des potentialités d'un concept technologique dont les conditions de mises en œuvre sont encore mal définies. Elles sont suffisantes pour obtenir les ordres de grandeur nécessaires pour apprécier si ce concept trouve à ce stade une pertinence justifiant la poursuite de son développement.

Cela étant, il convient de garder à l'esprit ces limites et approximations au moment d'interpréter les résultats des simulations. Il convient aussi d'inscrire la précision des éléments influant sur le bilan économique du système parmi les tâches prioritaires à entreprendre désormais. Enfin, les résultats d'ores et déjà obtenus donnent aussi des indications à propos des points sur lesquels une optimisation du système devrait être recherchée.

#### **8.4.2 SCENARIO 1 : DES POTENTIALITES SUR UN AXE DE TRANSIT**

L'objectif des simulations qui ont été réalisées était de tester la pertinence économique d'un projet de service de ferroutage basé sur la technologie RSR sur l'axe Lille-Hendaye. A ce stade de définition du dispositif technique, d'évaluation des coûts et de précision des contraintes d'infrastructure, il ne peut être question d'estimer la rentabilité en tant que telle du concept R-shift-R. Il s'agit davantage de donner des ordres de grandeurs, de hiérarchiser différentes options, de constater l'influence de certains facteurs et de relever les incertitudes qui devraient être levées dans les étapes ultérieures d'étude du concept R-shift-R.

##### **8.4.2.1 La pertinence avérée de certains scénarios**

Le premier résultat méritant d'être souligné est que d'un point de vue économique, le système R-shift-R semble présenter des caractéristiques qui lui donnent une pertinence réelle dans certaines configurations.

Ainsi les versions RSR1 et RSR4, qui incluent un dispositif de « monte-et-baisse » les affranchissant des contraintes de gabarit, apparaissent en mesure d'offrir un service performant qui couvrirait ses coûts :

- Avec une fréquence de desserte élevée, il semble possible de couvrir la totalité des coûts d'investissement du système R-shift-R, d'exploitation, d'infrastructure et de retouche des infrastructures pour les dégagements nécessaires de gabarit bas. Ses fréquences élevées offrent des capacités qui permettent des reports importants de la route vers le rail, mais elles impliquent une très forte et sans doute irréaliste utilisation des capacités des infrastructures existantes.
- Avec des fréquences plus faibles, les simulations montrent que les coûts d'investissement, d'exploitation et d'infrastructure peuvent encore être supportés par les recettes générées, mais que les retouches d'infrastructures pourraient devoir être financées sur fonds publics. Le taux d'usage des voies existantes semble plus raisonnable, en revanche, les performances de report modal sont nettement moindres.

Les simulations menées sur les versions RSR2 et RSR3, sans dispositif de « monte-et-baisse », sont contrastées :

- Dans les cas d'une infrastructure existante limitant la hauteur des véhicules acceptés à 4m, seul l'équilibre d'exploitation est atteint, laissant les investissements à la charge

des finances publiques en contrepartie d'un volume de report modal limité. Cette performance économique modeste est cependant plutôt honorable en regard de celle des services similaires existants ou envisagés à court terme. La question spécifique des simulations qui précèdent tient davantage à l'ampleur du service testé entre Lille et Hendaye avec 3 arrêts intermédiaires : ce que l'on peut accepter de financer dans un cadre expérimental ou dans celui d'une action volontariste mais ponctuelle, peut être plus difficile à mettre en œuvre à grande échelle.

- Dans le cas où la disposition d'une infrastructure à grand gabarit lèverait les limites imposées aux véhicules routiers potentiellement embarquables, les performances économiques du système R-shift-R sont tout à fait intéressantes puisqu'elles semblent permettre la couverture d'une part significative des coûts de construction de l'infrastructure nouvelle nécessaire. Cependant, il convient, dans cette configuration sans contrainte de gabarit, de s'interroger sur la pertinence du concept R-shift-R au regard de solutions beaucoup plus simples et éprouvées telles que les wagons plats. R-shift-R garde l'avantage tout à fait conséquent de pouvoir prendre en charge les remorques non accompagnées en contrepartie d'un investissement initial et de coûts d'exploitation plus importants.

#### 8.4.2.2 L'avantage de la massification

L'ensemble des simulations effectuées met en évidence les rendements d'échelle importants induits par le concept. Les résultats les plus positifs sont en effet obtenus pour des fréquences de dessertes élevées, permettant la prise en charge d'un grand volume de trafic routier.

##### 8.4.2.2.1 Une infrastructure dédiée ?

En cohérence avec les résultats de la recherche « Axefret » menée par Patrice Salini, les simulations menées avec STEF confirment la double pertinence qu'il y a à disposer d'une infrastructure dédiée au trafic fret. D'une part, c'est la condition pour rabattre sur le rail une part significative du trafic routier. Les tests menés avec des niveaux de fréquence faibles conduisent à des volumes de report modal qui restent très en deçà des enjeux environnementaux qui justifient habituellement le transfert de la route vers le rail. Une infrastructure dédiée est d'autre part la condition pour offrir des performances économiques attractives aux systèmes de fret.

Evidemment, la disposition d'une infrastructure dédiée apporte de lourdes contraintes. Dédier une ligne existante implique de savoir gérer autrement le trafic voyageurs qui le plus souvent l'empruntait. Les cas où l'on dispose, comme dans la vallée du Rhône, de 2 lignes courant parallèlement à quelques kilomètres l'une de l'autre sont rarissimes. L'insertion de quelques sillons voyageurs dans un graphique de circulation essentiellement dédié au fret offre un service rarement satisfaisant. Construire une ligne nouvelle n'est pas plus facile. Non seulement il faut la financer, mais il faut aussi réussir à réaliser le projet.

##### 8.4.2.2.2 Optimiser l'usage des sillons comme objectif pour la poursuite des projets

En ferroviaire, la rareté des infrastructures est en réalité une rareté des sillons de circulation. De ce point de vue, le concept R-shift-R, qui essaye de maximiser la capacité d'emport de chaque train, est une voie pour améliorer l'usage des sillons disponibles. D'autres caractéristiques du système, telles que le faible temps de chargement/déchargement qui limite

le temps d'occupation des voies en gare ou la motorisation répartie de certaines versions qui améliore les performances d'accélération et fiabilise les circulations vont aussi dans ce sens.

La principale piste d'amélioration, pour ce qui concerne R-shift-R, reste l'allongement de la longueur des trains. Sur ce point, la motorisation répartie présente un net avantage conceptuel par rapport au recours systématique à la traction multiple. En revanche, l'équipement des gares doit accompagner la longueur des trains et obère toute économie d'échelle sur ce point précis. Cette contrainte peut même devenir une rigidité si la possibilité d'allongement des trains n'a pas été prévue au moment de l'implantation des gares R-shift-R.

### **8.4.3 SCENARIO 2 : LA DESSERTE DES HINTERLANDS PORTUAIRES, UNE OPPORTUNITE POUR RSR ?**

L'objectif des simulations réalisées sur l'axe Le Havre-Marseille n'est pas principalement de tester un service RSR sur cette liaison particulière. Le choix de ce scénario a comme principal objectif d'apprécier la capacité d'un service RSR à participer à l'évacuation des flux des conteneurs portuaires vers l'hinterland des ports.

Cependant, avant de considérer la prise en charge des conteneurs, la simulation d'un service RSR sur un autre axe à longue portée, après celles menées sur Lille-Hendaye, vient compléter les enseignements qui ont été tirés du scénario 1. On y constate en effet une situation qui tranche de manière nette avec ce premier scénario. L'introduction d'une fonctionnalité de prise en charge des conteneurs au départ et à destination des ports de Marseille et du Havre change radicalement l'économie du système. On examinera quelles conclusions il convient de tirer de ces tentatives.

#### **8.4.3.1 L'importance d'une répartition géographique favorable des flux captables**

Le premier résultat des simulations menées sur l'axe Le Havre-Marseille tient à l'importance de la relation choisie et de la répartition géographique des trafics captables par un service RSR pour le bilan économique. C'est une évidence, mais l'absence de flux conséquents de bout en bout est le premier handicap de la liaison testée ici. On trouve ici la confirmation de l'importance des flux de transit comme cible prioritaire pour le démarrage des services de ferroutage.

En matière de répartition géographique des flux, la liaison Le Havre-Marseille met aussi particulièrement bien en évidence l'importance du seuil à partir duquel un service de ferroutage devient attractif. On a calculé que pour un service RSR, avec les hypothèses de simulations retenues, l'équilibre entre le coût total d'un acheminement routier et le coût total d'un acheminement par ferroutage est atteint pour une distance de plus de 500 km. Avec la fonction de répartition modale utilisée ici, cet équilibre aboutit à une part de marché pour le service RSR de 6%. Il faut que le coût total de l'acheminement par RSR ne représente que 75% du coût routier pour que RSR atteigne une part de 50%. Sur un itinéraire desservi par RSR, cette valeur correspond à une distance de 1200 km.

On peut discuter ces chiffres. Ils sont sans doute trop prudents et la fonction logistique utilisée devrait peut-être être calée avec un coefficient de raideur supérieur à celui retenu. L'objet de la recherche présente n'est toutefois pas de définir une fonction de partage modale, il s'est

agit sur ce point précis de choisir une hypothèse de travail suffisamment réaliste et pertinente pour effectuer des simulations. C'est bien davantage le sens des évolutions que l'on peut constater d'une simulation à l'autre qui donne du sens aux simulations effectuées que la valeur absolue des résultats obtenus.

De ce point de vue, les tests réalisés sur l'axe Le Havre-Marseille sont intéressants dans la mesure où ils mettent en exergue le double effet de l'absence de trafic de transit sur l'axe :

- D'une part, la faiblesse du trafic de bout en bout se traduit mécaniquement par un niveau de trafic plus bas sur les deux tronçons d'extrémités du service testé ;
- D'autre part, le trafic de bout en bout étant, parce qu'il représente le plus long parcours, celui sur lequel le service de ferroutage est le plus compétitif, sa faiblesse cantonne le marché de RSR à des segments sur lesquels il est relativement moins performant.

#### 8.4.3.2 La fréquence de desserte de RSR prise en étai

Sur l'axe considéré entre Le Havre et Marseille, la recherche du tarif optimal a conduit en général à ne pas s'éloigner de la tarification adoptée comme hypothèse de travail. C'est un hasard. Mais la fixité du tarif révèle la faiblesse de la position compétitive de RSR sur cet axe.

Si le prix ne joue que peu comme variable d'ajustement de l'offre, il ne reste que la capacité, donc essentiellement la fréquence. Compte tenu de la faiblesse des trafics, on pourrait s'attendre à ce qu'une optimisation de l'offre conduise à abaisser fortement la cadence de desserte du service RSR. Ce n'est que partiellement le cas puisque l'optimum est atteint pour des fréquences un peu inférieures à l'heure lorsqu'il n'y a pas de limitation de gabarit. Dans le cas où seul 25% du trafic peut accéder à RSR, la fréquence optimale est repoussée à 4 heures.

En revanche, le résultat important est que dans aucun des cas étudiés, la diminution de la fréquence ne peut conduire à l'équilibre économique. Le mécanisme qui mène à ce résultat, au demeurant classique, met en jeu trois phénomènes :

- D'abord l'effet immédiat de la diminution de la fréquence qui entraîne une diminution des coûts d'exploitation, mais aussi du volume de trafic ;
- Ensuite, la situation concurrentielle fragile du service de ferroutage sur l'axe considéré qui empêche d'augmenter la recette unitaire en augmentant le tarif ;
- Enfin, la présence de coûts fixes élevés, qui ne dépendent pas de la fréquence et empêchent d'atteindre l'équilibre.

Dans cette configuration, pour prendre une image plus simple, la fréquence est prise en étai entre la nécessité de sa réduction pour diminuer les coûts d'exploitation et l'obligation de la maintenir élevée pour amortir des coûts fixes importants.

Par-delà l'exemple particulier de l'axe Le Havre-Marseille, ce mécanisme nous indique sur quel point doit porter l'effort si l'on souhaite améliorer la pertinence économique du concept. Dans le phénomène d'étai décrit, la mâchoire fixe, celle qui empêche d'aller plus loin dans l'optimisation de l'offre, est l'importance des coûts fixes. Ce sont ces coûts fixes, en particulier ceux liés aux gares, qu'il faut réduire si l'on veut étendre le domaine de pertinence de services de ferroutage fondés sur le concept RSR.

### 8.4.3.3 La prise en charge des conteneurs portuaires par un service RSR

Ce scénario permet de simuler la prise en charge de conteneurs portuaires vers et depuis les hinterlands du Havre et de Marseille. Cette simulation ne s'est pas appuyée, au contraire de celles portant sur l'acheminement des véhicules et remorques routières, sur une fonction de marché. La demande de conteneurs est supposée infinie et la seule contrainte de concurrence a été d'imposer une tarification des prestations RSR telle que le coût total de l'acheminement par RSR d'un conteneur sur chacune des relations desservies s'élève à 90% seulement du coût total du même acheminement effectué par la route.

A partir de ces hypothèses et en l'absence d'une fonction de partage modal, la validation de la pertinence économique du service testé est manichéenne :

- Soit le tarif imposé aux prestations RSR est supérieur au coût pour l'opérateur du service RSR de ces mêmes prestations ; dans ce cas, cette nouvelle fonction de RSR est au moins économiquement équilibrée ;
- Soit le tarif imposé aux prestations RSR est inférieur au coût pour l'opérateur de ces prestations et l'acheminement des conteneurs est déficitaire.

La recherche des points morts apporte quelques enseignements. Elle confirme d'abord l'efficacité économique de RSR pour les débits importants. Pour des fréquences élevées, la performance économique de RSR pour l'acheminement des conteneurs devient très peu sensible aux coûts variables de transbordement. En revanche, ces simulations confirment également le poids des coûts fixes qui obèrent fortement les hypothèses de services de niveau de fréquence moyen ou faible.

La première conclusion a déjà été énoncée plusieurs fois : il est primordial que les développements du système RSR à venir optimisent le concept dans le sens d'une réduction des coûts fixes.

La seconde conclusion vient atténuer la première en prenant en compte les enjeux actuels des dessertes portuaires. Les grands ports sont évidemment de puissants générateurs de trafics terrestres massifiés. Avec la mondialisation des échanges, la croissance actuelle et attendue dans le futur des trafics portuaires est très importante. Un premier enjeu, « technique », est de trouver les moyens d'évacuer les flux vers leur hinterland de manière efficace d'un point de vue économique social et environnemental. Un second enjeu, « concurrentiel », est de desservir un hinterland élargi à moindre coût pour renforcer ainsi leur position par rapport aux autres places portuaires. Dans ce contexte, la question pour les grands ports est bien de disposer de moyens d'évacuation massifs et économiques et RSR apparaît bien comme un moyen d'évacuation économique lorsqu'il traite des flux massifs.

Cela étant, on peut se demander si le concept RSR est encore nécessaire s'il ne s'agit que de transporter des conteneurs. RSR démontre l'intérêt et la possibilité d'augmenter fortement la productivité des trains en accélérant les opérations de chargement/déchargement. Le « praticable » est-il utile pour manipuler des boîtes qui sont toutes munies de coins de préhension ?

On peut enfin renverser la problématique en observant que sur cette liaison, la prise en charge des conteneurs au départ des ports vient utilement compléter le marché initial de RSR – l'acheminement des véhicules et remorques routières – qui se révèle insuffisant. Dans cette optique, il s'agirait de considérer l'évacuation des conteneurs non plus comme un objectif

premier, mais comme une opportunité pour donner une viabilité économique à un service RSR sur un axe où son bilan est fragile. De ce point de vue, en confirmant la pertinence économique de l'articulation de 2 services distincts mais complémentaires, les simulations réalisées élargissent plutôt le champ des stratégies envisageables pour lancer un service RSR.

#### **8.4.4 SCENARIO 3 : L'EFFICACITE DE RSR SUR UNE LIAISON DE FRANCHISSEMENT D'UN OBSTACLE NATUREL**

Le scénario 3 correspond au franchissement d'un obstacle naturel. Nous avons choisi de réaliser les simulations sur l'axe Lyon-Turin en franchissement des Alpes. Cet axe est caractérisé par une distance courte (environ 300 km de Lyon à Turin) et par un coût routier élevé représenté dans la simulation par la prise en compte du montant du péage de franchissement du tunnel du Mont-Blanc ou du Fréjus dont le tarif PL s'élève à 324 € (fin 2007). Sur cet axe, comme sur les autres simulations, le raisonnement a été mené hors contrainte de capacité des lignes ferroviaires utilisées.

Si la faible longueur de l'axe considéré est *a priori* un facteur défavorable à RSR, le montant élevé du coût de franchissement des tunnels routiers vient en réalité plus que compenser ce handicap. En effet, le seul coût du péage routier représente à lui seul environ 80% du coût total d'un acheminement entre Lyon et Turin *via* RSR (pré/post-acheminement compris). Cet élément est à prendre en compte si l'on souhaite transposer les résultats obtenus sur cet axe à d'autres exemples, en particulier à la traversée des Pyrénées pour laquelle les tarifs autoroutiers sont nettement moins dissuasifs et sont vraisemblablement appelés à le demeurer.

Le résultat qui saute aux yeux à l'examen des simulations effectuées est le montant très élevé des Valeurs Actuelles Nettes dégagées dans de nombreuses hypothèses : 5,7 milliards en version RSR1 et une fréquence de 12 mn, encore 1,3 milliards avec une fréquence d'une heure, et même 2 milliards en version RSR2 et en n'acceptant que 25% du parc routier, avec une fréquence de 24 mn.

##### **8.4.4.1 Malgré des incertitudes, une pertinence économique avérée**

Ces montants sont tout à fait considérables. Ils sont en rupture complète avec les résultats des services existant de ferroulage à travers les Alpes, qu'il s'agisse de l'AFA expérimentale ou des « routes roulantes » qui traversent la Suisse ou l'Autriche, pour lesquelles la couverture des coûts d'exploitation demande toujours une subvention publique.

Au vu de ce contraste entre des exploitations existantes et un service RSR dont les résultats ne sont que simulés avec encore beaucoup d'imprécision, on s'interrogera d'abord sur la pertinence des hypothèses de coût retenues pour RSR. C'est l'un des objectifs de ce rapport que d'explicitier ces hypothèses pour permettre leur discussion. Sans doute aussi, l'exploitation des services ferroviaires sur des lignes de montagne est-elle sujette à des coûts exceptionnels, plus élevés que ceux que l'on rencontre « en plaine ». Or, les simulations réalisées avec STEF n'intègrent de paramètres permettant de spécifier ces coûts exceptionnels.

Concernant les coûts d'exploitation des trains, tout d'abord, on remarquera ici que la motorisation répartie, qu'intègre les deux versions RSR1 et RSR2 les plus performantes,

limite fortement l'occurrence de ces coûts exceptionnels. La motorisation répartie supprime la sujétion forte d'un renfort de traction aujourd'hui nécessaire à partir de St Jean de Maurienne et, si les caractéristiques physiques de l'infrastructure (capacité d'alimentation et cantonnement de signalisation en particulier) le permettent, elle rend possible la circulation des même convois en plaine et sur les itinéraires de franchissement des Alpes. La couverture de ces aménagements d'infrastructure et des surcoûts d'exploitation d'une ligne de montagne est l'affectation la plus naturelle des surplus de VAN dégagés, par l'intermédiaire d'une tarification adaptée de l'usage de l'infrastructure.

On soulignera enfin comme un élément positif d'évaluation d'un service RSR en franchissement des Alpes que le niveau du trafic détourné de la route est important au regard des trafics routiers actuels. Avec une fréquence de desserte d'une heure, un service RSR en version RSR1 prendrait en charge un trafic équivalent au tiers du trafic transitant aujourd'hui par les Alpes du Nord franco-italiennes. En attendant un éventuel itinéraire ferroviaire à grand gabarit et haute capacité, on peut entrevoir là l'esquisse d'une solution de moyen terme à l'épineux problème du transit alpin. La pertinence d'une hypothèse RSR pour le transit alpin n'est donc pas seulement avérée d'un point de vue économique. Elle peut aussi constituer une opportunité pour les politiques publiques de transport à travers les Alpes, sans attendre la mise en œuvre d'une liaison à grand gabarit.

#### **8.4.4.2 L'affectation de la capacité des infrastructures et la productivité du matériel roulant des problématiques à relier**

Reste évidemment la question de la capacité de l'itinéraire ferroviaire actuel à supporter le niveau élevé de circulations sur lequel sont fondées ces simulations. Sur cette problématique, la recherche des points morts apporte quelques éléments de réflexion tangibles. On soulignera en particulier que l'équilibre du bilan peut être atteint pour des fréquences de desserte beaucoup plus faibles, donc plus « réalistes ». Ainsi, en version RSR1, une fréquence de près de 3h (7 A/R par jour), avec un tarif en forte augmentation, permet l'acheminement quotidien de près de 240 véhicules ou remorques sans déficit public. Une faible fréquence ne semble donc pas être un élément qui devrait empêcher le démarrage d'un tel service.

Plus globalement, la question se pose de l'optimisation de l'usage des infrastructures dont la capacité est limitée, donc précieuse. On ne reviendra pas sur l'arbitrage à réaliser entre sillons de trains voyageurs et sillons de trains de fret, sauf à souligner qu'aujourd'hui, on privilégie pour les sillons fret, la fiabilité, au détriment de la vitesse, laquelle est jugée sans grande efficacité économique sur ce segment. RSR repose sur une logique différente et son principal atout est d'accélérer la rotation des trains, donc leur productivité en raccourcissant au maximum les arrêts en gare. Cette logique économique du concept n'est tenable que si elle se traduit aussi dans les temps de circulation des trains. Si l'on accepte, parce que l'on fait peu cas aujourd'hui de la productivité du matériel roulant, de tracer des sillons de fret, certes « fiables », mais à des vitesses commerciales très faibles, on obère les progrès qui devront être réalisés dans la rotation des trains, que ce soit avec le concept RSR ou avec tout autre système technique.

#### 8.4.4.3 Dans l'hypothèse d'un itinéraire à grand gabarit, une capacité contributive à l'infrastructure très importante

La dernière partie des simulations menées sur le scénario 3 consiste à tester les potentialités de RSR sur un itinéraire à grand gabarit que l'on suppose disponible sur l'itinéraire Lyon-Turin. La perspective de ces simulations est donc la réalisation du projet Lyon-Turin actuellement envisagé. Dans ce cadre, la fonctionnalité de « monte-et-baisse » des versions RSR1 et RSR4 n'est plus nécessaire et RSR en version 2 est réputé accepter la quasi-totalité du parc routier en circulation.

Les résultats des simulations sont très positifs. En réalité, il est très proche de ceux obtenus en version RSR1 sur l'itinéraire classique dans la mesure où aucune limitation de capacité n'a été prise en compte. Avec l'abandon du « monte-et-baisse » et des coûts correspondants, le bilan se trouve même légèrement amélioré.

Les tentatives d'optimisation menées conduisent toutes à l'adoption de la fréquence de desserte maximale que permet la technologie mise en œuvre, légèrement inférieure au quart d'heure. Dans la perspective de long terme à l'horizon de laquelle la disponibilité d'un axe à grand gabarit sur l'itinéraire Lyon-Turin situe ces simulations, un niveau de service impliquant un train chaque quart d'heure peut être imaginé. Il convient alors de juxtaposer deux réalités de cette situation :

- D'une part, la mise en œuvre d'un train par quart d'heure dans chaque sens consomme, en ordre de grandeur, la moitié des sillons offerts par l'infrastructure ;
- D'autre part, le revenu généré par ce service, et donc a priori disponible pour contribuer au financement de l'infrastructure, apparaît grosso modo en proportion de cette occupation : avec des trains de 750 m, la VAN s'élève à plus de 6 milliards d'euros (à comparer aux 15 milliards d'euros environ auxquels le projet Lyon-Turin est estimé), avec des trains de 1500 m, la VAN calculée à travers STEF atteint 9,6 milliards d'euros.

La contribution au financement de l'infrastructure que pourrait dégager un service RSR sur l'axe Lyon-Turin est illustrée par un ratio simple : pour des trains de 750 m circulant à haute fréquence, le revenu annuel généré par sillon occupé dépasse 30 M€ ; pour des trains de 1500 m, le revenu annuel généré par sillon occupé dépasse 60 M€.

Au passage, on note l'intérêt de la mise en œuvre de trains longs. En effet, sur cet axe où la situation de RSR apparaît très compétitive, la croissance des coûts fixes induite par l'allongement des trains et surtout des gares (mais il n'y a que 2 ½ gares sur cette liaison) peut être amortie par le surcroît de trafic généré. L'augmentation de la VAN entre les deux hypothèses de longueur de train – 3,5 milliards d'euros... – n'est finalement que la traduction de l'intérêt pour la collectivité d'une utilisation plus intensive des capacités disponibles.

Le dernier point à mettre en exergue concerne la possibilité d'envisager un service RSR moins intensif avec une pertinence économique aussi bonne voire meilleure. En effet, les simulations menées avec des fréquences plus faibles que celles de l'ordre du quart d'heure qui viennent d'être évoquées confirment largement les résultats précédents. Avec des fréquences de 30 mn ou de 60 mn, le revenu annuel généré par sillon occupé tend plutôt à augmenter encore. Il dépasse 35 M€ pour des trains de 750 m et 65 M€ pour des trains de 1500 m. Ce résultat est important car il désigne des niveaux plus éloignés des performances maximales du

système, pour lesquels les risques d'exploitation sont par conséquent *a priori* moins importants. Enfin, avec des trains de 750 m comme avec des trains de 1500 m, la recherche de points morts conduit à un équilibre moyennant des fréquences de desserte faibles, de l'ordre de 4h, voire 5h30. Evidemment, ces niveaux d'équilibre ne génèrent par définition aucune capacité contributive supplémentaire par rapport au montant du péage moyen pris en compte par STEF. Il n'en reste pas moins qu'ils pointent des niveaux de service qui ne nécessitent encore aucune subvention publique d'exploitation.

L'ensemble des simulations réalisées sur l'axe Lyon-Turin peuvent apparaître trop optimistes. Les résultats en sont certes très positifs. Ils incorporent néanmoins les hypothèses délibérément prudentes avec lesquelles le simulateur STEF a été alimenté. Ne serait-ce qu'au regard des problématiques du transit alpin, les résultats de ces simulations plaident fortement en faveur d'un approfondissement du développement du concept RSR.

#### **8.4.5 SCENARIO 4 : VERS UNE LOGIQUE DE RESEAU PAR L'INTERCONNEXION DE DIFFERENTES LIGNES RSR ?**

Le scénario 4 consiste à juxtaposer deux axes de desserte RSR, entre Le Havre et Marseille (via Paris, Dijon et Lyon) d'une part et entre Lyon et Turin d'autre part, avec l'organisation à Lyon d'une plate forme de connexion entre les 2, à Lyon, où les charges arrivant par l'un des axes peuvent être débarquées puis rembarquées pour poursuivre leur voyage sur l'autre axe.

##### **8.4.5.1 Effet de réseau**

Par delà l'intérêt spécifique des deux axes considérés, l'objectif de ce scénario est délibérément d'explorer les effets de réseaux potentiels d'un système de desserte RSR déployé sur plusieurs axes. Cette recherche de la connexion de plusieurs axes est présente dès l'origine du concept RSR. En effet, l'industrialisation des opérations d'embarquement/débarquement découlant de la recherche de gains de productivité du matériel roulant et l'optimisation de la circulation de ce matériel circulant en navette sur un axe fixe permet d'envisager une connexion efficace tant au plan organisationnel qu'en termes de coût entre différents axes desservis.

Compte tenu des contraintes d'adaptabilité du simulateur STEF, poussé ici au-delà des limites raisonnables d'une feuille de calcul sur tableur, la simulation de cet embryon de réseau ne porte pas comme dans les autres scénarios sur la globalité du système RSR mis en place. Les tests réalisés concernent deux trajets spécifiques, entre la région Île-de-France et l'agglomération milanaise d'une part et entre l'agglomération de Barcelone et à nouveau la région de Milan d'autre part. Sur ces deux trajets, le coût d'un acheminement utilisant l'offre combinée RSR et la part de marché en résultant a été systématiquement exploré.

##### **8.4.5.1.1 Un effet-réseau réel, mais pas systématique**

On constate que sur les deux relations, le coût global de l'acheminement via l'offre RSR est inférieur au coût global d'une solution routière. Ensuite, les deux trajets étudiés présentent des conclusions différentes.

Sur la relation IdF-Milan, la connexion des 2 axes se traduit par un gain global important. La solution combinée est non seulement moins onéreuse que le trajet routier concurrent, mais aussi qu'un trajet route+RSR qui n'emprunterait que l'un des deux tronçons RSR connectés (Paris-Lyon avec un post-acheminement routier de Lyon à Milan ou Lyon-Turin avec un pré-acheminement de Paris à Lyon). La part de marché de RSR découlant de la combinaison des 2 services RSR est ainsi supérieure à ce qu'elle est sur chacun des 2 axes pris isolément. L'effet-réseau est donc global et important puisque sur la partie Lyon-Turin, la part de RSR passe ainsi de 60 à 76% et sur la partie Paris-Lyon, elle passe de 6 à 76%. Sur la relation Barcelone-Milan, l'offre combinée RSR est effectivement plus économique qu'un acheminement routier de bout en bout, mais elle reste plus onéreuse qu'une solution routière de Barcelone à Lyon puis ferroviaire (RSR) de Lyon à Turin. Dans ces conditions, l'effet-réseau à attendre est faible. Il correspond au basculement résiduel de quelques pourcents du trafic Barcelone-Milan sur une solution ferroviaire entre Marseille et Lyon.

La conclusion de cette première exploration reprend les enseignements des deux trajets observés. La relation IdF-Milan démontre l'existence d'un effet-réseau. Elle illustre la forte ampleur qu'il peut avoir. La relation Barcelone-Milan montre à rebours et si besoin était que cet effet-réseau n'est pas systématique. Il ne suffit pas de connecter deux services RSR pour les rendre compétitifs sur toutes les relations !

#### 8.4.5.1.2 *Un effet-réseau qui est aussi un effet-distance*

Enfin, et c'est important, les simulations menées sur le prix de la connexion à Lyon montrent que celui-ci n'est pas vraiment déterminant dans les résultats obtenus. Comme tout élément de coût pour le client, il intervient dans le choix modal mais son annulation conserve les ordres de grandeur obtenus : même effectuée gratuitement, la connexion entre un trajet RSR Marseille-Lyon et un autre Lyon-Turin ne rend pas cette solution viable pour un acheminement de Barcelone à Milan.

Dans ces conditions, il est apparu intéressant d'explorer la variable qui détermine la faible attraction d'une solution RSR interconnectée sur Barcelone-Milan : la trop faible longueur du parcours Marseille-Lyon. On a donc testé un allongement de la desserte RSR sur l'axe Nord-sud en prolongeant le service de la région marseillaise jusqu'à Béziers. La plus grande distance parcourue via RSR change alors la donne et permet, comme sur la liaison IdF-Milan, d'enregistrer un véritable effet-réseau sur la liaison Barcelone-Milan. Cette dernière simulation met en lumière une 2<sup>nd</sup>e modalité classique de l'effet-réseau. Celui résulte de la connexion de 2 axes distincts, mais aussi de l'allongement des axes connectés.

#### 8.4.5.2 *Simuler plus en détail l'effet de réseau*

Ces explorations du potentiel d'effet-réseau d'un système d'axe de service RSR interconnecté restent lacunaires. Elles amènent à penser que ce potentiel est non négligeable, voire important, qu'il ne doit donc pas être négligé dans la poursuite du développement du concept. Elles montrent aussi que les moyens de sa prise en compte sont aujourd'hui totalement insuffisants. Le simulateur STEF n'est pas en mesure de simuler même le cas simple de 2 axes. Cet exemple montre qu'il demande à être complètement réécrit pour être plus adaptable. Au-delà du simulateur, la gare d'interconnexion doit également être précisée, et repensée en particulier avec l'objectif de mettre en œuvre toutes les économies d'échelle qui permettraient de faire mieux que la simple juxtaposition des équipements de chacun des axes connectés.

#### **8.4.6 BILAN : UNE PERTINENCE ET DES INCERTITUDES QUI JUSTIFIENT LA POURSUITE DU DEVELOPPEMENT DE RSR**

L'ensemble des simulations réalisées met clairement en évidence l'existence de domaines de pertinence de RSR. Il met aussi en lumière les incertitudes qui résultent largement de l'insuffisante connaissance de nombreux éléments de coût. Enfin, ces simulations sont aussi l'occasion de préciser quelques éléments du contexte extérieur à RSR mais qui conditionnent aussi l'économie d'un service tel que RSR.

##### **8.4.6.1 Des créneaux de pertinence qui justifient la poursuite des investigations**

Les simulations ont fait clairement apparaître des créneaux de pertinence d'un service de ferroutage utilisant la technologie RSR.

En termes d'itinéraires, les liaisons de franchissement d'un obstacle naturel ou les axes de grand transit constituent des situations favorables sur lesquelles les gains de productivité attendus de la mise en œuvre du concept RSR pourraient se déployer. Les jeux d'hypothèses testés font apparaître, au-delà de bilans économiques parfois très positifs, que RSR pourrait constituer un élément de réponse à quelques-unes des grandes problématiques des politiques publiques de transport de marchandises : le transit alpin, la desserte des grands ports, les axes de grand transit.

En termes de niveau de service, les économies d'échelle produites par RSR sont très importantes lorsque le niveau de fréquence est élevé, mais dans de nombreuses simulations, le point mort du bilan est atteint pour des niveaux de fréquence comparables à ceux des services de ferroutage actuellement commercialisés, mais également subventionnés. Cela signifie que les performances potentielles de RSR apparaissent au moins équivalentes, voire supérieures aux systèmes existants.

S'il ne fallait retenir qu'une seule conclusion des simulations économiques réalisées dans le cadre de cette recherche, ce serait la suivante :

*L'existence de différents créneaux de pertinence et la variété des jeux d'hypothèses dans lesquels ils apparaissent justifient à eux seuls la poursuite du développement de RSR.*

##### **8.4.6.2 Une évaluation à préciser, des coûts fixes à réduire**

A ce stade du développement de RSR, la connaissance des paramètres économiques du système et de sa mise en œuvre ne sont encore connus que grossièrement. En cela, la validation économique du concept RSR est en phase avec sa définition technique : à mesure que le dimensionnement des différents composants du système se précise, la connaissance des coûts afférents s'affine. La poursuite du développement technologique de RSR permettra aussi d'avancer vers un bilan plus précis.

Les simulations ont néanmoins fait apparaître certains points critiques du système. La philosophie économique qui a présidé à la définition du concept RSR peut être résumée par la recherche de gains de productivité sur le matériel roulant. La contrepartie de cet effort est la concentration des investissements sur les gares. Ces investissements en gares induisent dans le bilan économique des coûts fixes importants, sans doute renforcés dans les simulations par le calcul des coûts de maintenance au prorata des coûts d'investissement.

Les coûts fixes constituent clairement l'élément critique du système. Leur abaissement permettrait d'étendre le domaine de pertinence de RSR et faciliterait en particulier sa mise en œuvre dans le cadre d'un service à faible fréquence. Or, dans la perspective d'une concrétisation de cette innovation par une expérimentation en grandeur réelle, la possibilité d'un service à faible fréquence devient stratégique. Quelles que soient les potentialités « à plein régime » d'un système de ferroutage, les obstacles sur la route menant de l'innovation conceptuelle à la mise en œuvre concrète sont nombreux. Il doit pouvoir être testé pour un coût et un risque financier limité, donc dans le cadre d'un service léger. L'optimisation du concept RSR dans le cadre de son développement futur doit donc prioritairement viser la diminution de ses coûts fixes.

Enfin, l'aboutissement de cette recherche marque aussi la fin de son développement « en laboratoire ». Il convient désormais de confronter plus systématiquement le système RSR et ses potentialités à la réalité du monde des transports. Cette immersion dans la réalité est particulièrement importante vis-à-vis du monde ferroviaire. Les prochaines simulations économiques des performances de RSR devront mieux et plus précisément intégrer les contraintes de l'exploitation des chemins de fer.

La confrontation à la réalité est également nécessaire vis-à-vis des chargeurs et des transporteurs routiers, même si le parti pris de s'insérer dans une logistique « routière » largement dominante facilite cet aspect. Enfin, il faudra confronter RSR à l'industrie ferroviaire, tant sur les coûts de production que sur la faisabilité technique et réglementaire des dispositifs technologiques proposés.

Comme toute innovation, comme tout projet complexe, la validation de la pertinence économique de RSR n'est pas acquise définitivement. Elle a été établie dans les conditions d'imprécision et d'incertitude découlant de l'état actuel de définition de la technologie RSR et de sa mise en œuvre. Une nouvelle étape de développement de RSR conduira nécessairement à une révision et un affinage de son bilan économique.

#### ***8.4.6.3 Préparer les conditions nécessaires à l'émergence d'innovations dans le fret « durable »***

La possibilité de voir se concrétiser une innovation du type de RSR ne dépend pas que des qualités internes du concept proposé, ni uniquement des développements qui lui sont apportés. Elle est aussi largement déterminée par des conditions extérieures au système technique proposé. De ce point de vue, les simulations effectuées ont à nouveau permis de repérer des points critiques.

Le premier de ces points critiques tient à la productivité du matériel roulant. La recherche d'une rotation maximale du matériel roulant est l'un des points de départ du concept RSR. Mais au-delà de cette innovation particulière, c'est l'un des points-clés d'une exploitation ferroviaire performante. Il ne suffit que de considérer le prix d'une locomotive pour réaliser combien la productivité du matériel peut influencer sur le bilan économique d'un service ferroviaire. Dans le domaine des transports de voyageurs, l'analyse du bilan des projets de TGV fait bien ressortir cet aspect et l'impact de l'accélération de la rotation des rames.

Cette recherche de productivité du matériel roulant a largement conduit la conception des gares RSR, conçues pour réduire au maximum les temps d'escale des trains. Elle est partie intégrante de l'économie du système qui peut ainsi compenser les investissements en gares.

Mais cette mécanique ne peut fonctionner que si les temps de circulation des trains n'obèrent pas complètement les gains réalisés en gares.

Il en résulte que la possibilité de voir s'améliorer les performances économiques du fret ferroviaire repose aussi sur la vitesse permise par les sillons qu'on lui réserve. Le contexte de cadencement progressif du réseau entraîne une importante rigidification de l'agencement de la circulation des trains. Les choix qui sont actuellement opérés tendent à figer la vitesse commerciale effective des trains sur une longue période. Ils arbitrent aussi l'allocation de la capacité des infrastructures sans que l'intérêt collectif de services de fret à haute fréquence soit pris en compte avec la même attention que celui du renforcement des dessertes TER. Or, ces choix déterminent en partie les possibilités de progrès futurs du fret ferroviaire.

Un second point critique pour RSR est à la limite de l'investigation économique, mais il est capital. Pour les services de ferroutage, le gabarit B+ progressivement dégagé sur les lignes ferroviaires classiques ne permet de prendre en charge qu'une part restreinte du parc routier en circulation. Le dispositif de « monte-et-baisse » des versions RSR1 et RSR4 permet de lever cette contrainte par l'abaissement des wagons lors du franchissement des ouvrages les plus coûteux à rehausser.

Les simulations économiques ont mis en évidence l'intérêt spécifique de ce dispositif pour rendre efficace des services sur lignes existantes, sans attendre la construction éventuelle de lignes nouvelles à grand gabarit. On peut ajouter que l'intérêt pour l'opérateur des services RSR que calculent les simulations se double d'un intérêt beaucoup plus important pour la collectivité si la nécessité de construire de nouvelles lignes ferroviaires, forcément coûteuses et traumatisantes pour les territoires traversés, diminuait.

La mise en œuvre du dispositif de « monte-et-baisse », s'il s'avère techniquement viable, devra néanmoins faire l'objet d'une certification. Cette étape indispensable est cruciale, non seulement parce qu'elle détermine la possibilité concrète de mise en œuvre, mais aussi parce qu'elle concentre le risque de développement que prendrait un industriel constructeur de matériel roulant qui miserait sur RSR. Il est donc essentiel que la puissance publique s'assure de la pertinence et de l'efficacité de la procédure de certification. Celle-ci doit garantir la sécurité et la compatibilité technique des trains mis en circulation. Sans déroger à cette mission fondamentale, elle doit aussi se dégager des conservatismes et des rigidités réglementaires qui peuvent empêcher de voir déboucher des innovations pertinentes et originales.

## 9. MISE EN PERSPECTIVE

### 9.1 FORCES, FAIBLESSES, MENACES ET OPPORTUNITES DU CONCEPT R-SHIFT-R

Les forces, faiblesses, menaces et opportunités du concept R-shift-R à la date d'écriture du présent rapport peuvent être synthétisées comme suit :

<p><b>Forces</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les enjeux de compétitivité de la solution, bien cernés et guidant la conception,</li> <li>• Des spécifications fonctionnelles du système très avancées,</li> <li>• Le gabarit, GB+ utilisable pour des remorques de 4,2 mètres,</li> <li>• L'intégration raisonnée des ruptures technologiques,</li> <li>• La globalité technologique du concept,</li> <li>• Le support du PREDIT, obtenu au travers du présent projet avec pour objectif de valider la viabilité du concept.</li> </ul>
<p><b>Faiblesses</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La globalité technologique du concept,</li> <li>• Pas d'industriel et d'opérateur multimodaux dans le projet,</li> <li>• Pas de modalité de financement clairement identifiée pour la suite du projet,</li> <li>• La fiabilité du pré chiffrage des coûts de la solution.</li> </ul>
<p><b>Opportunités</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Des projets concurrents, et moins ambitieux,</li> <li>• Un investissement difficilement réutilisable (non spécifique à R-shift-R, mais à toute solution de ferroutage),</li> <li>• Un démonstrateur réussi pourrait faire croire que la solution est trop complexe,</li> <li>• L'ombre de l'échec COMMUTOR,</li> <li>• La demande n'est peut être pas là,</li> <li>• Les contraintes de l'exploitation ferroviaire actuelles sont ignorées (volontairement).</li> </ul>
<p><b>Menaces</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La libéralisation du fret ferroviaire,</li> <li>• La pression environnementale,</li> <li>• La poursuite du projet à travers les initiatives menées par le PREDIT, l'ANR, les pôles de compétitivité et/ou un cofinancement Européen.</li> </ul>

## 9.2 POINTS CLES DU CONCEPT

### 9.2.1 INTRODUCTION

Les différentes technologies disponibles pour la construction d'un wagon et les conséquences économiques de la variation de certains paramètres (comme la longueur du wagon, la garde aux rails...) ont été analysées en détail au cours du projet. La fiche technique du chapitre 8.2.5 récapitule les caractéristiques générales retenues pour la mise en œuvre du concept R-shift-R. L'imprécision de certains dimensionnements est essentiellement liée à l'état général des études engagées aussi bien par les porteurs du projet que par l'INSA. Une attention toute particulière a été portée sur l'analyse des coûts des différents composants du concept ; elle a permis de réaliser une intégration progressive des innovations technologiques au sein du simulateur « STEF ». Innovations qui de premier abord semblent incontournables, comme certains membres du comité de pilotage l'ont souligné pendant la présentation des résultats.

Les réflexions engagées au cours du projet sur la mise en œuvre d'un tel concept font apparaître un certain nombre de difficultés. Elles sont d'ordre conceptuel, et/ou structurel et/ou fonctionnel. Difficultés que n'a pas manqué de signaler le comité de suivi et qui sont précisées dans la suite.

### 9.2.2 DIFFICULTES DE CONCEPTION BOGIE / GABARIT

D'après les résultats de la campagne de mesures réalisées par LTF, moins de 30% des véhicules sont à 4 m et plus de 95% à 4,2 m. Ce résultat confirme la pertinence du concept R-shift-R en terme d'innovations à intégrer au bogie et plus largement au ferroutage. Le concept revendique l'aptitude de faire passer une remorque de 4,2 mètres sur son wagon dans le gabarit GB+/GB1. Ce gabarit qui a été retenu pour le recalibrage du tunnel du Fréjus entre Lyon et Turin a servi de base à toutes les recherches. Il libère un passage de 4237 mm de haut entre le rail et l'angle extérieur que représente une remorque de 2600 mm. Ces valeurs laissent une garde entre le rail et la plate-forme du wagon de 137 mm si l'on considère la suspension de la remorque abaissée (voir chapitre 8.2.3.4.3).

Les contraintes de gabarit et l'espace disponible impliquaient de réfléchir sur la conception du bogie. La complexité apparente qui en découle pour ce dernier a soulevé de nombreuses interrogations lors de sa présentation aux réunions du comité de pilotage. La confirmation par l'INSA des recherches technologiques et les calculs préliminaires fait par les concepteurs tend à démontrer la faisabilité théorique d'un tel bogie et à amoindrir ces appréhensions. L'appréciation des résultats a reporté et limité les craintes à la question pertinente, qui est celle de l'homologation de ces innovations par les services compétents ; ces craintes vont jusqu'à reconnaître les effets bloquants des procédures d'homologation actuelles. Les idées « par exemples » de répartir la puissance sur chaque bogie ou d'une garde aux rails variable ne paraissaient pas pouvoir passer le stade de l'intention technologique (voire relever de l'utopie...). L'acceptation du concept se trouve aujourd'hui singulièrement amplifiée par la mise en service des trains régionaux et de l'AGV. La réponse apportée en intégrant dans la même démarche ces deux aspects « bogie plus gabarit » est démontrée par l'intérêt économique qu'introduit la variabilité de la garde aux rails. Elle assure le passage dans les tunnels sans remettre en cause l'ensemble des profils des infrastructures existantes. Le simulateur STEF confirme ces résultats.

### 9.2.3 ADEQUATION ENTRE TEMPS DISPONIBLE EN GARE ET FREQUENCE DES RAMES

Le concept de fonctionnement d'une gare R-shift-R impose la manipulation des praticables entre la zone d'embarquement/débarquement du contenant sur ce praticable et la zone de chargement/déchargement du praticable sur la rame. Il convenait donc de démontrer que l'organisation prévue répondait bien à cette préoccupation. L'analyse des temps élémentaires et les études faites par des groupes de travail de l'INSA sur les principales possibilités de chargement/déchargement d'un wagon confirme la validité des procédures retenues.

Concernant le temps avancé de 6 minutes pour l'opération de chargement, il faut noter que :

- La rotation des rames « quel que soit le concept » est fonction de la disponibilité en sillon, du temps de (dé)chargement et des besoins en transport sur l'axe considéré.
- La fréquence d'une infrastructure utilisant des gares « disposant d'un seul quai » ne pourra pas être supérieure au temps de chargement/déchargement intégrant des temps de contrôles.
- La disponibilité d'un sillon dépend des contraintes propres à l'exploitation ferroviaire et à la gestion de l'infrastructure.
- Les temps de chargement/déchargement dépendent du concept du terminal et de son niveau d'automatisation.
- Ce n'est donc pas parce que le temps de chargement est de 6 minutes, que le temps d'immobilisation sur terminal de la rame ne sera pas beaucoup plus long. Une fois, encore, l'élément limitant est plus lié à l'exploitation ferroviaire qu'au transbordement.
- Plus on réduira les temps de chargement/déchargement, plus la disponibilité en sillon contraindra la capacité d'exploitation.

Peut-on pour autant dire que l'enjeu du ferroutage est davantage dans l'optimisation des temps d'immobilisation sur terminal (hors temps de chargement/déchargement, c'est-à-dire notamment les temps relatifs aux contrôles par l'exploitant ferroviaire avant départ), la vitesse des rames et dans l'évitement des travaux de mise au gabarit... ?

### 9.2.4 DIFFICULTES DE STRUCTURE : LE BRIDAGE DE LA REMORQUE

Il vient instantanément à l'esprit que la volonté affichée et économiquement incontournable qui consiste à automatiser les opérations se situant entre l'embarquement/débarquement et les opérations de chargement /déchargement, introduit des contraintes. Elle impose de concevoir et d'intégrer sur le wagon des systèmes de bridage des contenants entièrement automatisés.

La difficulté que présente cette dernière opération par rapport à l'ensemble du cycle est essentiellement provoquée par la variabilité des côtes que l'on observe sur les remorques. On enregistre deux variations, l'une dans la position de la cheville ouvrière, l'autre dans la hauteur de la sellette. Pour répondre à ces contraintes nous avons développé un concept mécanique entièrement automatique qui sera parfaitement compris en se reportant au texte du brevet mis en annexe et aux projections 3D qui le présente.

## 9.2.5 DIFFICULTES DE FONCTIONNEMENT : LA RUPTURE DE CHARGE ENTRE MODES

### 9.2.5.1 Préambule

Dans son approche initiale le concept R-shift-R avait essentiellement pour vocation de répondre aux problèmes de l'encombrement des voies routières par les camions et revendiquait la capacité à embarquer tous les types de contenants actuellement pris en compte par la route. La prise en compte des conteneurs répondait simplement aux besoins d'élargissement du marché et à la mise en service d'un seul type de matériel ferroviaire pour satisfaire l'ensemble de la demande logistique.

La démarche d'une ouverture plus grande, voire spécifique, qui embarquerait exclusivement des conteneurs impose une nouvelle réflexion. Il convient de s'attarder sur l'analyse économique et technique qui découle de la manutention des conteneurs ou caisses, en d'autres termes sur la faisabilité d'une rame et d'une gare R-shift-R pour conteneurs.

### 9.2.5.2 Le wagon

Quatre niveaux de mécanisation du wagon ont été intégrés dans STEF. Ces variantes ont pour but de montrer l'influence des options technologiques sur les résultats financiers :

- RSR 1 définit un bogie disposant d'une motorisation répartie et une garde aux rails variables
- RSR 2 définit un bogie sans motorisation répartie et sans garde aux rails variable
- RSR 3 définit un bogie avec motorisation répartie sans de la garde aux rails variable
- RSR 4 définit un bogie sans motorisation répartie avec une garde aux rails variable

Une cinquième variante est proposée, RSR 5, qui définit le wagon porte conteneur.

Sans se préoccuper des contraintes qu'il imposera à l'exploitation, regardons les avantages financiers que représenterait la réalisation d'un tel wagon.

Cet ensemble wagon plus charge développe un encombrement en hauteur de  $3000 + 845 + 250 = 4095$  m. Avec : un conteneur de 3000 mm, une plate forme de balancelle à 845 mm et une garde aux rails de 250 mm. Il peut sans difficulté utiliser les tunnels de gabarit inférieur au GB+ qui offre un passage 4237 mm de passage.

Ce premier résultat a deux effets ;

- Il permet la construction d'un wagon simplifié, par la suppression de la variation de hauteur ; le prix évolue de 341 k€ à 271 k€. (voit tableau)
- Il supprime les reprises des profils de l'infrastructure à la condition que la ligne soit exclusivement utilisée par ce type de wagon pour R-shift-R. Les gains étant plus difficiles à évaluer, nous ne prendrons pas en compte ce facteur dans l'étude de gains potentiels.

A cette première réduction de coût s'ajoute celle de la suppression du système d'immobilisation de la remorque (voir dossier en annexe brevet reprise de charge). Ce système peut être estimé à 60 k€ par wagon ; ce qui ramène le prix de base du wagon à environ 211 k€.

Le praticable que nous avons introduit dans notre concept n'est pas une nécessité propre au wagon mais une contrainte imposée par le fonctionnement de la gare. Sa fonction est d'uniformiser le profil bas des contenants (remorque, tracteur, conteneur ou caisse mobile). Il permet la manutention (dans les gares des contenants entre l'embarquement /débarquement et le chargement/déchargement) avec un système unique.

On voit immédiatement que pour les conteneurs la conformité des formes basses est déjà assurée par leur plancher. Ce qui revient à dire que dans ce cas la présence du praticable n'est plus nécessaire pour la manipulation des conteneurs, cela produit deux effets économiques :

- Une première économie directe de 21 k€ par wagon. Au final on peut estimer, sans risque de se tromper, que le prix d'un wagon porte conteneur et/ou caisse mobile serait de l'ordre de 190 k€.
- Une seconde économie par la suppression des praticables qui attendent dans les gares. Cela peut aller par gare jusqu'à  $(46 \times 3 \times 21 = 2898 \text{ k€})$ . Ce poste est toutefois difficile à quantifier avec précision, puisqu'il est fonction du nombre de gares et de la fréquence des rames. Sur une infrastructure de 1200 km qui serait équipée de 5 gares le gain pourrait atteindre 20 M€.

Pour apprécier l'intérêt d'un tel scénario, il faut mettre cette valeur résiduelle de 190 k€, en regard de la valeur d'un wagon porte conteneur classique. Le prix de référence pour ce dernier semble se situer selon différentes sources dans la fourchette de 50 à 65 k€. Auquel il faut d'ajouter les motrices d'une valeur unitaire comprise (suivant le nombre de tensions qui seront nécessaires) entre 2200 à 4700 k€.

On peut observer en introduisant ces paramètres dans STEF que la comparaison entre les deux concepts s'établit, pour un wagon tracté, sur des valeurs pour :

- R-shift-R le prix de référence sera au alentour de 190 k€
- Le wagon classique  $((50+65)/2)+((2200+4700)/2*2)/36 = 249 \text{ k€}$  ; Avec la formule (prix moyen d'un wagon) + ( prix moyen d'une motrice) que multiplie le nombre de motrice, le tout, divisé par le nombre de wagons par rame, pour le concept considéré.

On note avec intérêt que la motorisation répartie permet de réaliser, sous certaines conditions, un wagon moins cher qu'avec la traction traditionnelle.

Au final nous pensons qu'un wagon « dédié conteneur » entièrement compatible avec le wagon R-shift-R standard est possible, tout en préservant son évolution d'une rame conteneur vers une rame remorque.

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des coûts d'une unité de transport ferroviaire « UTF » suivant les incorporations technologies qui sont possibles. STEF reprend ces valeurs pour effectuer ces calculs.

Coûts des UTF suivant incorporation (en k€)						
Base	MB	Moteur	Reprise charge	Praticable	Total par modèle	
80	70	110	60	21	341	RSR 1
80			60	21	161	RSR 3
80	70		60	21	231	RSR 4
80		110	60	21	271	RSR 2
80		110			190	RSR 5
Coût de l'entretien par élément en € km						
0,012	0,015	0,018	0,010	0,000		
Affectation de l'entretien par mode de wagon en €					Total par modèle	
0,012	0,015	0,018	0,010	0,000	0,055	RSR 1
0,012			0,010	0,000	0,022	RSR 3
0,012	0,015		0,010	0,000	0,037	RSR 4
0,012		0,018	0,010	0,000	0,040	RSR 2
0,012		0,018			0,030	RSR 5

Tableau 16: Récapitulatif des coûts des wagons et de leur entretien retenus dans STEF

### 9.2.5.3 Les gares

La prise en compte d'une rame spécifique conteneur implique de reprendre pour partie le raisonnement du fonctionnement des gares. Ceci doit se faire sans modifier la procédure retenue pour les remorques. Ce raisonnement doit simplement rechercher les possibilités techniques d'une prise en charge d'un conteneur suivant cette procédure remorque.

#### 9.2.5.3.1 Contraintes incontournables

Ne pas modifier les procédures remorque revient à obliger les conteneurs à les utiliser cela introduit un certain nombre de contraintes à prendre en compte par exemple :

- Le pas des modules doit rester identique pour une rame de remorque ou conteneur,
- Utiliser les mêmes procédures aux ruptures de charges,
- Redéfinir probablement les modèles des conteneurs embarquables

La première contrainte ne pose pas de problème particulier puisque le wagon reste le même, et que l'absence du praticable ne change pas les moyens matériels nécessaires de la zone automatisée. Elle impose une modification du porte praticable et permet de simplifier le mécanisme de passage de fosse en supprimant les vérins de relevage de la charge (conteneur). Ce qui représente une diminution d'environ 30 K€ du coût de chaque poste affecté au chargement/déchargement des conteneurs (voir plan ci-dessous).

### 9.2.5.3.2 Moyens de manipulation

Notre raisonnement se limite à la mise en œuvre de R-shift-R dans les sites intermédiaires. Il ne prend pas en compte les modes de fonctionnement observés aujourd'hui dans les centres de transits de conteneurs (ports entre autres).

Il faut distinguer dans le cycle d'une gare R-shift-R traitant des remorques deux situations successives qui imposent pour chacune d'elles un moyen de manutention spécifique :

- Le roulage de la remorque sur le praticable, qui nécessite soit la présence du chauffeur soit celle d'un moyen propre à la gare pour ne pas immobiliser le chauffeur,
- Le transfert du praticable vers le quai de chargement, qui lui nécessite l'automanipulateur.

Pour la même opération, trois interventions sont requises dans le cas du conteneur :

- Le conducteur du porte conteneur avec son ensemble routier,
- Le conducteur et l'engin de manutention qui réalise le transfert du conteneur de la remorque sur le praticable,
- Le cycle automatique reposant sur l'automanipulateur.

Dans les deux cas les mêmes moyens sont nécessaires pour le cycle inverse au déchargement /débarquement. Les postes 1 et 2 pour l'un et 1 et 3 pour l'autre sont les mêmes pour le conteneur ou la remorque. Il reste à chercher comment ne pas faire intervenir de moyen de manutention intermédiaire spécifique pour mettre en place le conteneur sur le porte praticable.

Deux axes de recherches sont envisagés :

- Envisager de mettre en place dans chaque module un système spécifique qui serait implantés au sol.
- Revoir la conception de la remorque porte conteneur.

### 9.2.5.3.3 Remarques préliminaires

Le transport des conteneurs par le rail (ferroulage) n'impose pas un stockage dans la mesure ou l'on admet, comme pour les remorques, qu'ils embarquent/débarquement directement dès leur départ /arrivée en gare. Ils prennent place sur l'un des trois portes praticables qui font face à chaque wagon. Le conteneur passe directement de la remorque au porte praticable et/ou vice versa.

Le prix de pose/dépose d'un conteneur sur une remorque est actuellement compris entre 100 et 250 €. Ce prix « pour une utilisation de 1+1 fois par jour sur 300 jours an » engendre (au coût moyen de  $(100+250)/2 = 175$  €) une dépense annuelle de  $175*2*300 = 105000$  € soit sur une durée d'amortissement de 5 ans la somme de 525000 € ou encore 1050000 € pour deux utilisations journalières.

Dans la suite nous nous limiterons à définir les implantations des éléments entre eux suivant ces deux axes de réflexions. Sans engager la moindre étude sur les conditions mécaniques qui permettent de réaliser ce type d'opération.

#### 9.2.5.3.4 Première approche

La remorque porte conteneur reste identique à celles en service actuellement.

Il convient alors de mettre en place dans les gares, de part et d'autre de la remorque, des systèmes de reprise. Ils viendront, après mise en place de la remorque, se placer sous le conteneur, dans les espaces, que, laisse libre les essieux des remorques. Ces mécanismes ne semblent pas poser de problèmes particuliers de construction. Les schémas qui sont proposés, font apparaître la nécessité de mettre en place quatre blocs de reprises de part et d'autre de l'axe longitudinal de la remorque. L'implantation et le nombre de ces blocs doivent tenir compte de la longueur des conteneurs qui varie de 30 à 45 pieds (voir plan ci-dessous). Ce procédé complique singulièrement le positionnement de la remorque face au quai de transfert.

#### 9.2.5.3.5 Deuxième approche

Il semble que l'intégration d'un système de manipulation à la remorque offre une opportunité intéressante de développement. Il permet la suppression « dans le mécanisme de passage de fosse » du relevage des conteneurs, au droit des quais. Il impose en revanche de spécialiser une partie de la gare pour les conteneurs. Il nécessite par ailleurs :

- Soit que les transporteurs se dotent de ses moyens
- Soit qu'une nouvelle prestation de service soit développée pour la location des moyens

Cette dernière prestation ne serait pas facturée par le rail mais prise en charge directement par l'entreprise de transport routière.

#### 9.2.5.3.6 Redéfinition des conteneurs embarquables

Il apparaît cependant « avec la suppression du praticable » une difficulté dont il est pour l'instant malaisé d'évaluer les conséquences. En effet, le conteneur de 30 pieds peut présenter des difficultés pour être pris en charge par le porte praticable. Il imposerait la mise en place d'un outillage spécifique sur le wagon ou plus simplement de ne pas supprimer les vérins pour le passage de fosse. Le conteneur de 20 pieds ne sera pris en charge par le porte praticable et par le système de passage de fosse que s'il sert de base de dimensionnement à l'ensemble des moyens que nécessitera la manipulation des praticable dans la zone automatisée.

#### 9.2.5.3.7 Evolution nécessaire de la gare

L'objectif est d'intégrer un concept de manutention plus simple que les systèmes actuellement mis en oeuvre sur les chantiers de transbordement « usines ou gares ». Il semble (au regard des quelques études préliminaires réalisées) que la conception d'une remorque porte conteneur équipée de son propre système de manutention répond à cette attente. Cette simplification (si elle peut être atteinte) doit permettre d'améliorer la rentabilité des opérations de ruptures de charges.

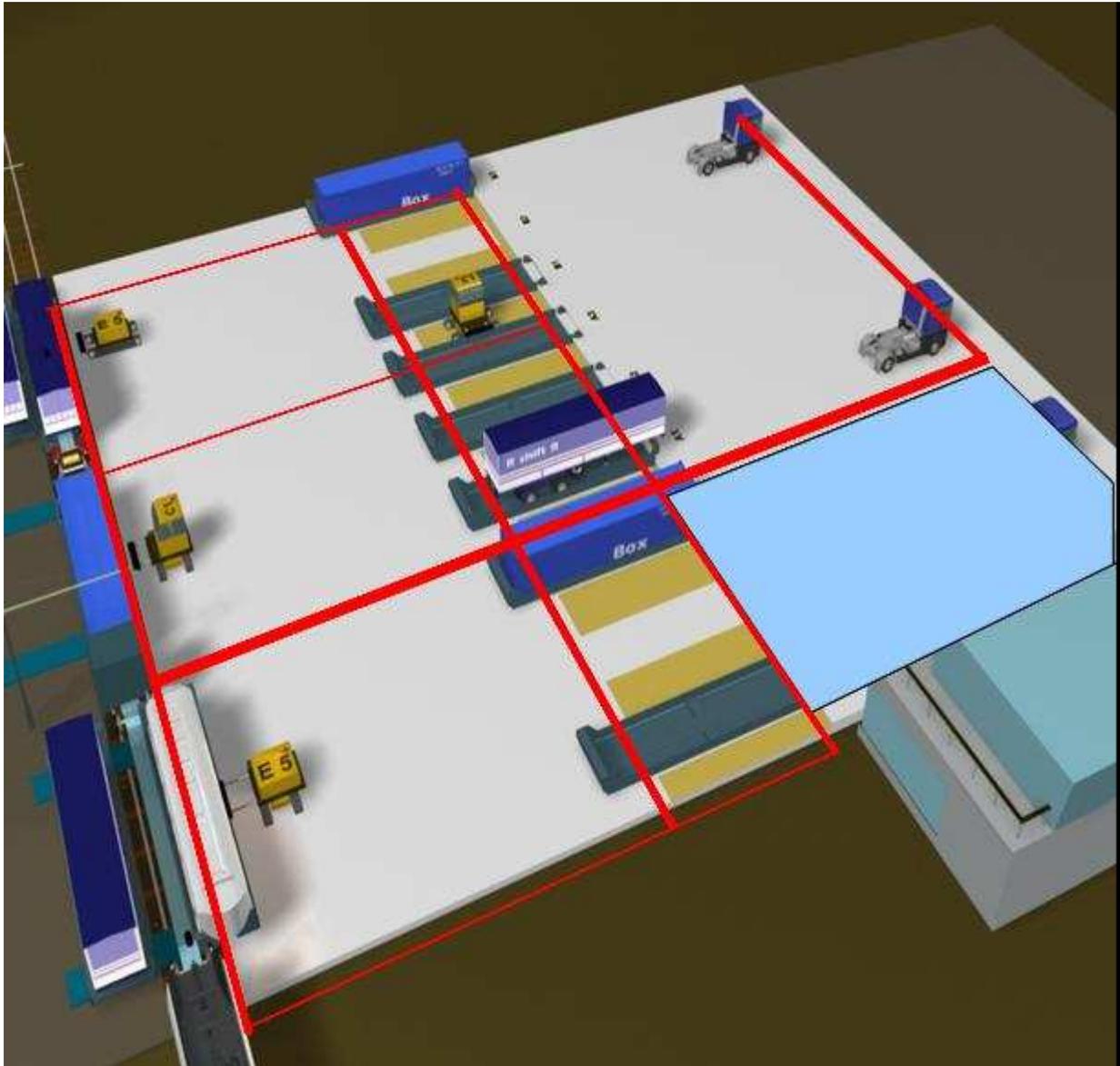


Figure 82 : Variante de la gare R-shift-R pour conteneurs

En se reportant à la figure ci-dessus on observe que la zone commune de départ immédiat a été divisée en deux parties. L'une comme précédemment est affectée à l'embarquement/débarquement des remorques, l'autre (en bleu) à l'embarquement/débarquement des conteneurs. Cette contrainte nouvelle est imposée par la différence entre les moyens de transport routiers. Le conteneur n'embarquant pas sa remorque, on se retrouve pour un même niveau d'embarquement /débarquement avec deux niveaux d'arrivé routière sur la même gare. La modification de niveau du quai sera de l'ordre de 1200 mm. Dans ce schéma, on retrouve pour le quai conteneurs les mêmes fonctionnalités que pour le quai remorque. Les conducteurs sont en position de faire eux-mêmes la mise en place de leur conteneur ou de leur remorque sur le porte praticable.

### 9.2.5.3.8 Description du cycle de fonctionnement

Le conducteur du tracteur auquel est reliée la remorque présente en marche arrière l'équipage sur lequel il doit prendre/déposer son chargement face au quai d'embarquement / débarquement. Il sera probablement nécessaire de reprendre l'assiette de la remorque afin d'assurer l'alignement de cette dernière avec le quai. Pour cela on utilisera les béquilles qui équipent la remorque. Dans le cas d'un déchargement, le conducteur déverrouille le conteneur de ces points de fixations qui l'immobilisent sur le châssis de la remorque. Le conducteur rend solitaire le conteneur avec la barre de liaison du mécanisme de transfert par les deux éléments situés en extrémité. Ces actions terminées le conducteur agit sur la commande hydraulique pour actionner les vérins de levage incorporés dans les blocs de roulement. Cette action se fait simultanément sur les deux plateaux de portage de la charge. Puis, avec une commande annexe, il met en action la commande qui actionne les moto réducteurs de déplacement des plateaux de portage de la charge. Cette opération se poursuit jusqu'à la mise en butée du plateau de portage sur l'arrière de la remorque. Il faut garder en mémoire que l'arrière du conteneur est pris en charge (après un certain déplacement) par le quai sur lequel il doit être déposé ; le plateau arrière a abandonné sa fonction de portage. A partir de ce moment le déplacement se poursuit avec le seul plateau porteur de charge avant jusqu'à venir à son tour buter ; débridage du conteneur, retour à vide ou pas suivant le cas. Dans le cas d'un chargement, l'opération est strictement symétrique. Le principe d'un quai pour conteneurs est détaillé dans la figure suivante :

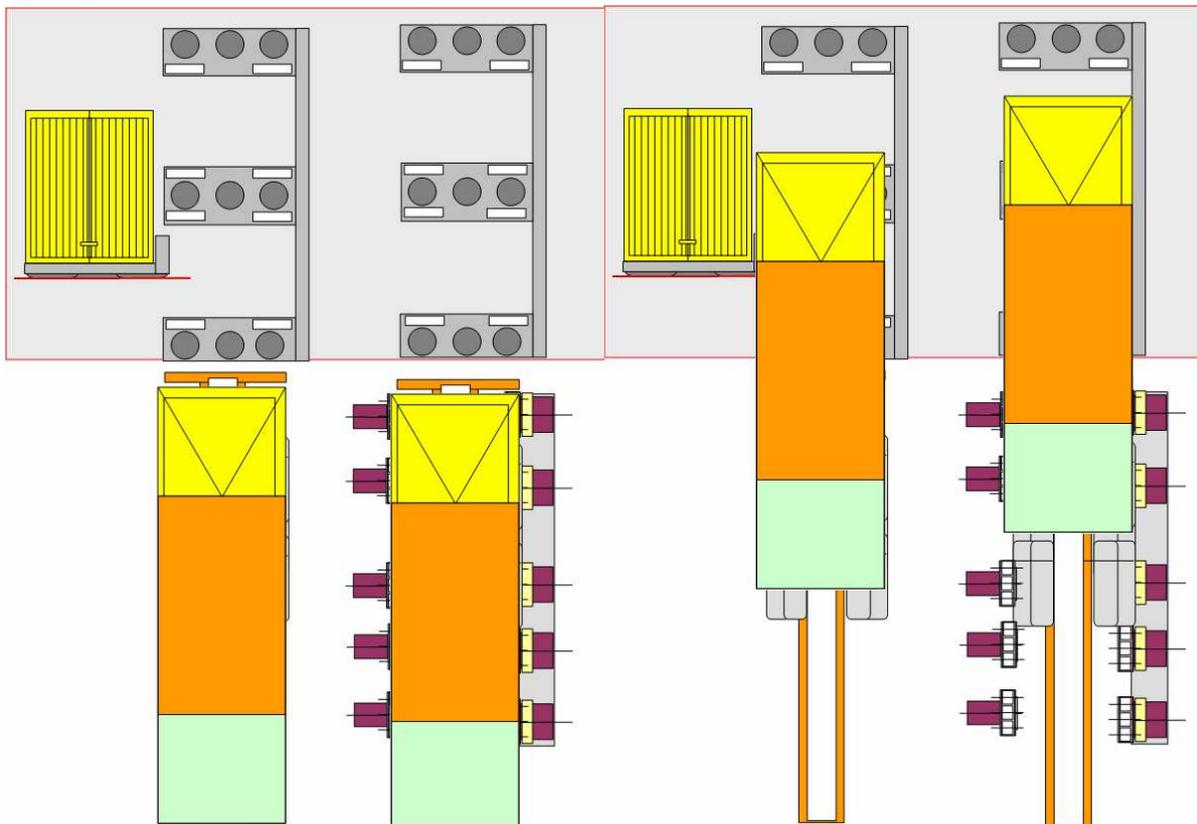


Figure 83 : Principe d'un quai pour conteneurs

Pour plus de détails, le résumé du texte du brevet associé est proposé en annexe.

### 9.2.6 DIFFICULTES D'ÉVALUATION ET DE COMPARAISON

Un simulateur technique et économique de ferroutage a été développé par étapes successives sous la forme de feuilles de calcul sur un tableur. Il constitue une application informatique relativement simple à mettre en œuvre. C'est une « boîte noire » de calcul : il suffit de modifier les paramètres pertinents à l'entrée et d'observer les résultats en sortie.

Il a évolué dans un premier temps vers un outil micro-économique pour chiffrer des solutions de transport routier et les coûts d'exploitation du ferroutage, et pour vérifier l'adéquation avec la demande du marché.

A la base, le simulateur est un outil technique pour vérifier la faisabilité d'un concept nouveau, en chiffrer son coût et le comparer avec des solutions existantes.

Il est devenu au travers du présent projet un outil macro-économique pour évaluer globalement investissement et fonctionnement et étudier les opportunités d'équipement.

L'approche retenue a été de prendre en compte, modéliser et chiffrer une liaison théorique de ferroutage, constituée d'une ligne ferroviaire munie de deux gares d'extrémité et d'un nombre variable (y compris nul) de gares intermédiaires. L'idée apportée et qui s'exprime complètement dans la technologie R-shift-R, est qu'il faut aller vers un réseau maillé, à l'échelle de l'Europe. Un trajet particulier parcouru par un train, dans un tel réseau, se réduit donc au cas particulier traité par le simulateur STEF. La simulation complète d'un tel réseau maillé impliquerait la superposition des besoins de marché, des flux techniques, et des contraintes économiques élémentaires (telles que STEF permet de les analyser). Pour prendre des décisions et faire des choix éminemment politiques, il conviendrait de compléter ce simulateur en vue de pouvoir effectuer de telles superpositions et d'étudier globalement une solution au niveau européen.

STEF simule :

- La liaison i.e. un segment linéaire de longueur D avec N segments, deux gares d'extrémité, N -1 gares intermédiaires, toutes spécialisées, et équipée d'une ligne ferroviaire,
- Les besoins des clients (i.e. le modèle du transport routier sur la liaison),
- Le matériel roulant (composition des trains, technologie, coûts, performances techniques et économiques),
- Les conditions économiques de création de la liaison (investissement (gares, matériel roulant), coûts d'exploitation et de maintenance (dépenses, recettes, marges)).

STEF ne simule pas :

- Le marché du ferroutage :
  - La proportion réelle de semi-remorques / remorques...
  - Le marché suivant le segment géographique
  - Le marché suivant les jours et les heures
  - L'élasticité des marchés selon les prix de billets

- Le classement tarifaire des lignes ferroviaires :
  - Les finesses tarifaires pour la redevance au gestionnaire d'infrastructure
  - La variation du prix du « sillon » suivant les heures ou périodes calendaires
- Les problèmes d'allocation de sillons :
  - Les contraintes dues à la circulation de trains à des vitesses différentes
  - Le contexte délicat du partage de rôles entre opérateurs et gestionnaires d'infrastructures

STEF peut avoir diverses catégories d'utilisateurs :

- Des techniciens, pour comparer des solutions et comprendre l'effet des divers paramètres,
- Les hommes de marketing, pour spécifier les études de marché et connaître les facteurs d'évolution des coûts,
- Les gestionnaires pour comprendre les contraintes technologiques et effectuer des prévisions,
- Les politiques pour comparer des solutions et effectuer des choix d'équipement.

## 9.3 IMPACTS LIES AU DEPLOIEMENT DU CONCEPT

### 9.3.1 AVANT-PROPOS

La suite présente un cas d'application reposant sur les données de l'étude RAPL et mis en œuvre en collaboration avec le projet Axefret. La méthode retenue consiste à :

- Rechercher le secteur le plus chargé,
- Définir sur ce secteur le nombre de rames nécessaire,
- Considérer que :
  - Le flux se répartit régulièrement dans la journée entre chaque convoi,
  - Des wagons circuleront à vide,
  - Les besoins sont définis pour une infrastructure dédiée,

La dernière partie du chapitre propose d'étudier le cas d'un réseau maillé.

### 9.3.2 IMPACTS SUR LE FONCTIONNEMENT DE L'INFRASTRUCTURE

#### 9.3.2.1 Etude de trafic

Les besoins recensés sont ceux du projet RAPL repris dans l'étude Axefret.

Gare	Entrée montante	Entrée descendante	Sortie montante	Sortie descendante	Variation du n <sup>bre</sup> de wagons utilisés par rame et par sillon sens descendant	Sortie par rame en gare Montante	Entrée par rame en gare montante	Sortie par rame en gare descendante	Entrée par rame en gare descendante	Variation du n <sup>bre</sup> de wagons utilisés par rame et par sillon sens montant
Nord	0	3491	2490	0	41	29	0	0	41	29
Picardie	1437	747	1850	428	4	22	17	5	9	- 5
Ouest IdF	1462	1006	2100	985	0	25	17	12	12	- 8
Sud IdF	712	618	300	528	1	4	8	6	7	5
Poitou	212	230	410	1213	-12	5	2	14	3	- 2
Bordeaux	575	1149	90	799	4	1	7	9	14	6
Sud	2842	0	0	3288	39	0	33	39	0	33
Transferts	7240	7241	7240	7241			N <sup>bre</sup> de quais à équiper			203

Tableau 17: Flux en fonction des secteurs et définition des sillons nécessaires

Le chiffre à retenir concerne le nombre de modules requis pour répondre au besoin. Ce chiffre a été obtenu en totalisant gare après gare et pour les deux sens de circulation le nombre de transfert sortant ou rentrant le plus important **en rouge** sur le tableau). Pour rappel, les gares d'extrémités ne disposent que d'un seul quai. Dans ces gares la circulation des rames sera organisée de façon intelligente pour éviter les engorgements.

#### 9.3.2.2 Définition du secteur le plus chargé

Le tableau qui suit met en évidence les besoins, le déséquilibre et les pertes de production secteur par secteur. Il permet d'identifier le secteur le plus chargé (en rouge). La formule utilisée pour tous les secteurs (autre que le premier et le dernier) est la suivante :

= entrées dans la première gare + entrées dans la gare suivante – sorties de la même gare.

Sections	Flux montant	Flux descendant	Déséquilibre par sens et secteurs	Sillons nécessaires	Wagon montant utilisé par rame	Wagon descendant utilisé par rame	Perte de production (disponibilité en wagon /jour)
Nord – Picardie	2490	3491	1001	76	29	41	419
Picardie – Ouest IdF	2903	3810	907	83	34	45	100
Ouest – Sud IdF	3541	3831	290	83	42	45	79
Sud IdF – Poitou	3129	3921	792	85,24	37	46	-11
Poitou – Bordeaux	3327	2938	389	72	39	35	972
Bordeaux – Sud	2842	3288	446	71	33	39	622

Tableau 18: Flux en fonction des secteurs et définition du secteur le plus chargé

### 9.3.2.3 Calcul du nombre de rames et des km parcourus

A partir de ces chiffres, le nombre minimum de convois nécessaires pour assurer le trafic sur le sens le plus chargé est calculé secteur par secteur en utilisant la formule suivante :

= flux par secteur/ nombre de wagons par rame (46 wagons dans notre cas)

Sur cette base, il est convenu de mettre en service sur l'ensemble du réseau le nombre de convois correspondant au secteur le plus chargé (85) et de répartir (pour chaque sens) la charge entre les secteurs sur l'ensemble des convois. Ceci permet de déduire (par secteur et par sens) le nombre de wagons utilisé par rame (et revient à faire circuler des wagons à vides).

Le nombre de convois est le même dans les deux sens : il n'y a pas de variabilité du nombre de convois en fonction de la charge observée sur chacun des secteurs. Dans le cas d'une infrastructure dédiée, l'exploitation ferroviaire sera « rigide » et il faudra ramener les wagons vides par le même cheminement.

Les chiffres des deux premières colonnes sont repris dans le tableau suivant pour définir les km wagons utilisés et parcourus. Cela par jour, an et pendant le période d'amortissement ; 15 ans pour le matériel, 40 ans pour le réseau.

Cette étude des Km parcourus est nécessaire pour la définition des coûts du wagon/km qui représente la base de référence à comparer à la route.

Les distances entre gares sont estimées dans la mesure où leur implantation n'est pas définie dans les documents de référence.

Wagon montant utilisé par rame	Wagon descendant utilisé par rame	Perte de production (disponibilité en wagon /jour)	Distance moyenne entre gare	Nombre de Km/train montant vendu	Nombre de Km/train descendant vendu	Total Km/wagons jour/vendu	Total km / wagon / an	Total en Km wagon* temps d'amortissement
29	41	419	150	4394	6161			
34	45	100	150	5123	6724			
42	45	79	150	6249	6761			
37	46	-11	200	7362	9226			
39	35	972	300	11742	10369			
33	39	622	250	8359	9671			
Nbre km wagons utilisés				43229	48911	7831900	2349570000	
Nbre km wagons possibles				55200	55200	9384000	2815200000	
Nbre de km wagons possibles 40 ans								93982800000
Nbre de km wagons utilisés sur 15 ans								35243550000
Perte d'exploitation sur 15 ans en km/w								6984450000

Tableau 19: Calcul du nombre de rames et des km parcourus

Ces éléments d'évaluation permettent de déduire les points suivants :

- Nombre de convois nécessaires et soldes disponibles : le nombre de convois par sens varie de 85,2 à 71 suivant les besoins potentiels des secteurs. La perte de productivité varie sur certaines parties du trajet de -11 à 972 wagons jour.
- Fréquence des rames: en partant du mode de fonctionnement sur 24 heures et en planifiant « 85 convois / sens / jour » nous obtenons un rythme des convois d'environ 17 minutes par sens.
- Capacité du service : la capacité d'embarquement / débarquement (à comparer au besoin estimé de 14781 conditionnements/jour), pour 46 wagons par rame, 85 convois, 2 sens, et 7gares, est de :
  - $85 \times 2 \times 46 = 7820$  conditionnements/jour pour une utilisation de bout en bout de l'infrastructure
  - $85 \times 2 \times 46 \times 7 = 54740$  conditionnements/jour avec les gares intermédiaires entièrement équipées

Afin de donner une estimation globale des coûts, un certain nombre de paramètres comme le nombre de rames circulant, la vitesse moyenne, le temps de voyage... doivent être calculés. Le tableau qui suit synthétise les résultats obtenus pour les données RAPL (ligne 1), et fait apparaître les conséquences de l'augmentation du temps d'arrêt en gare (ligne 2), cumulées de la réduction du nombre de wagons par rame, ici 32 wagons pour une rame de 500 mètres (ligne 3) :

Paramètres pour 100% du trafic, longueur de parcours 1200 km, vitesse 100 km/h									
Nombre de sillons jour	Temps d'arrêt en gare	Temps d'arrêt total "mn"	Temps de déplacement "mn"	Temps de voyage "h"	Fréquence des trains "minute"	Vitesse moyenne	Nombre de trains circulant par sens	Nombre de trains à construire	Wagons
170	15	105	720	13,8	17	87	49	102	4704
170	60	420	720	19,0	17	63	67	141	6500
261	60	420	720	19,0	11	63	103	217	6500

Tableau 20: Evaluation des besoins en fonction du temps d'arrêt en gare et du nombre de sillons

Ce tableau permet entre autres d'observer que :

- La variation du temps d'arrêt en gare ne change pas la fréquence des trains.
- La diminution du nombre de wagons par rame a pour conséquence d'augmenter, pour un même service, le nombre de convois jour qui passe de 170 à 261 et le nombre de rames à construire qui passe de 141 à 217.
- La vitesse moyenne est liée au temps d'arrêt en gare.
- Les deux dernières configurations imposent par un temps technologique de chargement supérieur à la fréquence une multiplication par 4/5 du nombre de quais.

### 9.3.2.4 Organisation des convois et des embarquements

La solution la plus simpliste pour organiser les convois serait d'équiper l'ensemble des gares de tous les automatismes qu'imposent les diverses opérations de manipulations des conditionnements. Cette solution limiterait les contraintes organisationnelles à de simple transfert d'information de gare à gare, ce transfert définissant et organisant les opérations de manutention des wagons à décharger/charger ou à simplement décharger ou charger. Cette solution ne peut être retenue pour une simple question de niveau d'investissement (les gares entièrement équipées nécessiteraient l'installation de  $46 \times 2 \times 7 = 644$  modules de transbordement, alors qu'une bonne dotation des moyens n'en impose en théorie comme le montre le tableau 17 que 203).

L'application du mode isolé impose, pour limiter les investissements, d'organiser les convois dès la première gare et de prédéfinir / délimiter sur la rame la zone qui sera réservée aux opérations de transfert à réaliser dans les gares intermédiaires.

En retenant 85 convois jour et en acceptant le principe que les flux se répartissent équitablement dans la journée sur l'ensemble ces 85 convois, le nombre de wagons occupés sur chaque secteur et les embarquements / débarquements à réaliser gare par gare peuvent être définis. Les informations dont nous disposons aujourd'hui ne permettent pas de connaître l'origine destination de chaque embarquement. Cette contrainte impose de prendre comme référence (pour la définition des équipements des gares) le chiffre des embarquements réalisés en gare N-1 au moment de l'arrivée de la rame en gare N auquel s'ajoute ou se retranche le solde des entrées/sorties de cette gare. On procède de secteur en secteur.

L'organisation préconisée pour constituer les rames consiste à :

- Positionner dans la gare d'origine « montante ou descendante » les conditionnements :
  - Qui sont destinés à la dernière gare à l'une des extrémités de la rame,
  - Qui sont destinés à l'avant-dernière gare à l'autre extrémité de la rame,
- Répartir, en partant du centre de la zone encore libre et de part et d'autre dans un ordre progressif d'éloignement les conditionnements à destination des gares réparties le long du parcours.

Les emplacements vides se retrouveront naturellement de part et d'autre de la zone centrale, autrement dit contre les extrémités des zones utilisées par les chargements des deux gares les plus éloignées dans le parcours de la rame. Ces places seront prioritairement réservées en gare N+1 pour les conditionnements à destination des deux gares d'extrémités. Cette méthode délimite, dès la première gare, la zone utilisable pour les chargements à destination des gares intermédiaires.

### 9.3.3 IMPACTS SUR LES MOYENS HUMAINS ET MATERIELS

Conformément à l'approche Axefret, il s'agit de définir et quantifier les moyens humains et matériels nécessaires au transfert de trafic de la route vers le rail. Trois cas sont étudiés :

- Transfert de 100% du trafic identifié en 24 heures,
- Transfert de 50% de ce même trafic en 24 heures,
- Transfert de 50% de ce même trafic en 12 heures,

Les tableaux qui suivent présentent les besoins humains et matériels requis pour le bon fonctionnement de l'infrastructure, i.e. assurant une productivité, une rentabilité et une fiabilité suffisante. Seuls sont pris en compte les besoins qu'impose l'utilisation du concept R-shift-R (contrôle de la charge, mise en place du conditionnement sur le praticable, chargement, déchargement...).

Moyens nécessaires pour 100% du trafic RAPL sur 24 h et une fréquence de 17 minutes par sens								
Moyens humains	Nombre de quais	Nombre de modules actifs par gare	Personnel embarquement par module	Personnel chargement par module	Personnel de contrôle + environnement	Nombre d'équipes sur 24h	Total	Personnel par équipe
Nord	1	46	1	0	8	7	378	54
Picardie	2	35	1	0	6	7	284	41
Ouest IdF	2	41	1	0	6	7	326	47
Sud IdF	2	19	1	0	6	7	172	25
Poitou	2	23	1	0	6	7	204	29
Bordeaux	2	24	1	0	6	7	212	30
Sud	1	46	1	0	8	7	378	54
Personnel de conduite des rames					102	14	1432	205
<b>TOTAL</b>							<b>3385</b>	<b>484</b>
Moyens matériels	Tracteur sur quai routier	Praticable immobilisé	Plateau de transfert	Manipulateur automatique	Transfert sur voie			
Nord	8	138	138	46	46			
Picardie	4	104	104	35	37			
Ouest IdF	4	122	122	41	43			
Sud IdF	4	56	56	19	21			
Poitou	4	69	69	23	25			
Bordeaux	4	73	73	24	26			
Sud	8	138	138	46	46			
<b>TOTAL</b>	<b>36</b>	<b>699</b>	<b>699</b>	<b>233</b>	<b>243</b>			

Tableau 21: Besoins en hommes et matériels (organisation 1)

Moyens nécessaires pour 50% du trafic RAPL sur 24 h et une fréquence de 34 minutes par sens								
Moyens humains	Nombre de quais	Nombre de modules actifs par gare	Personnel embarquement par module	Personnel chargement par module	Personnel de contrôle + environnement	Nombre d'équipes sur 24h	Total	Personnel par équipe
Nord	1	46	0,5	0	6	7	<b>203</b>	<b>29</b>
Picardie	2	35	0,5	0	4	7	<b>149</b>	<b>21</b>
Ouest IdF	2	41	0,5	0	4	7	<b>170</b>	<b>24</b>
Sud IdF	2	19	0,5	0	4	7	<b>93</b>	<b>13</b>
Poitou	2	23	0,5	0	4	7	<b>109</b>	<b>16</b>
Bordeaux	2	24	0,5	0	4	7	<b>113</b>	<b>16</b>
Sud	1	46	0,5	0	6	7	<b>203</b>	<b>29</b>
Personnel de conduite des rames					51	14	<b>716</b>	<b>102</b>
<b>TOTAL</b>							<b>1755</b>	<b>251</b>
Moyens matériels	Tracteur sur quai routier	Praticable immobilisé	Plateau de transfert	Manipulateur automatique	Transfert sur voie			
Nord	5	92	92	15	46			
Picardie	4	69	69	12	37			
Ouest IdF	4	81	81	14	43			
Sud IdF	4	37	37	6	21			
Poitou	4	46	46	8	25			
Bordeaux	4	49	49	8	26			
Sud	5	92	92	15	46			
<b>TOTAL</b>	<b>30</b>	<b>466</b>	<b>466</b>	<b>78</b>	<b>243</b>			

Tableau 22: Besoins en hommes et matériels (organisation 2)

Moyens nécessaires pour 50% du trafic RAPL sur 12 h, et une fréquence de 17 minutes par sens									
Moyens humains	Nombre de quais	Nombre de modules actifs par gare	Personnel embarquement par module	Personnel chargement par module	Personnel de contrôle + environnement	Nombre d'équipes sur 12h	TOTAL	Personnel par équipe	
Nord	1	46	1	0	8	3,5	<b>189</b>	<b>54</b>	
Picardie	2	35	1	0	6	3,5	<b>142</b>	<b>41</b>	
Ouest IdF	2	41	1	0	6	3,5	<b>163</b>	<b>47</b>	
Sud IdF	2	19	1	0	6	3,5	<b>86</b>	<b>25</b>	
Poitou	2	23	1	0	6	3,5	<b>102</b>	<b>29</b>	
Bordeaux	2	24	1	0	6	3,5	<b>106</b>	<b>30</b>	
Sud	1	46	1	0	8	3,5	<b>189</b>	<b>54</b>	
Personnel de conduite des rames					51	7	<b>358</b>	<b>102</b>	
<b>TOTAL</b>							<b>1334</b>	<b>381</b>	
Moyens matériels	Tracteur sur quai routier	Praticable immobilisé	Plateau de transfert	Manipulateur automatique	Transfert sur voie				
Nord	8	138	138	46	46				
Picardie	4	104	104	35	37				
Ouest IdF	4	122	122	41	43				
Sud IdF	4	56	56	19	21				
Poitou	4	69	69	23	25				
Bordeaux	4	73	73	24	26				
Sud	8	138	138	46	46				
<b>TOTAL</b>	<b>36</b>	<b>699</b>	<b>699</b>	<b>233</b>	<b>243</b>				

Tableau 23: Besoins en hommes et matériels (organisation 3)

Dans les gares intermédiaires le nombre de postes actifs a été limité aux strictes nécessités du programme de travail, avec toutefois pour se garder une certaine souplesse de fonctionnement une augmentation systématique (de quatre unités) des positions de travail pour la partie sollicitée. Pour les gares d'extrémités 46 postes de travail sont planifiés par quai. Ces choix nécessitent, pour un transfert de 100% des flux, 224 personnes de plus.

Le nombre d'équipes (7) jugées nécessaires pour fonctionner sur 24 heures a été obtenu en partant d'une base de travail annuelle effective de 1400 heures ; ce qui donne une moyenne journalière de :  $1400 * 7 / 365 = 26,80$  heures et un recouvrement entre équipe de 25 minutes.

A 1560 heures/an on peut passer à 6 équipes, ce qui ramènerait de 3385 à 2901 le personnel nécessaire ; réduction qui peut se cumuler avec la précédente ce qui ramènerait les besoins en personnel à 2677 personnes.

Sur la base de ces résultats, il est clair que les besoins humains sont très fortement liés à l'étalement de la journée de travail et à la fréquence des rames. Les matériels sont eux étroitement liés au mode de fonctionnement des gares. Ils comportent deux secteurs distincts : le premier spécifique au concept R-shift-R qui englobe les gares, le second que nous dénommons secteur RFF qui n'a pas été pris en compte dans cette analyse.

Les tableaux précédents peuvent être synthétisés au travers de la figure ci-dessous qui illustre les contraintes du mode de fonctionnement d'une infrastructure de ferroutage et reflète bien l'influence du mode d'exploitation sur les besoins humains et matériels :

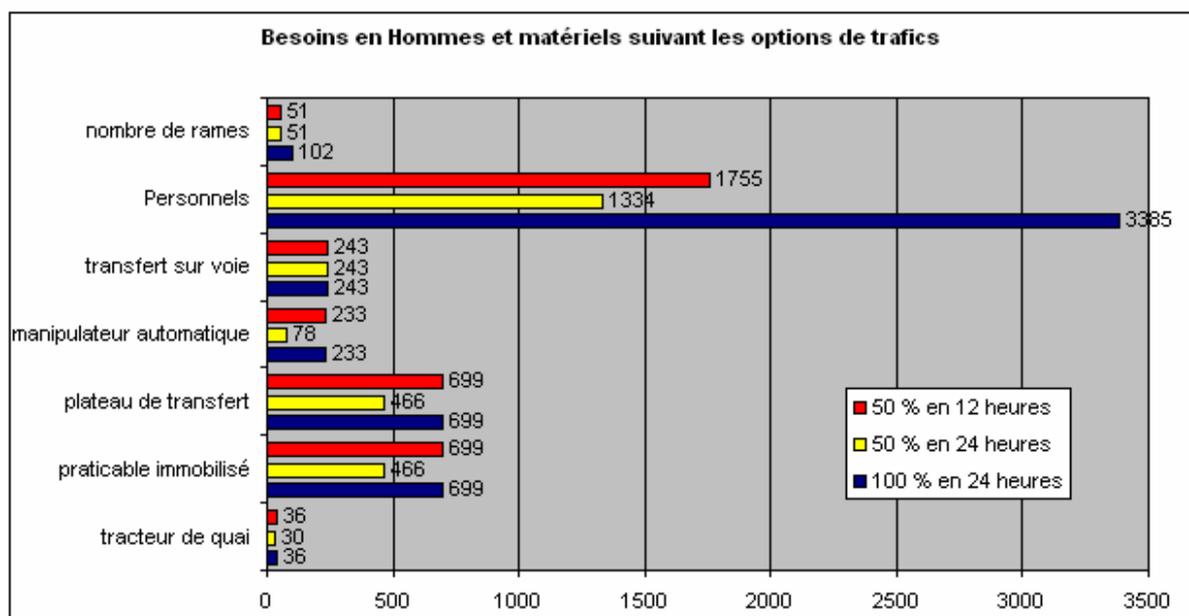


Figure 84 : Besoins en hommes et matériels suivant les options de trafic

Cette figure met en évidence :

- Pour les personnels, la variabilité des besoins en fonction du pourcentage pris en charge et de l'étalement dans le temps de cette prise en charge : traiter 100% du trafic sur 24 heures ne génère pas les mêmes besoins que de traiter 50% de ce trafic sur 12 heures ; la massification à 100% qui exige 3385 personnes ne devrait en demander que 1692 à 50% ; de même traiter 50% du trafic sur 12 heures représente encore un gain de 421 personnes par rapport à un étalement sur 24 heures de ce même trafic.
- Pour l'équipement des gares :
  - La constance du besoin pour certains équipements,
  - La variabilité sous contrainte du pourcentage de trafic pris en charge,
  - La variabilité sous influence de l'espacement des sillons,

Ces chiffres permettent de conclure que :

- Les postes liés à la fréquence des rames comme le personnel, les manipulateurs..., sont variables en fonction de cette fréquence,
- Les postes liés à la rame comme les transferts de voie..., restent constants pour un même service mais sont liés au taux de transbordement propre à chaque gare,
- Les moyens nécessaires aux manipulations en gare restent constants pour un même pourcentage du trafic pris en charge par l'infrastructure mais varient avec son étalement dans le temps.

### 9.3.4 ESTIMATION DES INVESTISSEMENTS

#### 9.3.4.1 Introduction

Il est important de garder en mémoire le fait que le wagon R-shift-R est un wagon automoteur : le niveau de comparaison adéquat est le coût du wagon tracté soit la répartition sur 46 wagons de la traction nécessaire et surtout suffisante pour garantir le passage dans toutes configurations de la ligne. Une motrice moderne est d'un prix variant entre 2,2 et 4,1 M€. Par ailleurs, et si le développement de certains aspects de la technologie R-shift-R comme la motorisation répartie ou le dispositif de variation de hauteur induisent certes des contraintes (notamment en termes d'homologation par les instances de tutelles), ils visent à limiter les grands travaux d'infrastructure qui requièrent des investissements importants (pour rappel, la reprise du gabarit bas de la ligne Perpignan – Luxembourg pour permettre le passage des rames Modalohr a engendré des coûts estimés à 100 M€).

Le prix des constituants unitaires de la solution R-shift-R est repris dans le tableau qui suit (il sera à revoir en fonction des évolutions technologiques du moment et de la situation du marché) :

Prix unitaire en K€	Constituant R-shift-R
250	Tracteur de quai
21	Praticable
45	Porte praticable
150	Manipulateur
180	Transfert de voie
21 600	Rame (46 wagons)
1 000	Gare (génie civil par module)
6%	Maintenance
42	Main d'oeuvre

Tableau 24: Prix unitaire des constituants R-shift-R

### 9.3.4.2 Cas d'une ligne isolée

Pour les trois cas d'application retenus et sur la base des coûts unitaires et des quantités définies par le niveau de trafic et son étalement dans le temps, les tableaux qui suivent présentent poste par poste le montant des investissements, les besoins en MO, les amortissements qui en découlent, et les conséquences sur le coût du km / wagon. Un coefficient correcteur de 20% est introduit afin d'intégrer une marge d'erreur.

Matériels + MO+ maintenance	Nombre d'unités	Montant K€	Amortissement par km / wagon / €	Coût Km / wagon en euros coefficient = 1,2
Tracteur de quai	36	9000	0,00026	
Praticable roulant	4704	98789	0,00280	
Praticable immobilisé	699	14680	0,00042	
Porte praticable	699	31457	0,00089	
Manipulateur	233	34952	0,00099	
Transfert de voie	243	43742	0,00124	
Rame	102	2208938	0,06268	
Gare (génie civil)	242	241871	0,00686	
Maintenance	2683427	161006	0,06853	
MO	3385	142162	0,06051	
<b>Total</b>		<b>2986594</b>	<b>0,20517</b>	<b>0,2462</b>

Tableau 25: Coûts et amortissements à 100 % de trafic sur 24 h une rame toutes les 17 minutes

Matériels + MO+ maintenance	Nombre d'unités	Montant K€	Amortissement par km / wagon / €	Coût Km / wagon en euros coefficient = 1,2
Praticable roulant	2352	49394	0,0028	0,003
Praticable immobilisé	466	9786	0,0006	0,001
Porte praticable	466	20971	0,0012	0,001
Manipulateur	78	11651	0,0007	0,001
Transfert de voie	243	43742	0,0025	0,003
Rame	51	1104469	0,0627	0,075
Gare (génie civil)	242	241871	0,0137	0,016
Maintenance	1489384	89363	0,0761	0,091
MO	1755	73727	0,0628	0,075
<b>Total</b>		<b>1652474</b>	<b>0,2233</b>	<b>0,268</b>

Tableau 26: Coûts et amortissement pour 50% du trafic en 24 heures une rame toutes les 34 mn

Matériels + MO+ maintenance	Nombre d'unités	Montant K€	Amortissement par km / wagon / €	Coût Km / wagon en euros coefficient = 1,2
Tracteur de quai	36	9000	0,0005	0,0006
Praticable roulant	2352	49394	0,0028	0,0034
Praticable immobilisé	699	14680	0,0008	0,0010
Porte praticable	699	31457	0,0018	0,0021
Manipulateur	233	34952	0,0020	0,0024
Transfert de voie	243	43742	0,0025	0,0030
Rame	51	1104469	0,0627	0,0752
Gare (génie civil)	242	241871	0,0137	0,0165
Maintenance	1529564	91774	0,0781	0,0937
MO	1334	56048	0,0477	0,0573
<b>Total</b>		<b>1529564</b>	<b>0,2126</b>	<b>0,2552</b>

Tableau 27: Coûts et amortissements pour 50 % du trafic sur 12 h une rame toutes les 17 minutes

Le tableau qui suit synthétise les conclusions pour les trois cas d'applications et traduit les résultats en terme de coût km / wagon.

Situation	Tracteur de quai	Praticable immobilisé	de Plateau transfert	Manipulateur automatique	Transfert sur voie	Personnels	Coût Km wagon en € pour R-s-R coéf =1,2
100 % en 24 heures	36	699	699	233	243	3385	0,2462
50 % en 24 heures	30	466	466	78	243	1334	0,2552
50 % en 12 heures	36	699	699	233	243	1755	0,2680

Tableau 28: Synthèse des calculs pour les 3 cas d'application

Les figures qui suivent présentent la répartition par postes du coût du km/wagon ; il est à noter que :

- Les équipements nécessaires au fonctionnement des gares (postes 1 à 6) influent peu sur le coût du km/wagon et représentent environ 5 %,
- La maintenance est un poste important et représente plus de 36%,
- Les coûts liés aux gares (génie civil) et aux rames représentent 36%,
- La main d'œuvre représente 22%.

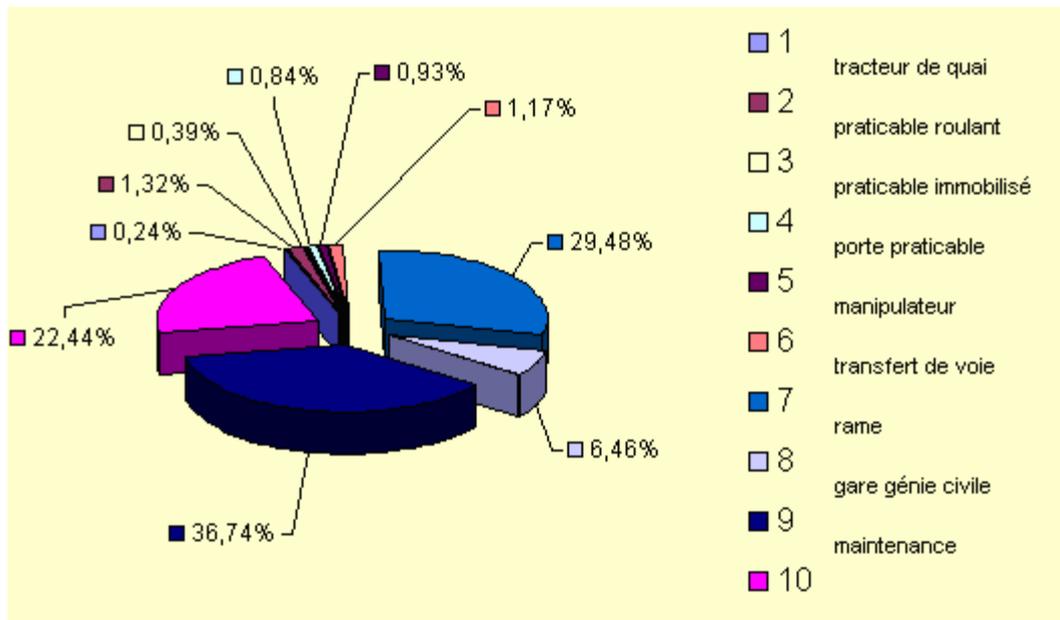


Figure 85 : Structure de coûts pour une ligne dédiée

Par ailleurs, comme l'indique la figure suivante, les investissements sont à 86 % absorbés par les matériels roulants (rames et praticables).

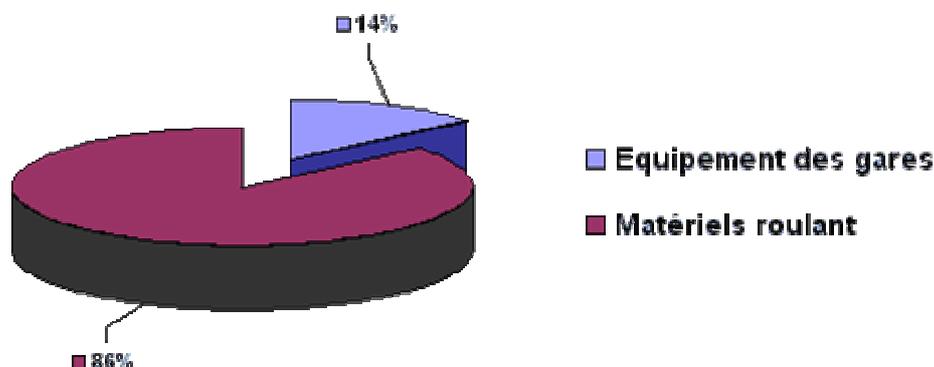


Figure 86 : Répartition des investissements

Ces résultats peuvent être utilisés pour étudier le coût d'un trajet entre deux gares de l'infrastructure. Dans ce cadre, un tableau O/D d'une ligne potentielle Nord-Sud disposant de cinq gares intermédiaires est utilisé (les distances sont des estimations) :

	Nord	Picardie	Ouest	Sud IdF	Poitou	Bordeaux	Sud
Nord	0	150	300	450	650	950	1200
Picardie	150	0	150	300	500	800	1050
Ouest	300	150	0	150	350	650	900
Sud IdF	450	300	150	0	200	500	750
Poitou	650	500	350	200	0	300	550
Bordeaux	950	800	650	500	300	0	250
Sud	1200	1050	900	750	550	250	0

Tableau 29: Distances entre gares

	Nord	Picardie	Ouest	Sud IdF	Poitou	Bordeaux	Sud
Nord		36,9	73,9	110,8	160,0	233,9	295,4
Picardie	36,9		36,9	73,9	123,1	197,0	258,5
Ouest	73,9	36,9		36,9	86,2	160,0	221,6
Sud IdF	110,8	73,9	36,9		49,2	123,1	184,7
Poitou	160,0	123,1	86,2	49,2		73,9	135,4
Bordeaux	233,9	197,0	160,0	123,1	73,9		61,6
Sud	295,4	258,5	221,6	184,7	135,4	61,6	

Tableau 30: Coût d'un transfert O/D

D'une manière générale, ces résultats sont à mettre en parallèle avec :

- Le constat de M Chion (Novatrans) quand il ne dit « maîtriser que 25/30 % de ces coûts »
- Le point de vue de l'AUTF qui estime que le prix de vente moyen est de 1€ km/wagon, étant compris entre 0,95 à 1,15 € le km/wagon.

Cependant il reste à poursuivre plus en avant les études sur le sujet pour bien percevoir toutes les contraintes qui découlent du mode d'exploitation :

- Faut-il une organisation d'exploitation sur 24 heures d'affilée sur 5/6 jours et recentrer l'ensemble de la maintenance sur le/les derniers jours ?
- Faut-il massifier le rythme des convois pour se plaquer à la production et provoquer une envolée des investissements ?
- Faut-il accepter l'embarquement des convois routiers de 25,5 mètres, ce qui créera une perte de capacité ?

### 9.3.4.3 Cas d'un réseau maillé

Dans le cas d'un réseau maillé, la méthode retenue pour la constitution des rames ne peut plus être mise en œuvre d'où la nécessité d'un équipement complet des quais et des traversées de voies dans toutes les gares. Cela implique que le mode de fonctionnement des gares devient aléatoire. En partant des mêmes données nous arrivons aux estimations de coûts suivantes :

Nombre de quais	Nombre de modules actifs par gare	Personnel embarquement par module	Personnel chargement par module	Personnel de contrôle + environnement	Nombre d'équipes sur 24h	total
1	46	1	0	8	7	378
2	92	1	0	8	7	700
2	92	1	0	8	7	700
2	92	1	0	8	7	700
2	92	1	0	8	7	700
2	92	1	0	8	7	700
1	46	1	0	8	7	378
				102	14	1428
<b>Personnel</b>						<b>5684</b>
Tracteur sur quai routier	Praticable immobilisé	Plateau de transfert	Manipulateur automatique	Transfert sur voie		
8	138	138	46	46		
8	92	92	35	92		
8	92	92	41	92		
8	92	92	19	92		
8	92	92	23	92		
8	92	92	24	92		
8	138	138	46	46		
<b>56</b>	<b>736</b>	<b>736</b>	<b>233</b>	<b>552</b>		

Tableau 31: Coûts en personnel et équipements pour un réseau maillé

Cela a pour conséquence de faire passer le prix de revient du wagon /km de 0,2462 à 0,3197 € pour un même trafic, soit 30% d'augmentation :

Matériels + MO+ maintenance	Nombre d'unités	PU en k€	Montant K€	Amortissement par km / wagon en €	Coût Km / wagon en euros coefficient = 1,2
Tracteur de quai	56	250	14000	0,00040	
Praticable roulant	4704	21	98789	0,00280	
Praticable immobilisé	736	21	15456	0,00044	
Porte praticable	736	45	33120	0,00094	
Manipulateur	233	150	34952	0,00099	
Transfert de voie	552	180	99360	0,00282	
Rame	102	21600	2208938	0,06268	
Gare (génie civil)	552	1000	552000	0,01566	
Maintenance	3056614	6%	183397	0,07806	
MO	5684	42	238728	0,101605	
<b>TOTAL</b>			<b>3478739</b>	<b>0,26639</b>	<b>0,3197</b>

Tableau 32: Coût du km pour le réseau maillé

De même, la structure des coûts varie sensiblement :

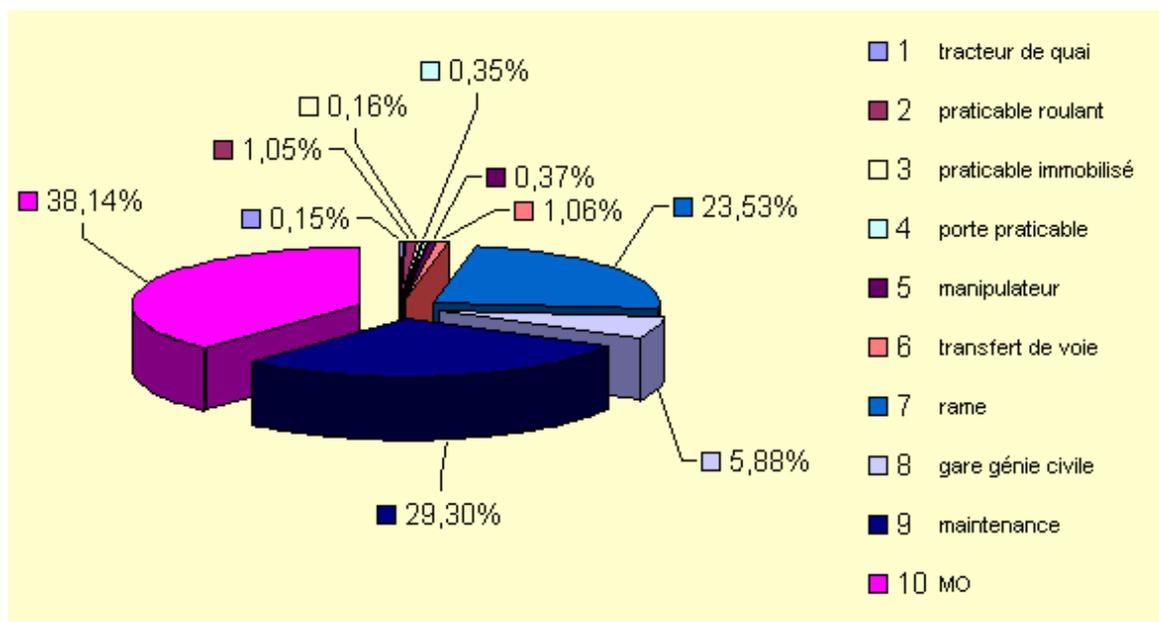


Figure 87 : Structure de coûts pour un réseau maillé

### 9.3.5 COMPARAISON DES BESOINS EN EQUIPEMENTS ET DES COUTS AU KM/WAGON PAR VARIANTES

Eléments	Coût en k€	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5		Paramètres constants
		N.bre	Invest.	N.bre	Invest.	N.bre	Invest.	N.bre	Invest.	N.bre	invest.	
<b>Prix d'une rame sans praticable</b>			<b>15520</b>		<b>12300</b>		<b>13080</b>		<b>16020</b>		<b>9540</b>	années d'amortissement
Prix des wagons		46	14720	46	11500	42	5880	42	8820	46	8740	15
Prix du wagon pilote	400	2	800	2	800	0	0	0		2	800	jours de travail
Prix des trains			1978320		1591920		1529750		1851871		1144800	360
Wagon base			320		250		140		210		190	longueur infrastructure
Prix de la base	80											1200
Prix motorisation répartie	110											
Prix motorisation unique	3600					2	7200	2	7200			nombre de sens
Prix variation de hauteur	70											2
Prix reprise de charge	60											nombre de trains
Prix praticable embarqué	21	46	966	46	966	42	882	42	882	0	0	60
Prix des équipements par wagon			692		692		692		692		461	nombre de voyage jour
Manipulateur de conteneur	210	0,4	84	0,4	84	0,4	84	0,4	84	0		

Manipulateur de remorque	200	0,2	40	0,2	40	0,2	40	0,2	40	0		96
Praticable	21	3	63	3	63	3	63	3	63	0		
Porte praticable	45	3	135	3	135	3	135	3	135	3	135	
Manipulateur automatique	150	1	150	1	150	1	150	1	150	1	150	nombre de gares
Obturateur de fosse	220	1	220	1	220	1	220	1	220	0,8	176	7
Coût total des gares			381984		381984		348768		348768		254472	nombre de quai
<b>Coût suivant taux d'équipement</b>		100%	381984	100%	381984	100%	348768	100%	348768	100%	254472	12
<b>Infrastructure prix de reprise</b>												
Reprise du profil bas = %	240	5%	28800	100%	576000	100%	576000	5%	28800	0	0	
Reprise du profil haut = %	1000	5%	120000	5%	120000	5%	120000	5%	120000	0	0	
Remorque de 4 m		Ok		Ok		Ok		Ok		Ok		
Remorque de 4,1 m		Ok		non		non		Ok				
Remorque de 4,2 m		Ok		non		non		Ok				
% de remplissage		100%	46	100%	46	100%	42	100%	42	100%	46	
<b>Coût du Km/wagon en €</b>			<b>0,044</b>		<b>0,047</b>		<b>0,049</b>		<b>0,045</b>		<b>0,024</b>	
<b>Productivité de la ligne W/j</b>			<b>8832</b>		<b>8832</b>		<b>8064</b>		<b>8064</b>		<b>8832</b>	

Tableau 33: Synthèse des besoins en équipements et leur influence sur les coûts au km/wagon en fonction de la variante retenue (hors MO)

## 9.4 COMPARAISON AUX ALTERNATIVES EXISTANTES

### 9.4.1 PREAMBULE

Afin de poursuivre le raisonnement, il peut sembler utile d'effectuer une analyse comparative entre les différentes expériences ou organisations de ferroutage qui sont aujourd'hui connues. Dans la suite, R-shift-R est comparée à Modalohr et AFR. Il est cependant à noter que :

- Le principe même d'une comparaison entre ces solutions reste critiquable, en ce sens qu'elles illustrent des approches complètement différentes : les solutions Modalohr et AFR s'intègrent par définition dans l'exploitation ferroviaire actuelle, tandis que R-shift-R la remet profondément en cause,
- Ces éléments de comparaison restent théoriques : les données de base utilisées n'ont pas la même finesse, granularité et fiabilité ; celles pour les solutions Modalohr et AFR sont issues des données à disposition dans la littérature existante (notamment les données constructeur) complétées pour Modalohr d'observations sur site en conditions opérationnelles (sur le site d'Aiton) ; pour R-shift-R elles sont issues de travaux de modélisation fins et de calculs de type MTM, et ont été réalisés par le partenaire APF.

### 9.4.2 ANALYSE DES PARAMETRES DIMENSIONNANTS

#### 9.4.2.1 Nombre de quais

Le nombre de quais nécessaire au traitement des rames est directement lié au nombre de wagons par rame et au temps qui sera nécessaire au traitement des opérations de déchargement/chargement.

Concept	contrôle de conformité	débarquement	embarquement	chargement	déchargement	contrôle	temps de reconstitution du convoi	temps d'arrêt de la rame	immobilisation de la rame définie par le constructeur	nombre de wagons rame de 750 m	nombre de quais pour 3000 V/J et 20h/j	nombre de quais par défaut
<b>R-shift-R</b>	40	20	20	3	3	6		12	15	46	1,0	1
<b>Modalohr</b>	40	20	25			20		65	70	34	6,3	7
<b>AFR</b>	40	20	20	20	20	6	60	46	106	32	10,2	10

Tableau 34: Comparaison du nombre de quais nécessaire pour les trois solutions

*Nota : Les temps « en vert » sont ceux qui se déroulent en absence de la rame.*

Dans le cas de la solution AFR, il est à noter que la séparation du convoi induit un temps de reconstitution des rames utilisé pour le calcul de leur temps d'immobilisation.

### 9.4.2.2 Surface des gares

Le nombre de quais a une conséquence directe sur la surface des gares. Les zones routières des gares étant identiques quel que soit le concept retenu, les surfaces associées n'ont pas été prises en compte dans la suite des calculs. Par ailleurs, pour la solution AFR, les estimations ne tiennent pas compte des quais de stockages des rames.

Concept	préparation/dépose des chargements	embarquement débarquement	chargement déchargement	largeur voie	largeur minimum nécessaire par quai	longueur minimum nécessaire km	nombre de quais par défaut	surface gare hectare
<b>R-shift-R</b>	28	28	9	3,2	65	1,05	1	6,85
<b>Modalohr</b>	28	15	15	3,2	61	1,35	7	55,73
<b>Arbel</b>	28	33	28	3,2	270	0,368	10	99,36

Tableau 35: Comparaison des surfaces requises pour les trois solutions

### 9.4.2.3 Nombre de rames

Comme pour le nombre de quais, le nombre de rames circulant peut être étudié. Le mode de calcul retenu pour le nombre de trains circulant est le suivant :

$(\text{Temps dans le système en minutes}) / (\text{Fréquence des rames})$

Le calcul du nombre de trains à construire tient compte de la maintenance :

$(\text{Nombre de train circulant}) \times 1,10$

Concept	nombre de wagons par rame	nombre de trains jour	temps d'arrêt en gare	temps d'arrêt total "h"	temps de déplacement "h"	temps de voyage "h"	fréquence des trains "minute"	vitesse moyenne	nombre de trains circulant	nombre de trains à construire
<b>R-shift-R</b>	46	96	15	1,75	10	11,8	15,0	102	47	52
<b>Modalohr</b>	34	130	70	8,2	10	18,2	11,1	66	98	108
<b>Arbel</b>	32	138	106	12,4	10	22,4	10,4	54	129	141

Tableau 36: Comparaison sur le nombre de trains à construire pour les trois solutions

Suivant la solution mise en œuvre :

- Le nombre de rame varie de 47 à 129,
- Le temps de parcours passe de 11,8 à 22,4 heures,
- La vitesse moyenne, pour une même vitesse nominale, se réduit de 102 à 54 km/h.

En raisonnant sur le nombre de wagons à construire, le bilan fait apparaître une capacité d'investissement pour un wagon « R-shift-R » de l'ordre de 35 à 50% supérieure aux autres solutions, auquel doit s'ajouter le prix des locomotives. On peut estimer que dans le cas le plus favorable cela représente 89500 € par wagon.

### 9.4.3 ANALYSE DU COEFFICIENT TECHNOLOGIQUE

Un coefficient technologique est défini :

*(Longueur du wagon x Temps d'occupation du quai x Nombre de quai) /  
(Type de conditionnement x Vitesse moyenne)*

*ou*

*(Lw x Toq x Nq) / (Tc x Vm)*

De manière à synthétiser la présentation du calcul du coefficient technologique, le formalisme suivant est utilisé :

Wagon + Rame		Gare			Liaison		
<b>Paramètres « du concept »</b>							
<b>Lw</b>	longueur du wagon		<b>Toq</b>	temps d'occupation du quai (h)		nombre de wagon par jour	
	longueur utile de la rame			capacité en contenant d'un quai sur 24 h		vitesse initiale moyenne	
<b>Tc</b>	type de conditionnement			temps dans le système		distance maxi	
	nombre de wagons par rame		<b>Nq</b>	nombre de quais par gare		Nombre de gare	
	nombre de rames			fréquence des rames			
<b>Vm</b>	vitesse commerciale			nombre d'emplacement sur quai			
	nombre de wagon à construire					<b>Coefficient technologique</b>	

Tableau 37: Feuille de calcul du coefficient technologique (modèle)

Wagon + Rame			Gare			Liaison	
<b>Paramètres R-shift-R</b>							
<b>Lw</b>	longueur du wagon	15,75	<b>Toq</b>	temps d'occupation du quai (h)	0,25	nombre de wagon par jour	4416
	longueur utile de la rame	724,5		capacité en contenant d'un quai sur 24 h	8832	vitesse initiale moyenne	120
<b>Tc</b>	type de conditionnement	2		temps dans le système	11,75	distance maxi	1200
	nombre de wagons par rame	46	<b>Nq</b>	nombre de quais par gare	1	Nombre de gare	7
	nombre de rames	47		fréquence des rames	15		
<b>Vm</b>	vitesse commerciale	102		nombre d'emplacement sur quai	322		
	nombre de wagon à construire	2162				<b>Coefficient technologique</b>	0,019
<b>Paramètres Modalohr</b>							
<b>Lw</b>	longueur du wagon	20,6	<b>Toq</b>	temps d'occupation du quai (h)	1,25		
	longueur utile de la rame	700		capacité d'un quai sur 24 h	1305	Rapport des investissements entre R-shift-R et Modalohr	141
<b>Tc</b>	type de conditionnement	1		temps dans le système	19		
	nombre de wagons par rame	34	<b>Nq</b>	nombre de quais par gare	7		
	nombre de rames	102		fréquence des rames	11,08		
<b>Vm</b>	vitesse commerciale	64		nombre d'emplacement sur quai	1610		
	nombre de wagon à construire	3450				<b>Coefficient technologique</b>	2,72
<b>Paramètres Arbel AFR</b>							
<b>Lw</b>	longueur du wagon	20,08	<b>Toq</b>	temps d'occupation du quai (h)	1,78		
	longueur utile de la rame	700		capacité d'un quai sur 24 h	940	Rapport des investissements entre R-shift-R et AFR	163
<b>Tc</b>	type de conditionnement	2		temps dans le système	22		
	nombre de wagons par rame	35	<b>Nq</b>	nombre de quais par gare	9		
	nombre de rames	119		fréquence des rames	11,37		
<b>Vm</b>	vitesse commerciale	53		nombre d'emplacement sur quai	2293		
	nombre de wagon à construire	4133				<b>Coefficient technologique</b>	3,14

Tableau 38: Feuille de calcul du coefficient technologique des solutions Modalohr, Arbel et R-shift-R

R-shift-R		Modalohr		AFR	
Prix d'un wagon + 1 praticable	341	Prix d'un wagon	180	Prix d'un wagon	90
Prix d'un élément de tête	400	Prix d'une motrice	3600	Prix d'une motrice	3600
Surface d'une gare	68250	Surface d'une gare	557392	Surface d'une gare	1242978
Prix du m <sup>2</sup>	60	Prix du m <sup>2</sup>	60	Prix du m <sup>2</sup>	60
Prix d'un équipement de quai par wagon	692	Prix d'un équipement de quai par wagon	450	Prix d'un équipement de quai par wagon	70
<b>Valeur par poste</b>					
Prix des wagons + praticables	737242	Prix des wagons	621000	Prix des wagons	371938
Prix des éléments de tête	37600	Prix des motrices	731006	Prix des motrices	853544
Prix du foncier des gares	28770	Prix du foncier des gares	234105	Prix du foncier des gares	522051
Prix des équipements de quai	222824	Prix des équipements de quai	724500	Prix des équipements de quai	160485
<b>Investissements en K€</b>	<b>1026436</b>	<b>Investissements en K€</b>	<b>2310610</b>	<b>Investissements en K€</b>	<b>1908017</b>
<b>Rapport des investissements entre deux modes</b>		<b>2,251</b>	<b>1,211</b>	<b>1,859</b>	

Tableau 39: Investissement ferroviaire pour 3 types de wagons suivant les paramètres de liaison

#### 9.4.4 COMPARAISON ENTRE VARIANTES R-SHIFT-R ET UN MODELE

Le tableau ci-dessous définit les contraintes des 4 variantes R-shift-R et d'un Modèle qui peut être assimilé par ces performances à des concepts actuellement en cours d'expérimentation. Sur cette base, un second tableau permet d'éclairer les conséquences financières qui en découlent.

Cad	0,16		Coefficient d'adhérence roue / rail			Chmax	44	t	Charge maximale par UTF
Pm	0,030		Pente maximale franchissable			Vk	120	km/h	Vitesse maximale des trains
Lmr	750	m	Longueur maximale d'une rame			Vramp	70	km/h	Vitesse en pente
	Mod	RSR1	RSR2	RSR3	RSR4	unité	Mod / RSR1 / RSR2 / RSR3 / RSR4		
Lutf	20,5	15,75	15,75	15,75	15,75	m	Module de longueur d'une UTF		
Mutf	25	21	19	17	17,5	t	Masse d'une UTF		
Motutf	0	1	1	0	0		Nombre de moteurs par UTF		
Emutf	0	1	1	0	0		Nombre d'essieux moteurs par UTF		
Etutf	3	3	3	3	3		Nombre d'essieux total par UTF		
Lelt	22	12,75	12,75	22	22	m	Longueur d'un élément de tête (ou machine)		
Melt	80	35	35	80	80	t	Masse d'un élément de tête (ou machine)		
Motelt	2	1	1	2	2		Nombre de moteurs par élément de tête		
Emelt	4	1	1	4	4		Nombre d'essieux moteurs par élément de tête		
Etelt	4	4	4	4	4		Nombre d'essieux total par élément de tête		
Nbutf	<b>28</b>	<b>46</b>	<b>46</b>	<b>28</b>	<b>28</b>		Nombre d'UTF par rame		
Nbelt	6	2	2	5	5		Nombre de motrice par rame		

Tableau 40: Contraintes des variantes R-shift-R et d'un Modèle

Coûts des technologies possibles (base 130 km/h)							
	Mod	RSR1	RSR2	RSR3	RSR4	Unité	Donnée
PxElt	2500	400	400	2500	2500	K€	Prix élément de tête
Pxutf	180	341	271	161	231	K€	Prix d'une UTF
PxPrc	0	21	21	21	21	K€	Prix d'un praticable
Paramètres statiques calculés pour une rame							
Mvc	1180	1036	944	876	890	Tonne	Masse à vide
Crc	1232	2024	2024	1232	1232	Tonne	Charge maxi
Mrc	2412	3060	2968	2108	2122	Tonne	Masse totale roulante
Mmt	480	1014	984	400	400	Tonne	Masse sur essieux moteurs
Lrc	706	750	750	551	551	m	Longueur rame
Canc	0,151	0,091	0,091	0,158	0,159	---	Coefficient d'adhérence
<b>Pxr</b>	<b>20040</b>	<b>15520</b>	<b>12300</b>	<b>16420</b>	<b>18380</b>	<b>K€</b>	<b>Prix d'une rame suivant technologie</b>

Tableau 41: Prix des rames d'un modèle et par variantes R-shift-R

Les deux tableaux présentent des résultats sensiblement différents pour les prix des rames RSR3 et RSR4, STEF prenant en compte les calculs d'adhérence pour définir le nombre de motrices requis pour gravir les pentes, ce qui fait varier le nombre de wagons pour respecter la longueur de 750 m. Ces calculs ont été faits pour la charge embarquée maximum ce qui ne sera probablement jamais le cas dans la réalité. Cependant, ils démontrent très nettement la pertinence du concept R-shift-R pour la motorisation répartie. La dernière ligne du tableau montre l'intérêt de la motorisation répartie entre les versions RSR1-RSR2 et RSR3-RSR4 et la réflexion nécessaire sur la présence ou pas de la variation en hauteur (en fonction de la captation du marché qu'elle assure (remorque de 4,2 m)).

L'avant dernier tableau regroupe les équipements nécessaires pour l'utilisation rationnelle d'une infrastructure de 1200 km avec 7 gares. Ces moyens sont définis pour une utilisation maximum de la fréquence admissible par un quai R-shift-R, soit un train toutes les 15 minutes et sur 24 heures.

L'évaluation des différents postes comme leur chiffrage ont été définis en fonction des éléments disponibles au moment du rapport. Ils pourront évoluer en cours de finalisation des études. Cependant les marges prises pour leurs chiffrages semblent suffisamment importantes pour éviter une dérive sérieuse.

Les gares sont à double quai (1 par sens) sauf les gares extrémités ; ce qui donne 12 quais à équiper. La capacité d'un quai est de 96 rames jour ou encore 192 chargements/déchargements jour par emplacement. Cinq variantes sont proposées, elles permettent d'appréhender la nécessité de mettre en œuvre certains équipements. Le coût du km de reprise du profil bas est obtenu à partir de l'opération engagée pour la restructuration de la ligne Grenoble-Valence. Il s'est avéré impossible d'obtenir le coût de reprise (trop variable) du profil haut d'une infrastructure. Le niveau d'équipement réel des quais sera à définir en fonction du renouvellement cumulé par l'ensemble des gares, et des ES retenues dans STEF. Le niveau d'utilisation donc d'équipement par gare peut être calculé de la manière suivante:  $\% = (X / Y) * 100$ , avec  $X = (\text{déchargé} + \text{chargé})$  dans l'ensemble des gares, et  $Y = (\text{capacité théorique de la gare}) \times (\text{nombre de gare})$ . Le coût du km / wagon est obtenu comme suit :

$(\text{Ensemble des dépenses}) \times (\text{taux de remplissage} / \text{jours d'amortissement}) \times (\text{nombre de sens})$

Les deux dernières lignes du tableau montrent :

- Une faible variabilité du coût W/Km pour les 4 premières variantes,
- Une perte de capacité d'environ 10% pour les variantes 3 et 4, due à la présence des locomotives.

Il est à noter que cette estimation ne prend pas en compte, pour les versions 3 et 4, la perte « en part de marché » qu'engendre la limitation de passage du gabarit GB+. Ces éléments sont pris en compte dans les analyses de STEF. Pour rappel, d'après les résultats de la campagne de mesures réalisées par LTF, moins de 30% des véhicules sont à 4 m et plus de 95% à 4,2 m.

## 9.5 DEFINITION DE PILOTES

### 9.5.1 PREAMBULE

Les approches du ferroutage purement théoriques qui ont guidé les concepteurs de R-shift-R, jusqu'à ce jour mettent en évidence des insuffisances en matière de support industriel. Cependant ils ne sont pas restés inactifs sur ces aspects même si l'élément majeur d'une industrialisation reste à trouver, i.e. l'engagement d'un constructeur ferroviaire. La mise en œuvre de démonstrateur implique de rechercher ou de créer une structure d'accueil.

Les recherches engagées dans le cadre du projet R-shift-R ont conduit à prendre contact avec de nombreux industriels. Il semble aujourd'hui possible d'imaginer une approche regroupant une partie de ceux-ci.

Pour cela il faut dans un premier temps décomposer les différents éléments du concept en sous-ensembles homogènes afin de mettre en exergue les compétences requises.

### 9.5.2 DEFINITION DES BESOINS ET DES COMPETENCES

#### 9.5.2.1 Démonstrateur 3D et maquette

L'absence d'animation 3D et d'une maquette ont rendu difficile la compréhension du concept par les interlocuteurs rencontrés au cours du projet. La globalité de la démarche R-shift-R peut être difficile à appréhender sans supports visuels performants. Ils soutiendront les dialogues techniques qui s'engageront dans la phase de développement. La maquette doit impérativement mettre en évidence l'articulation entre les wagons et les zones de circulations spécifiques routières et ferroviaires. Le démonstrateur 3D permettra quant à lui de disposer d'une vision générale et dynamique de qualité.

#### 9.5.2.2 Démonstrateur physique et moyens à affecter

##### 9.5.2.2.1 Introduction

Les compétences et les moyens industriels nécessaires pour mener à bien le déploiement du concept ont pu être identifiés au cours du projet. D'une manière générale, quatre sous-ensembles structure le concept :

- La rame
- La gare
- Le porte conteneur
- Le fonctionnement

Chacun induit des besoins technologiques spécifiques :

- Pour la rame qui comprend le wagon avec son bogie, sa balancelle, sa motorisation, ses praticables, l'élément de tête, la transmission des informations et de la puissance électrique,
- Pour la gare qui comprend le foncier, le génie civil, les bâtiments, l'intégration ferroviaire, les mécanismes de passage de fosse, les porte praticables, et l'automanipulateur,
- Pour le porte conteneur qui comprend le châssis et le système de manipulation,
- Pour le fonctionnement, qui intègre deux parties distinctes :
  - La première d'ordre organisationnel, en termes de contrôle d'entrée, d'équilibre des flux, de constitution de convoi, de suivi des marchandises, de réservation, d'implantation des terminaux sur le territoire, et d'affectation des sillons,
  - La seconde d'ordre technologique, en termes de transmission des données et de traitement des informations,

Il convient également de spécifier comment s'articule, dans les différentes configurations des réseaux, le fonctionnement des terminaux de transbordement, et comment s'ordonneront les organisations logistiques.

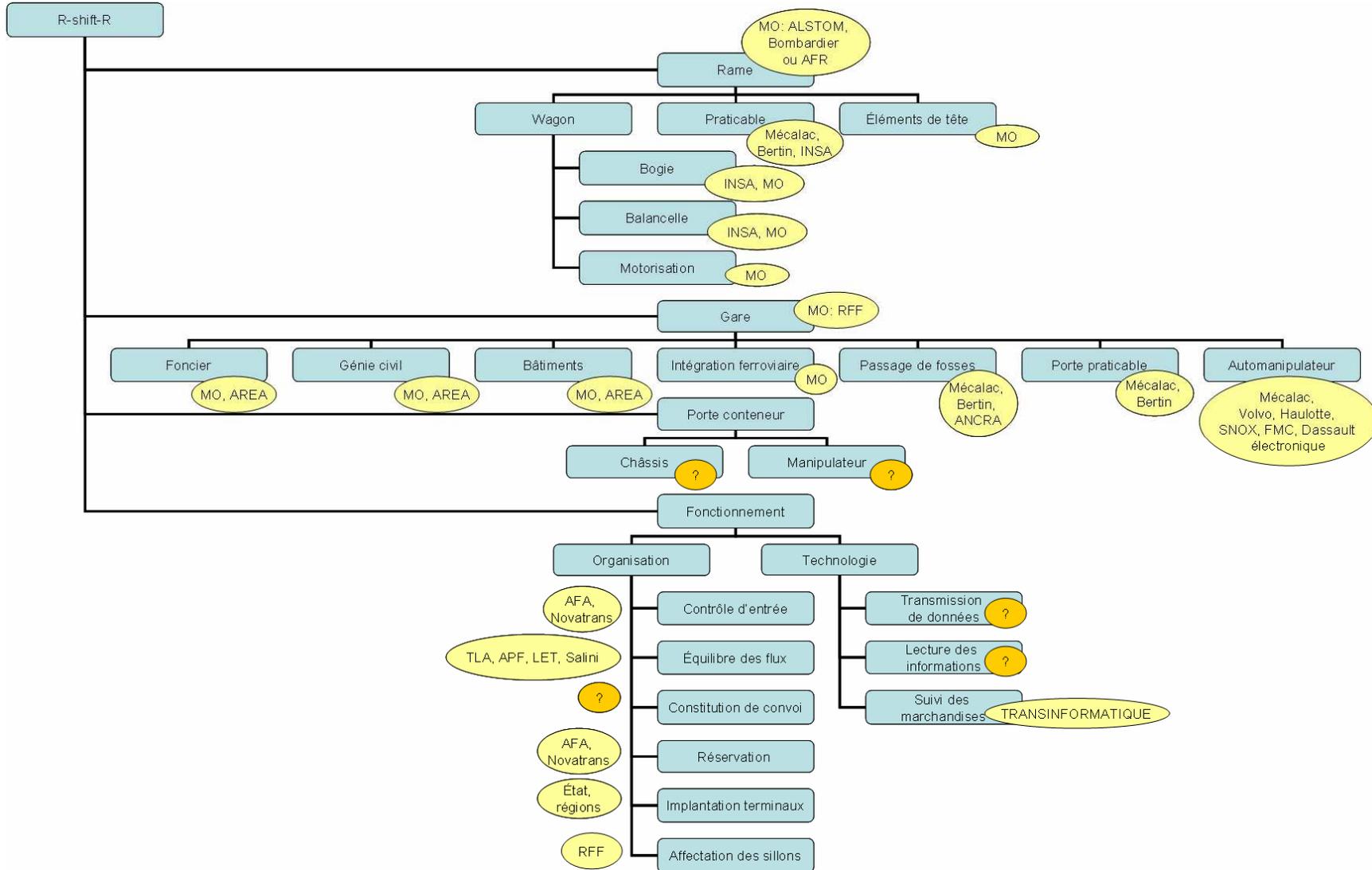
Cette liste (sans être limitative) impose pour chaque sous-système une structure industrielle compétente.

La mise en œuvre des pilotes pourra se structurer autour de l'investissement des acteurs industriels et de financements publics. Ces financements pourront être recherchés :

- A l'échelon national : R-shift-R pourrait bénéficier du support d'un pôle de compétitivité et de l'ANR/PREDIT dans le cadre de la mise en œuvre d'un pilote,
- A l'échelle Européenne : le 7<sup>ème</sup> programme cadre (DG RTD) pourrait être mis à contribution pour le lancement d'un pilote d'envergure, et à terme, le programme Marco Polo pourrait être envisagé pour le lancement du service commercial.

#### 9.5.2.2.2 Répartition des compétences

La figure suivante détaille pour chaque sous-système et pour chacun de ses composants les acteurs susceptibles d'intervenir :



### 9.5.2.2.3 Scénarios possibles

Dans la suite, trois scénarios sont envisagés :

- Scénario 1 a minima
- Scénario 2 médian, d'intégration dans une structure existante
- Scénario 3 spécifique, avec création d'une rame complète

La phase finale, cible du déploiement du concept R-shift-R, est alors caractérisée.

#### 9.5.2.2.3.1 Scénario 1

A minima, et avant tout engagement industriel définitif, il convient de contrôler les points clés de la solution R-shift-R i.e. un embarquement/débarquement en moins de 6 minutes et la faisabilité de la variation de hauteur. La motorisation répartie ne s'impose qu'en seconde approche, puisque la démonstration est faite que la solution fonctionne (AGV, TGV...).

Dans ce cas deux alternatives sont possibles. La 1<sup>ère</sup> consiste à réaliser ce pilote avec un wagon de type RSR 4, ce qui implique de construire :

- 1 x 2 wagons de référence RSR 4,
- 2 systèmes de transfert de fosse,
- 6 praticables,
- 2 modules d'embarquement/débarquement, qui auront pour fonction, le premier, la reprise et la dépose des conteneurs de 30, 40 pieds ou 45 pieds (et probablement le 20 pieds après finalisation des études), et le second, l'embarquement/débarquement des remorques
- 1 automanipulateur,
- 1 remorque porte conteneur si l'on veut expérimenter cette fonctionnalité.

Les besoins financiers associés ont été estimés comme suit :

Investissement démonstrateur	PU	Version 2 wagons	
		Nombre	Total
Rame / wagons	210	2	420
Praticables	21	8	168
Porte praticable	45	6	270
Manipulateur automatique	150	1	150
Obturateur de fosse	220	2	440
Remorque porte conteneur	120	1	120
<b>Investissements en matériels</b>			<b>1 568000</b>
Démonstrateur 3 D	40000	1	<b>40000</b>
Maquette	16000	1	<b>16000</b>
Contrôle + annexes	0	0	
Etudes spécifiques	250	6000	<b>1 500000</b>
<b>Total</b>			<b>3 124000</b>

Tableau 42: Besoins financiers pilote scénario 1 (1<sup>ère</sup> alternative)

La 2<sup>nde</sup> alternative consiste à réaliser le pilote avec un wagon de type RSR 1, ce qui implique de construire :

- 1 x 2 wagons de référence RSR 1,
- 2 systèmes de transfert de fosse,
- 6 praticables,
- 2 modules, d'embarquement/débarquement, qui auront pour fonction, le premier, la reprise et la dépose des conteneurs de 30, 40 pieds ou 45 pieds (et probablement le 20 pieds après finalisation des études), et le second, l'embarquement/débarquement des remorques
- 1 automanipulateur,
- 1 remorque porte conteneur si l'on veut expérimente cette fonctionnalité.

Les besoins financiers associés ont été estimés comme suit :

Investissement démonstrateur	PU	Version 2 wagons	
		Nombre	Total
Rame / wagons	320	2	640
Praticables	21	8	168
Porte praticable	45	6	270
Manipulateur automatique	150	1	150
Obturateur de fosse	220	2	440
Remorque porte conteneur	120	1	120
<b>Investissements matériels</b>			<b>1 788000</b>
Démonstrateur 3 D	40000	1	<b>40000</b>
Maquette	16000	1	<b>16000</b>
Contrôle + annexes	0	0	
Etudes spécifiques	250	6000	<b>1 500000</b>
<b>Total</b>			<b>3 344000</b>

Tableau 43: Besoins financiers pilote scénario 1 (2<sup>nde</sup> alternative)

Les engagements financiers semblent peu différents entre les solutions proposées. Avec cependant une difficulté qu'il faut prendre en compte dans le second cas : qui est de faire déplacer ce wagon ! Pour rendre cette opération possible il faut intégrer provisoirement, dans la réalisation du groupe de deux wagons, un groupe électrogène d'une puissance d'environ 400 kW. Ce groupe trouve naturellement sa place sur le bogie central. L'investissement qu'il nécessite n'est pas conséquent.

### 9.5.2.2.3.2 Scénario 2

Ce scénario consiste à adapter les gares d'Aiton et Orbassano pour une mise en œuvre et une expérimentation rapide de R-shift-R, et à mettre en service un wagon universel dans son cadre de fonctionnement. Les apports technologiques en place de Modalohr et les études préliminaires de R-shift-R permettent d'envisager l'évolution des gares expérimentales d'Aiton et d'Orbassano pour leur utilisation partielle par R-shift-R. L'utilisation de ce cadre permettrait, pour un investissement minimum, de s'intégrer dans un ensemble qui dispose d'une structure d'accueil opérationnelle, de mettre dès l'origine R-shift-R dans des conditions de fonctionnement réelles, et de permettre une analyse (comparative) objective.

Cette utilisation impose les réalisations suivantes pour chaque rame et pour chaque gare :

- 1 élément de tête,
- 5 x 2 wagons,
- 10 systèmes de transfert de fosse,
- 20 à 30 praticables,
- 10 modules d'embarquement/débarquement correspondant qui se répartiront en deux affectations : 2 ou 4 d'entre eux pour la reprise et la dépose des conteneurs de 30, 40 pieds ou 45 pieds (et probablement le 20 pieds après finalisation des études), les autres pour l'embarquement/débarquement des remorques
- 1 automanipulateur,
- 2 remorques porte conteneur.

Ces quantités semblent être pertinentes compte tenu du rythme des rames. La décision de modifier l'ensemble des rames existantes peut être remise à plus tard dans la mesure où cette opération n'empêche pas l'expérimentation de R-shift-R.

Les besoins financiers associés ont été estimés comme suit :

Investissement démonstrateur	PU	Version 10 wagons	
		Nombre	Total
Rame / wagons	15520	10	3374
Praticables	21	20	420
Porte praticable	45	20	900
Manipulateur automatique	150	2	300
Obturbateur de fosse	220	20	4400
Remorque porte conteneur	120	2	240
<b>Investissements matériels</b>			<b>9 633913</b>
Démonstrateur 3D	40000	1	<b>40000</b>
Maquette	16000	1	<b>16000</b>
Contrôle + annexes	0	0	
Etudes spécifiques	250	8000	<b>2 000000</b>
<b>Total</b>			<b>11 689913</b>

Tableau 44: Besoins financiers pilote scénario 2

De manière concrète, ce pilote pourrait ainsi se mettre en œuvre au travers d'un allongement de l'une des extrémités du quai d'essai Modalohr de 10 modules R-shift-R. Tout en gardant intact les installations existantes, ceci permettrait :

- D'expérimenter deux modes d'exploitation sur le même site et simultanément,
- De lever les doutes de la faisabilité d'opérer le chargement/déchargement en 6 mn,
- De contrôler l'ensemble du cycle opérationnel du concept R-shift-R,
- De valider la capacité à embarquer des conteneurs et caisses mobiles en plus des citernes (puis des remorques de 4,2 m, après re-calibrage du tunnel), et d'ainsi augmenter l'attractivité de la ligne comme recherchée par ses exploitants,
- De confirmer par un investissement raisonnable l'évaluation nécessaire,
- De répondre, avec certitude, au questionnement de la Commission Européenne sur les modes d'exploitation marchandises dans le projet Lyon – Turin,
- De justifier la mise en place d'une cellule de décision opérationnelle, basée sur un concept technologique bien abouti,
- De favoriser une prise de décision rapide.

#### 9.5.2.2.3.3 Scénario 3

Le scénario 3 propose de construire une rame et deux terminaux. Ce qui représente pour une rame de 750 m (une rame de 450 mètres pourrait aussi être envisagée pour rester dans la valeur d'un quai plus standard, limitant ainsi l'investissement à 28 wagons) :

- 2 éléments de tête,
- 23 x 2 wagons,
- 100 à 200 praticables,

Et pour une gare :

- 46 modules d'embarquement/débarquement correspondant qui se répartiront en deux affectations : 6 ou 8 d'entre eux pour la reprise et la dépose des conteneurs jusqu'à 40 pieds ou 45 pieds, les autres pour l'embarquement/débarquement des remorques,
- 46 systèmes de transfert de fosse,
- 5 auto-manipulateurs,
- 4 remorques porte conteneur,
- l'ensemble des contrôles et des annexes.

Le choix d'une rame de 46 wagons s'impose si l'on veut appréhender définitivement les problèmes de la transmission de puissance entre les wagons. On peut également envisager la réalisation d'une rame de 28 wagons, tout en réalisant des éléments de tête capables d'alimenter une rame de 46 wagons. Cependant, on peut raisonnablement penser que la réalisation d'une demi-gare de 28 modules peut amplement permettre de contrôler l'ensemble des paramètres s'y rapportant.

Cette solution impose simplement le déplacement d'une rame de 46 wagons pour réaliser son remplissage complet. Ces deux dernières solutions présentent des difficultés d'exploitation commerciale. Le passage par la rame de 46 wagons sera de toute façon nécessaire !

Les besoins financiers associés ont été estimés comme suit :

Investissement démonstrateur	PU	Version 46 wagons	
		Nombre	Total
Rame / wagons	15520	1	15520
Praticables	21	276	5796
Porte praticable	45	92	4140
Manipulateur automatique	150	10	1500
Obturateur de fosse	220	92	20240
Remorque porte conteneur	120	4	480
<b>Investissements matériels</b>			<b>47 676 000</b>
Démonstrateur 3D	40000	1	<b>40000</b>
Maquette	16000	1	<b>16000</b>
Contrôle + annexes	0	2	
Etudes spécifiques	250	20000	<b>5 000000</b>
<b>Total</b>			<b>52 732000</b>

Tableau 45: Besoins financiers pilote scénario 3

#### 9.5.2.2.3.4 Récapitulatif des engagements financiers suivant les options envisagées

Investissement démonstrateur	P U	Version 46 wagons		Version 10 wagons		Version 2 wagons RSR 1	
		Nombre	Total	Nombre	Total	Nombre	Total
Rame / wagons	15520	1	15520	10	33742	2	640
Praticables	21	276	5796	20	4208	8	168
Porte praticable	45	92	4140	20	9006	6	270
Manipulateur automatique	150	10	1500	2	300	1	150
Obturateur de fosse	220	92	20240	20	44002	2	440
Remorque porte conteneur	120	4	480	2	240	1	120
<b>Investissements matériels</b>			<b>47676000</b>		<b>9633913</b>		<b>1 788000</b>
Démonstrateur 3D	40000	1	40000	1	40000	1	40000
Maquette	16000	1	16000	1	16000	1	16000
contrôle + annexes	0	2		0		0	
Etudes spécifiques	250	20000	5000000	8000	2000000	6000	1 500000
<b>Total</b>			<b>52732000</b>		<b>11689913</b>		<b>3 344000</b>

Tableau 46: Récapitulatif des engagements financiers suivant les options envisagées

#### 9.5.2.2.3.5 Phase finale

Il convient, avec cette étape, par la multiplication des gares, de démontrer l'influence du temps d'arrêt en gare sur le rendement général de l'infrastructure et plus spécialement de son impact sur les résultats financiers de l'exploitation ferroviaire (nombre de rames nécessaires, charges transportées...). Pour cela :

- Le scénario 1 trouverait naturellement son prolongement avec la gare d'Ambérieu. Elle pourrait être réalisée avec une éventuelle seconde gare italienne (Milan, Bologne, Gêne...); le choix d'Ambérieu nous semble dicté par la saturation de la région lyonnaise, par une étude des flux qui démontre que 70% de ceux-ci proviennent du nord, et par la présence d'une ligne fret de bonne qualité.
- Le scénario 2 impose dès le départ un choix réfléchi de l'implantation de l'expérimentation. Ce choix doit permettre la mise en place de une ou plusieurs gares intermédiaires sur son parcours ou son prolongement en extrémités. Pour démontrer la pertinence de R-shift-R aux besoins locaux une (des) gare(s) R-shift-R devra (devront) s'intercaler entre les deux extrémités du faisceau retenu. L'implantation et le mode de fonctionnement correspondront à la spécificité d'un tissu urbain coutumier à la configuration (production/consommation).

Cette dernière étape doit confirmer le principe de fonctionnement du ferroutage en mode « TER cadencée ».

#### 9.5.2.3 Poursuite des études

Le projet R-shift-R a permis de valider un grand nombre de points technologiques et d'avancer sur les spécifications du concept. Cependant, de nombreux points restent encore en suspend qui requièrent à eux seuls la mise en œuvre d'un programme spécifique.

La capacité d'intégration de R-shift-R dans les chaînes de flux porte à porte reste à approfondir tant et si bien qu'elle est difficile à appréhender. L'équilibre des flux, la constitution de convoi, les aspects transmission des données, le suivi des marchandises, la réservation, l'implantation des terminaux sur le territoire, la remorque porte conteneur, l'équipement et le processus de manutention, l'intégration au processus portuaire...sont autant de points sur lesquels les acteurs du projet doivent avancer davantage.

Il conviendra également de spécifier comment s'articule, dans les différentes configurations des réseaux, le fonctionnement des terminaux de transbordement et de saisir comment s'ordonneront, sans les révolutionner, les organisations logistiques.

Les recherches sur ces thématiques peuvent se poursuivre sur un plan théorique sans mettre en difficulté l'avancement des travaux de réalisation d'un démonstrateur (qui nécessitera par ailleurs lui-même des études spécifiques, comme précisé dans les tableaux d'estimation).

Il semble par ailleurs crucial de :

- Développer un outil de simulation d'un réseau maillé organisé autour du concept R-shift-R
- Développer en plus de la maquette et du démonstrateur 3D, des dossiers de communication et des argumentaires de la solution destinés à des acteurs décideurs (investisseurs)

De même, si le projet R-shift-R a pu valider la faisabilité technique du concept R-shift-R (plus particulièrement celle d'un bogie à hauteur variable), de très nombreux points restent à étudier de façon poussée, notamment :

- La suspension :
  - Etudier la dynamique du bogie afin de dimensionner les amortisseurs et de valider les ressorts choisis.
  - Etudier la dynamique d'un wagon complet afin notamment d'évaluer les impacts de la dynamique sur la garde au rail,
  - Etudier en détail la fixation de tous les axes des pièces.
- Le freinage : il est clair qu'un système de freinage hydraulique est plus compact, puissant et silencieux que les systèmes pneumatiques actuellement en vigueur. Le déploiement de cette nouvelle technologie reste à étudier notamment en termes :
  - De maintenance et sécurité
  - Thermique,
- La motorisation :
  - Recalculer la puissance nécessaire plus finement en prenant en compte la résistance aérodynamique, les différents frottements et le rendement précis de la motorisation,
  - Choisir un modèle de moteur afin de pouvoir fixer la forme du réducteur,
  - Etudier plus en détail la liaison entre le motoréducteur et le châssis en intégrant un dispositif d'amortissement des vibrations,
  - Concevoir le réducteur de vitesse.
- Le châssis :
  - Cette pièce est à concevoir et dimensionner entièrement en vue de son industrialisation,
  - Etudier la réaction de cette pièce en dynamique et avec des sollicitations composées,
  - Optimiser sa forme afin de l'alléger au maximum tout en respectant les normes en vigueur.
- Le circuit hydraulique :
  - Choisir tous les éléments (distributeurs, clapets...) du circuit,
  - Intégrer tous les éléments et les conduites du circuit sur le bogie,
  - Faire une étude détaillée des pertes de charge et du rendement global,

- Pour toutes les pièces à fabriquer :
  - Etudier les aspects industrialisation et optimisation des formes pour gagner en masse,
  - Définir les procédés de fabrication.
- Pour le bogie complet : Cette première maquette fait déjà apparaître la possibilité d'embarquer des semi-remorques de 4.2m de hauteur et de pouvoir passer dans des tunnels au format GB+. Une garde au rail jusqu'à 70 mm en position basse semble envisageable mais cela reste encore faible, d'où la nécessité de bien étudier à l'avenir le comportement dynamique des suspensions afin de pouvoir juger de la validité de cette valeur. De plus le poids actuel des bogies dépasse largement les limites du cahier des charges initial (voir nomenclatures). Ce problème est d'autant plus important que la maquette numérique actuelle est loin de comporter l'ensemble des composants qui seront au final présent sur les bogies. Enfin il apparaît indispensable avant même d'entamer une conception fine des bogies et des autres parties de la rame d'étudier la stabilité de la rame pour valider son comportement dynamique à haute et basse vitesse dans les tunnels.

## 10. CONCLUSIONS DU PROJET

*L'objectif du projet était d'étudier la viabilité du concept R-shift-R.*

*La première partie des recherches a permis de confronter le concept à la demande et au marché et au travers d'un diagnostic de tirer des axes d'amélioration du concept.*

Ainsi, pour la plupart des acteurs rencontrés au cours du projet, une nouvelle solution de transport combiné, venant compléter les solutions actuelles, pourrait avoir sa place. Elle serait même attendue, bien que la technique Modalohr soit reconnue comme une excellente expérimentation. Sous couvert de sa viabilité, une alternative complémentaire française pourrait être R-shift-R dont les principaux atouts résident dans sa capacité potentielle à aller au delà des solutions actuelles par:

- Une gestion de rame proche de celle d'un TER voyageur permettant d'optimiser la gestion des sillons, et par conséquent de contribuer à l'amélioration de la compétitivité du fret ferroviaire,
- Sa compacité permettant de réduire les besoins de surface au sol des terminaux,
- L'évitement des coûts et délais associés aux travaux de mise au gabarit,
- La conception modulaire des terminaux pour une montée en charge progressive.

Au delà du caractère ambitieux de la technologie proposée et du fait qu'elle devra se confronter aux enjeux sécuritaires du transport ferroviaire, les acteurs rencontrés ont marqué leurs doutes sur la capacité de déployer un tel concept au sein de l'environnement ferroviaire actuel. La confrontation du concept R-shift-R aux diverses initiatives entreprises à travers des projets financés par la Commission Européenne a d'ailleurs mis en lumière l'ambition du projet R-shift-R de part sa globalité (nouveaux wagons, nouvelle rame, nouvelle motorisation, nouveaux moyens de manutention...). La plupart des projets se focalisent essentiellement sur la partie transbordement des contenants en minimisant les impacts sur l'infrastructure, ainsi que ceux résultant du mode d'exploitation ferroviaire.

Les approches de ces projets, certes plus accessibles (notamment dans le contexte ferroviaire actuel), ne prennent pas en compte l'impact des choix techniques sur :

- Les limitations induites d'optimisation de l'utilisation de l'infrastructure dans les conditions d'exploitation actuelles,
- Les coûts d'exploitation ferroviaire et surtout de la traction ferroviaire (sur lesquels les opérateurs du transport combiné n'ont aujourd'hui aucun levier alors que plus de la moitié du coût porte à porte est liée au tronçon ferroviaire),
- La vitesse commerciale pouvant être proposée par le service de ferroutage dans les conditions de traction et de circulation actuelle.

Les opérateurs de transport combiné historiques sont limités dans leur développement par des techniques d'exploitation qui contraignent leur rentabilité économique. Les nouvelles techniques d'autoroute ferroviaire continuent leur déploiement sans sortir des contraintes actuelles propres au transport combiné (la difficulté d'allocation des sillons dans une mixité voyageur/fret de part des vitesses limitées des trains de fret, l'aménagement des terminaux...).

*Sur la base de ce constat, le projet R-shift-R s'est penché sur la faisabilité technique d'un bogie à hauteur variable.*

Une solution technique, avec des vérins hydrauliques, a ainsi pu être validée et intégrée à l'architecture du bogie. De plus, la faisabilité de la motorisation autonome du wagon a également été validée. Les systèmes annexes du bogie tels que le freinage ou la fixation des balancelles ont aussi été étudiés et validés.

En clair, il n'apparaît pas pour l'instant de verrou technologique insurmontable, ce qui ne signifie pas pour autant que la conception fine à venir des bogies ne mette pas en évidence des points durs à résoudre.

Une maquette numérique architecturale existe en trois dimensions et montre une proposition d'architecture possible. Au final, le bogie présente des solutions techniques a priori réalisables pour l'ensemble des sous systèmes qui le composent.

Cependant, chacune de ces solutions nécessite d'être étudiée en profondeur car il reste encore de très nombreux points à détailler, qu'ils concernent la suspension, le freinage, le châssis, le circuit hydraulique ou la motorisation.

*La construction et l'évaluation des scénarios d'implémentation ont ensuite permis d'étudier la viabilité économique de la solution R-shift-R.*

Ainsi, l'ensemble des simulations réalisées met clairement en évidence l'existence de domaines de pertinence de RSR. En termes d'itinéraires, les liaisons de franchissement d'un obstacle naturel ou les axes de grand transit constituent des situations favorables sur lesquelles les gains de productivité attendus de la mise en œuvre du concept RSR pourraient se déployer. Les économies d'échelle produites par RSR sont très importantes lorsque le niveau de fréquence est élevé, mais dans de nombreuses simulations, le point mort du bilan est atteint pour des niveaux de fréquence comparables à ceux des services de ferroutage actuellement commercialisés, mais également subventionnés. Cela signifie que les performances potentielles de RSR apparaissent au moins équivalentes, voire supérieures aux systèmes existants.

Les simulations ont par ailleurs mis en lumière des incertitudes qui résultent de l'insuffisante connaissance de différents éléments de coût. En cela, la validation économique du concept RSR est en phase avec sa définition technique : à mesure que le dimensionnement des différents composants du système se précise, la connaissance des coûts s'affine. La poursuite du développement technologique de RSR permettra aussi d'avancer vers un bilan plus précis.

Les simulations ont aussi fait apparaître certains points critiques du système, comme l'importance des coûts fixes dans le bilan économique (induites par les investissements en gares), sans doute renforcée dans les simulations par le calcul des coûts de maintenance au prorata des coûts d'investissement.

Enfin, ces simulations ont permis de préciser quelques éléments clés du contexte extérieur qui conditionnent l'économie d'un service tel que RSR, comme la productivité du matériel roulant et la vitesse des sillons, ou encore le gabarit.

*Il s'est enfin agi de mettre en perspective les résultats, en étudiant les impacts liés au déploiement du concept, en comparant R-shift-R aux alternatives existantes, et en proposant des pilotes à mettre en œuvre et des suites d'étude à mener.*

Au préalable, des points critiques du concept (notamment identifiés par le comité de pilotage) ont été détaillés, qu'ils concernent les difficultés de conception bogie / gabarit, l'adéquation entre temps disponible en gare et fréquence des rames, les difficultés de structure (bridage de la remorque), les difficultés de fonctionnement (la rupture de charge entre modes et la gestion des flux conteneurs) ou encore les difficultés d'évaluation et de comparaison du concept RSR.

Sur la base des données de l'étude RAPL et en collaboration avec le projet Axefret, les impacts sur le fonctionnement de l'infrastructure ont été étudiés, ainsi que l'influence du mode d'exploitation sur les besoins humains et matériels, et les investissements ont été estimés dans le cas d'une ligne dédiée (ce qu'il s'est agi d'extrapoler sommairement au cas d'un réseau maillé). Même si sa pertinence semble faible, la comparaison aux alternatives existantes (nombre de quai et de rames, surface des gares) semble aussi valider la capacité du concept R-shift-R à être une solution effective.

La mise en œuvre d'un démonstrateur serait l'aboutissement du projet. Il pourra se structurer autour de l'investissement de différents acteurs industriels (e.g. Alstom, Mécacalac, Bertin, AREA...) et de financements publics à l'échelon national (bénéficiant du support d'un pôle de compétitivité et de l'ANR/PREDIT dans le cadre de la mise en œuvre d'un pilote) et/ou à l'échelle Européenne (le 7<sup>ème</sup> programme cadre de la DG RTD pourrait être mis à contribution pour le lancement d'un pilote d'envergure, et à terme, le programme Marco Polo pourrait être envisagé pour le lancement du service commercial). Différents scénarios ont ainsi été détaillés (a minima, médian avec intégration dans une structure existante, et spécifique, par création d'une rame complète), et la phase finale, cible du déploiement du concept R-shift-R, a été caractérisée : cette dernière étape permettra au travers de la multiplication des gares, de démontrer l'influence du temps d'arrêt en gare sur le rendement général de l'infrastructure et plus spécialement de son impact sur les résultats financiers de l'exploitation ferroviaire (nombre de rames nécessaires, charges transportées...); elle doit confirmer le principe de fonctionnement du ferroutage en mode « TER cadencée ». Avant cela, et si le projet R-shift-R a certes permis de valider un grand nombre de points technologiques et d'avancer sur les spécifications du concept, de nombreux points restent encore en suspend qui requièrent à eux seuls la mise en œuvre d'un programme spécifique. La capacité d'intégration de R-shift-R dans les chaînes de flux porte à porte reste à approfondir tant et si bien qu'elle est difficile à appréhender. L'équilibre des flux, la constitution de convoi, les aspects transmission des données, le suivi des marchandises, la réservation, l'implantation des terminaux sur le territoire, la remorque porte conteneur, l'équipement et le processus de manutention, l'intégration au processus portuaire...sont autant de points sur lesquels les acteurs du projet doivent avancer davantage. Il conviendra également de spécifier comment s'articule, dans les différentes configurations des réseaux, le fonctionnement des terminaux de transbordement et de saisir comment s'ordonneront, sans les révolutionner, les organisations logistiques. Il semble par ailleurs crucial de développer un outil de simulation d'un réseau maillé organisé autour du concept R-shift-R, et en plus d'une maquette et d'un démonstrateur 3D, des dossiers de communication et des argumentaires de la solution destinés à des acteurs décideurs (investisseurs). De même, si le projet R-shift-R a pu valider la faisabilité technique du concept R-shift-R (plus particulièrement celle d'un bogie à hauteur variable), de très nombreux points technologiques restent à étudier de façon poussée, concernant notamment la suspension (e.g. comportement dynamique), le freinage, la motorisation, le châssis, le circuit hydraulique, les aspects industrialisation et optimisation des formes, les procédés de fabrication, ou encore le comportement dynamique de la rame à haute et basse vitesse dans les tunnels.

Pour conclure, l'aboutissement de cette recherche marque la fin du développement du concept RSR « en laboratoire ». Il convient désormais de le confronter plus systématiquement à la réalité du monde des transports, en particulier du monde ferroviaire. Les prochains développements de RSR devront mieux intégrer les contraintes de l'exploitation ferroviaire. La confrontation est également nécessaire vis-à-vis des chargeurs, des transporteurs routiers, et de l'industrie ferroviaire, tant sur les coûts de production que sur la faisabilité technique et réglementaire des dispositifs technologiques proposés.

En parallèle, certains points critiques devront être levés. Notamment, l'abaissement des coûts fixes permettrait d'étendre le domaine de pertinence de RSR et faciliterait en particulier sa mise en œuvre dans le cadre d'un service à faible fréquence. Or, dans la perspective d'une concrétisation de cette innovation par une expérimentation en grandeur réelle, la possibilité d'un service à faible fréquence devient stratégique. Quelles que soient les potentialités « à plein régime » d'un système de ferroutage, les obstacles sur la route menant de l'innovation conceptuelle à la mise en œuvre concrète sont nombreux. Il doit pouvoir être testé pour un coût et un risque financier limité, donc dans le cadre d'un service léger.

Cependant, la possibilité de voir se concrétiser une innovation du type de RSR ne dépend pas que des qualités internes du concept proposé, ni uniquement des développements qui lui sont apportés. Elle est aussi largement déterminée par des conditions extérieures au système technique proposé.

La recherche d'une rotation maximale du matériel roulant est l'un des points de départ du concept RSR. Le concept R-shift-R s'inscrit dans les solutions de transport combiné, à la nuance près que les composants technologiques proposés visent à positionner la solution aussi bien dans une configuration classique, c'est-à-dire sur de longues distances (supérieur à 600 km), que dans une configuration maillée avec des terminaux plus rapprochés (200 à 300 km, voire moins), ce que l'on peut rapprocher du fonctionnement du TER voyageur (rotation rapide des rames en moins de 15 minutes, vitesse des trains de fret équivalente à celle des trains voyageurs). Cette recherche de productivité du matériel roulant a largement conduit la conception des gares RSR, conçues pour réduire au maximum les temps d'escale des trains. Elle est partie intégrante de l'économie du système qui peut ainsi compenser les investissements en gares. Mais cette mécanique ne peut fonctionner que si les temps de circulation des trains n'obèrent pas complètement les gains réalisés en gares.

Il en résulte que la possibilité de voir s'améliorer les performances économiques du fret ferroviaire repose aussi sur la vitesse permise par les sillons qu'on lui réserve. Le contexte de cadencement progressif du réseau entraîne une importante rigidification de l'agencement de la circulation des trains. Les choix qui sont actuellement opérés tendent à figer la vitesse commerciale effective des trains sur une longue période. Ils arbitrent aussi l'allocation de la capacité des infrastructures sans que l'intérêt collectif de services de fret à haute fréquence soit pris en compte avec la même attention que celui du renforcement des dessertes TER. Or, ces choix déterminent en partie les possibilités de progrès futurs du fret ferroviaire.

Par ailleurs, le gabarit B+ progressivement dégagé sur les lignes ferroviaires classiques ne permet de prendre en charge qu'une part restreinte du parc routier en circulation. Le dispositif de « monte-et-baisse » défini par le concept RSR permet de lever cette contrainte par l'abaissement des wagons lors du franchissement des ouvrages les plus coûteux à rehausser.

Les simulations économiques ont mis en évidence l'intérêt spécifique de ce dispositif pour rendre efficace des services sur lignes existantes, sans attendre la construction éventuelle de lignes nouvelles à grand gabarit. On peut ajouter que l'intérêt pour l'opérateur des services RSR que calculent les simulations se double d'un intérêt beaucoup plus important pour la collectivité si la nécessité de construire de nouvelles lignes ferroviaires, forcément coûteuses et traumatisantes pour les territoires traversés, diminuait.

L'approche économique qui a guidé les concepteurs s'articule autour du fait qu'un système de transport compétitif à la route repose entre autres sur le temps d'arrêt de la rame, la vitesse commerciale, la distance entre gares, la performance des transbordements, et la longueur du wagon. Autrement dit, l'approche du ferroutage par son mode de fonctionnement a des conséquences financières tout aussi importantes que la création d'une infrastructure nouvelle (l'un ne devant pas aller sans l'autre). Il faut prendre en considération les contraintes basses de gabarit qui sont particulièrement importantes puisque réparties sur l'ensemble du réseau. La reconfiguration du trajet entre Le Boulou (Perpignan) et Bettembourg (Luxembourg) en est un bon exemple, le coût de mise en conformité est de l'ordre de 150 M€ sur une dizaine d'années, mais chaque ligne doit être étudiée au cas par cas. La solution technologique de variation de hauteur du wagon R-shift-R pourrait permettre d'envisager un gain conséquent (en valeur et en temps) quant à l'évitement de travaux de mise au gabarit. Mais cette technologie, déployée à l'échelle d'une flotte, a aussi un coût...

Par ailleurs, la mise en œuvre du dispositif de « monte-et-baisse », s'il s'avère techniquement et financièrement viable, et plus globalement celle du concept R-shift-R, devront faire l'objet d'une certification. Cette étape indispensable est cruciale, non seulement parce qu'elle détermine la possibilité concrète de mise en œuvre, mais aussi parce qu'elle concentre le risque de développement que prendrait un industriel constructeur de matériel roulant qui miserait sur RSR. Il est donc essentiel que la puissance publique s'assure de la pertinence et de l'efficacité de la procédure de certification. Celle-ci doit garantir la sécurité et la compatibilité technique des trains mis en circulation (notamment avec nos voisins Européens dans le cadre du Trans European Network). Sans déroger à cette mission fondamentale, elle doit aussi se dégager des conservatismes et des rigidités réglementaires qui peuvent empêcher de voir déboucher des innovations pertinentes et originales et engager une dynamique de changement qui permettra au fret ferroviaire de recouvrer sa compétitivité.

## 11. RECOMMANDATIONS

Sur la base des résultats du projet, différentes recommandations peuvent être formulées concernant la poursuite du développement du concept R-shift-R :

1	Intégrer des opérateurs multimodaux à un niveau Européen
2	Approfondir les possibilités d'intégration d'industriels du secteur (e.g. Alstom, Siemens, AFR, Modalohr...) dans le projet R-shift-R
3	Détailler l'intégration de R-shift-R dans le fonctionnement d'un port
4	Finaliser les réflexions R-shift-R sur l'étude de faisabilité de son implantation sur le territoire (acceptabilité par la collectivité, modalités d'intégration avec les processus des transporteurs)
5	Engager une réflexion sur le processus d'homologation prenant en compte les spécificités de chaque pays Européen
6	Poursuivre les recherches sur les thématiques identifiées
7	Concevoir un support de communication « vendeur » et moins technique

## **ANNEXE 1: PANEL D'ENTREPRISES INTERVIEWEES**

Les entreprises et organisations interviewées ont été les suivantes :

- CATTANEO
- Modalohr
- Technicatome
- ICES
- Arbel Fauvet Rail
- Caterpillar
- ARKEMA
- Fret SNCF
- RFF
- Novatrans
- UIRR
- ADEME
- AUTF



*Rapport final*



## **ANNEXE 2: EXEMPLE DE QUESTIONNAIRE UTILISE**



## GUIDE D'ENTRETIEN CONSTRUCTEUR

### R-SHIFT-R

AVRIL 2007



Personne(s) rencontrée(s)	
Nom :	Fonction : Orga. prof. :

Questionnaire R-Shift-R

1/16



### Objectif de l'entretien

L'objectif principal de l'interview est d'évaluer avec vous le potentiel de développement d'un nouveau concept de ferroutage: **R-Shift-R**. Dans le même temps, vos réactions permettront de mieux appréhender le besoin des différents acteurs pour affiner les spécifications de la solution.

Ce guide d'entretien a pour objectif de proposer un fil conducteur. Il reprend les points principaux qui seront abordés. Sur la base des informations fournies, une analyse sera effectuée dont les résultats vous seront communiqués pour validation. La durée d'un entretien est estimée à 1 heure 30 min ~ 2 h.

### Thèmes abordés lors de l'entretien

#### L'entreprise et son activité

Identification de l'entreprise

Activités

Historique et perspectives de développement

Organisation décisionnelle en matière de recherches, de propositions et de réalisations

#### Présentation du concept R-Shift-R

Des enjeux à une architecture de rupture

Technologies

Votre réaction

#### Les attentes

Souhaits concernant un service de ferroutage

Retour d'expérience

Questionnaire R-Shift-R

2/16



## L'entreprise et son activité

### Identification de l'entreprise

Nom de l'entreprise : .....

Branche d'activité : .....

Effectif : .....

Nombre de sites de production : .....

### Activité

#### Les produits

Quels sont les produits que vous fabriquez ?

.....  
 .....  
 .....

Stratégie commerciale :  
 - activité mono-produit ?  
 - multi-produits ?

Ces produits transformés ont-ils des spécificités, des contraintes propres

.....  
 .....  
 .....

- durée de vie ?  
 - valeur ?  
 - délai ?



Les marchés

CA de l'an passé : .....

Stratégie développement :  
– import/export ?  
– organique/fusion ?

Evolution des trois années précédentes : .....

Perspectives à moyen terme : .....

Quels sont vos principaux canaux commerciaux ? .....

Quels sont vos rapports avec vos fournisseurs, vos clients ? .....



## Historique et perspectives de développement

### Historique

Création, fusion, rachat  
Situation de croissance, de développement,  
de stabilisation des marchés...

.....  
.....  
.....

### Axes stratégiques

Quelles sont vos ambitions comme fournisseur de matériels ferroviaires ?  
Plus spécialement pour le ferroutage.

.....  
.....

Un nouveau concept de ferroutage a-t-il sa place ?  
Peut-il être franco – français dans sa définition, sa normalisation et son développement territorial ?

.....  
.....

Tendances observées :
- Codéveloppement
- Coproductions
- Marché partagé



Comment envisagez-vous le développement de nouveaux produits ?

Développement seul ?

.....

Codéveloppement ?

.....

Coproductions ?

.....

Marché partagé ?

.....

Peut-on envisager le développement d'un même concept par plusieurs producteurs qui garantirait :

Interchangeabilité opérationnelle pour les utilisateurs ?

Indépendance technologique pour les fabricants ?

.....

.....

Souhaitez-vous maîtriser les droits (techniques) de vos productions ; quitte à les négocier avec des partenaires ?

.....

.....



## Organisation décisionnelle de l'entreprise

Votre attente de développement en matière de transport des marchandises ?

.....  
.....

Quel est pour vous le rôle des Etats dans vos prises de décisions de recherche ?

.....  
.....

Quel est pour vous le critère le plus déterminant pour le choix d'un système de transport de ferroutage ?

.....  
.....

Votre Société a-t-elle une réflexion sur l'externalisation de la logistique par les grands donneurs d'ordres ?

.....  
.....

En quoi cette réflexion influence-t-elle vos actions ?

.....  
.....



Contacts susceptibles d'être pris par TL&A avec les prestataires de services ?

.....

Contacts susceptibles d'être pris par TL&A avec des fournisseurs de sous-ensembles ?

.....

Autres contacts à prendre ?

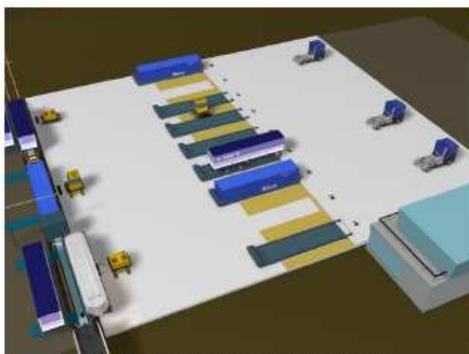
.....



## Présentation du concept R-SHIFT-R

### Des enjeux à une architecture de rupture

Véritable innovation de rupture, le concept R-SHIFT-R propose une solution de ferroutage compétitive et fiable qui permet de gagner la confiance des chargeurs et des opérateurs et offre aux constructeurs une perspective de marché, tout en s'inscrivant dans une démarche de développement durable.



Vue d'ensemble du concept R-SHIFT-R

Une animation illustrant l'un des fonctionnements possibles de la solution est disponible à l'adresse suivante : <http://www.r-shift-r.com>



D'une manière générale, le concept R-SHIFT-R met en œuvre une architecture de rupture qui permet de répondre aux enjeux du fret ferroviaire :



Le concept R-SHIFT-R présente les caractéristiques suivantes :

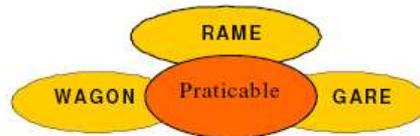
- Un même type de wagon susceptible d'embarquer tous les conditionnements utilisés à ce jour par le mode routier.
- Un tarif comparable à la route et qui laisse en plus une marge de manœuvre financière.
- Une motorisation qui s'adapte : en adhérence et en consommation au profil des voies (passage des cols de montagne)
- Un maillage des gares proches des centres de production et de consommation pour permettre la massification du couple demandes/offres
- Une extension géographique vers des zones moins denses tout en restant compétitif
- Une rotation rapide des rames grâce à la désynchronisation des opérations de chargement/déchargement et d'embarquement/débarquement qui limite le temps d'arrêt en gare
- Un pilotage des flux de contenants sur gare afin de maîtriser les temps d'immobilisation des tractions routières
- Une optimisation de l'infrastructure par le biais de l'automatisation des manutentions



## Technologies

Les leviers de la rupture envisagée sont essentiellement technologiques :

- Un wagon monobloc sans châssis démontable pourvu d'un plateau amovible (praticable) sur lequel est déposé le contenant.
- Un système de préhension et de manutention en gare de ce plateau, automatisé, assurant les déplacements en gare depuis/vers des travées de chargement/déchargement route vers/depuis des emplacements rames prés affectés.
- Une propulsion répartie sur chaque wagon.



### Wagon :

La conception du wagon répond aux objectifs suivants :

- Gravier des pentes de 3,5%,
- Utiliser le réseau existant (entre autres les tunnels) avec des remorques de 4,1 m de hauteur,
- Maximiser le nombre de wagons par rame,

### Rame :

Une rame permet l'incorporation de 46 wagons.

La puissance répartie permet :

- D'améliorer l'adhérence aux rails
- D'utiliser l'espace des motrices pour mettre des wagons
- L'affectation exclusive de la traction au service R-SHIFT-R
- De fiabiliser la propulsion via la redondance



**Gare :**

Une gare se décompose en zones ayant leur fonctionnement propre (organisation, équipement, automatisation...), plus ou moins automatisé ; leurs gestions peuvent-être confiés à des structures différenciées,

- Zone routière
- Zone d'embarquement/débarquement
- Zone de chargement/déchargement



## Votre réaction

Quel est votre avis général sur la pertinence et la faisabilité du concept ?

.....  
.....

Quels freins pouvez-vous identifier pour son constructeur ?

.....  
.....

Quels freins pouvez-vous identifier à son utilisation par les chargeurs ou par les transporteurs ?

.....  
.....

Quelle réactivité peut avoir votre société devant un tel marché potentiel en terme de :

Délai de réponse : .....

Délai mise en œuvre : .....

.....

Seriez vous prêt à participer au capital de la société exploitante de R-SHIFT-R ?

.....  
.....



Pouvez-vous qualifier l'importance de chacun des éléments constitutifs de la solution ?

QUALIFICATION	Sur 10
- utilisation de praticables	
- traction répartie	
- automatisation de la zone chargement/déchargement	
- découplage des opérations de chargement/déchargement des opérations embarquement/débarquement	
- la rapidité des opérations de chargement/déchargement	
- la vitesse des rames	
- le maillage des gares	
- l'absence d'interopérabilité des tractions	
- la possibilité de charger ou pas les chauffeurs	
- la possibilité de charger des conteneurs de 20, 40, 45 pieds, ainsi que des remorques sur le même wagon	
- la charge à l'essieu limité à 25 tonnes	

NOTA : l'embarquement/débarquement consiste à mettre/enlever le conditionnement sur/du le praticable, le chargement/déchargement consiste à mettre/enlever le praticable sur/du le wagon.



## Les attentes

### Souhait concernant un service de ferroutage

Sur le plan des principes êtes-vous satisfaits des systèmes de ferroutage actuels ?

.....  
.....  
.....

Seriez-vous intéressé par une avancé dans ce type de service donc par un développement :

.....  
.....

Quel niveau de service (nombre de départs hebdomadaires, quotidiens et sens) vous paraît-il être nécessaire pour :

Intéresser des fournisseurs de matériels

.....

Intéresser des utilisateurs

.....  
.....

Quels types d'engagements vous paraissent nécessaires de la part :

- des Etats : .....
- des décisionnels : .....
- des accès aux infrastructures : .....

.....  
.....  
.....  
.....



**Mesures d'accompagnement réglementaires**

Evolution de la réglementation sur :

La charge à l'essieu : .....

La charge routière transportable : .....

**Retour d'expérience ferroutage**

Quelles expériences ?

.....

Effets attendus en termes d'image par un engagement dans le multimodal ?

.....

Les impacts en terme d'organisation ?

.....

Les coûts du changement ?

.....

Les causes d'échecs possibles ?

.....

TL&A VOUS REMERCIE POUR VOTRE COLLABORATION

## ANNEXE 3: BIBLIOGRAPHIE

### ANNEXE 3.1: RAPPORTS ET ETUDES EXISTANTS

- Projet Européen ITIP Innovative Technologies for Inter-modal Transfer Points – State of the art of conventional and innovative techniques in intermodal transport Annexe 1 – Survey on Intermodal transfer technologies
- Projet Européen INHOTRA Interoperable Intermodal Horizontal – annexes l'état de l'art des solutions roll-on-roll-off
- Transhipment -Expertise indépendante concernant le projet ferroviaire Bordeaux – Espagne, Rapport technique, CNDP Commission Nationale du Débat Public, SMA et Associés / PROTRANS, décembre 2006
- Etude Atlantique ECO FRET II, Rapport final, NESTEAR Nouveaux Espaces de Transport en Europe Application et recherche, août 2005
- Etude de marché de l'autoroute ferroviaire Modalohr (transmanche, autres axes que transalpin, vallée du Rhône-Saône), ACT Consultants, novembre 2002 Consultants
- Éléments de définition du système d'exploitation de l'autoroute ferroviaire (Alpes) sur le réseau existant, SIGMA Conseil, décembre 2003
- Etude de faisabilité d'une ligne d'intérêt général de transport maritime à courte distance entre un port de la façade atlantique et un port du Nord de l'Espagne, Ministère des Transports (Direction du Transport Maritime, des Ports et du Littoral), juin 2004
- Projet d'autoroute ferroviaire sur l'axe Espagne – Italie, Association Route Roulante / TL & Associés, Novembre 2006
- Projet d'autoroute ferroviaire sur l'axe atlantique - Etude citernes / gabarit P30C30, RFF / TL & Associés, septembre 2006 et Etude gabarit B1, Association Route Roulante / TL & Associés, avril 2007
- Pour un produit haut de gamme « Express – Messagerie – Groupage Lourd » en transport combiné rail-route ? Enquête de sensibilité auprès des professionnels du transport, ADEME / GNTC / GETC, janvier 2006
- Projet SAGA – PREDIT – Phase 1 Etat des lieux
- Projet ADEME Ferroviaire – ADEME – Phase 1 Etat des lieux
- Rapport sur le transport combiné, CNT, mars 2005
- Tableau de bord des transports combinés, ADEME / AJI-Europe, Octobre 2006
- Document AFR Wagon Arbel Chargement
- Route Automatisé Poids Lourds – Partie 3 Economie du projet RAPL - Juin 2004
- Innovative Transportation Technologies – an Alternative for Providing Linkages Between Port Terminals and Inland Freight Distribution Facilities - Branislav Dimitrijevic,

- Documents des concepteurs R-shift-R. Alain Margery – Jean Pierre Demouslin

### **ANNEXE 3.2: SITES INTERNET CONSULTES**

- [www.bravo-project.com](http://www.bravo-project.com)
- [www.trend-project.com](http://www.trend-project.com)
- [www.uic.asso.fr/diomis](http://www.uic.asso.fr/diomis)
- [www.cream-project.eu](http://www.cream-project.eu)
- [www.rff.fr](http://www.rff.fr)

### **ANNEXE 3.3: BASES DE DONNEES ETUDIEES**

Base SITRAM, 2005 (France <> France, France <> Europe)

Enquête Transit, 2004 (franchissement des Alpes et des Pyrénées)

## ANNEXE 4: DETAIL DES FLUX ROUTIERS

### ANNEXE 4.1 : MATRICES O/D FRANCE-FRANCE (INTER REGIONS)

(trajets / jour)	DESTINATION FLUX																	Total					
	Alsace	Aquitaine	Auvergne	Basse-Normandie	Bourgogne	Bretagne	Centre	Champagne-Ardenne	Franche-Comté	Haute Normandie	Ile-de-France	Languedoc-Roussillon	Limousin	Lorraine	Midi-Pyrénées	Nord-Pas-de-Calais	Pays-de-la-Loire		Picardie	Poitou-Charentes	Provence-Alpes-Côte d'Azur	Rhône-Alpes	
ORIGINE FLUX																							
Alsace		40	33	38	165	30	88	185	453	60	374	27	14		37	120	78	64	44	78	240	2169	
Aquitaine	28		85	63	47	101	258	48	23	106	296	124	380	42	1252	77	274	68	559	158	173	4161	
Auvergne	41	86		21	226	31	203	23	37	42	154	101	163	42	266	43	76	18	54	159	743	2529	
Basse-Normandie	32	38	19		43		260	46	22		397	8	3	38	19	124	545	99	54	32	85	1862	
Bourgogne	169	56	291	61		92	476	340		124	618	73	37	176	68	117	121	99	38	150		3106	
Bretagne	26	83	38		63		195	66	25	231	391	38	31	65	54	122		94	164	57	161	1905	
Centre	65	336	278	272	570	340		162	95	445		65	222	139	122	296	843	227	377	126	388	5367	
Champagne-Ardenne	162	46	45	57	447	84	130		168	96		30	19		35	338	125	522	20	66	204	2593	
Franche-Comté	391	34	39	28		28	53	184		47	231	21	18	197	23	83	51	45	52	45	491	2062	
Haute Normandie	66	107	53		139	328	552	115	25			13	25	70	55	327	374		86	53	158	2544	
Ile-de-France	329	301	117	329	613	414			218			157	73	490	173	946	703		215	307	651	6037	
Languedoc-Roussillon	22	129	77	19	77	40	45	17	13	29	156		36	20	793	63	65	19	46		537	2202	
Limousin	9	315	206	9	42	14	142	18	11	24	77	18		25	229	26	66	31		28	117	1405	
Lorraine		71	33	42	191	91	111		252	82	517	27	23		35	263	121	174	53	64	271	2418	
Midi-Pyrénées	20	947	151	10	35	34	89	27	28	21	200	719	219	52		31	97	37	103	266	155	3243	
Nord-Pas-de-Calais	125	82	42	116	149	164	283	481	90	415	1160	50	25	274	55		269		67	89	362	4297	
Pays-de-la-Loire	79	275	90	615	125		929	121	61	364	957	93	110	88	107	263		205	1198	104	301	6085	
Picardie	181	91	39	171	104	140	251	492	131			18	30	149	33		262		57	56	189	2394	
Poitou-Charentes	30	979	53	51	47	232	475	23	21	86	215	69		33	164	53	1189	48		63	103	3935	
Provence-Alpes-Côte d'Azur	58	167	101	14	128	38	82	35	34	38	238		18	54	298	46	80	28	51		1722	3229	
Rhône-Alpes	209	177	881	71		169	359	176	525	180	779	619	106	219	242	291	304	159	116	1608		7190	
Total	2043	4360	2671	1985	3209	2371	4980	2558	2232	2391	6758	2267	1553	2172	4059	3629	5641	1940	3354	3509	7051	70733	

### ANNEXE 4.2 : MATRICES O/D FRANCE-ITA / ESP - PT (ECHANGES)

(trajets / jour)	DESTINATION FLUX																	ITA	PORT	Total							
	ESP		France																								
	BIRIATOU	La Perthus	Alsace	Aquitaine	Auvergne	Basse-Normandie	Bourgogne	Bretagne	Centre	Champagne-Ardenne	Franche-Comté	Haute Normandie	Ile-de-France	Languedoc-Roussillon	Limousin	Lorraine	Midi-Pyrénées				Nord-Pas-De-Calais	Pays de la Loire	Picardie	Poitou-Charentes	Provence-Alpes-Côte d'Azur	Rhône-Alpes	
ORIGINE FLUX																											
ESP BIRIATOU																											
ESP Le Perthus																											
FR Alsace	36	38																									
FR Aquitaine																											
FR Auvergne	11	20																									
FR Basse-Normandie	20	8																									
FR Bourgogne	28	24																									
FR Bretagne	52	16																									
FR Centre	51	29																									
FR Champagne-Ardenne	32	38																									
FR Corse																											
FR Franche-Comté	20	16																									
FR Haute Normandie	56	26																									
FR Ile-de-France	97	53																									
FR Languedoc-Roussillon																											
FR Limousin	23	10																									
FR Lorraine	57	49																									
FR Midi-Pyrénées																											
FR Nord-Pas-De-Calais	132	65																									
FR Pays de la Loire	96	19																									
FR Picardie	48	43																									
FR Poitou-Charentes	66	17																									
FR Provence-Alpes-Côte d'Azur	29	179																									
FR Rhône-Alpes	38	206																									
ITAL PFE IT			13	67	43	13	66	45	95	43	33	45	249	51	18	40	47	88	90	47	31	207	301		1631		
PORT BIRIATOU			11		0		5	8	17	2	3	10	50		4	9		21	19	7	6	8	16		195		
PORT Le Perthus							1															22	6		30		
Total	893	856	75	67	79	52	129	129	205	74	86	105	559	51	29	116	47	219	249	98	119	461	588	1631	213	12	7141

ANNEXE 4.3 : MATRICES O/D FRANCE > AUTRES PAYS (ECHANGES)

(trajets / jour)	DESTINATIONS FLUX																						
	ALLEMAGNE	BELGIQUE	LUXEMBOURG	PAYS-BAS	AUTRICHE	HONGRIE	POLOGNE	SLOVAQUIE	SLOVENIE	TCHÈQUE RÉPUBLIQUE	ESTONIE	LETTONIE	LITUANIE	CHYPRE	GRÈCE	MALTE	DANEMARK	FINLANDE	SUÈDE	IRLANDE	ROYAUME-UNI	TOTAL	
ORIGINES FLUX																							
Alsace		102	48	98	31	5	28	4	1	14	1	1	1	0	4	0	13	10	10	4	83	459	
Aquitaine	89	42	1	33	4	4	5	0	1	2	0	1	0	0	3	0	4	2	5	35	249	480	
Auvergne	29	17	4	9	2	1	4	0	0	2	0	0	0	0	2	0	1	0	4	1	34	111	
Basse-Normandie	33	67	3	13	1	0	2	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	0	2	1	26	154	
Bourgogne	83	56	2	26	3	1	7	2	1	3	0	0	0	0	3	0	3	2	4	2	44	243	
Bretagne	65	113	6	31	4	5	7	2	0	4	0	0	0	0	15	0	7	1	5	9	65	341	
Centre	98	92	4	45	7	4	11	1	1	3	0	0	0	0	3	0	3	2	4	7	83	371	
Champagne-Ardenne	200	333	20	103	5	4	10	2	0	5	0	1	0	0	3	0	7	2	8	3	47	755	
Franche-Comté	64	51	1	23	11	1	3	1	0	2	0	0	0	0	1	0	3	1	3	1	17	184	
Haute Normandie	168	192	4	110	12	6	18	3	1	9	0	0	1	0	8	0	6	8	12	67	645	1271	
Île-de-France	205	314	25	90	12	5	19	3	2	10	0	1	1	0	5	0	5	3	7	14	153	874	
Languedoc-roussillon	60	24	1	20	3	2	5	0	0	4	0	0	0	1	2	0	3	1	3	1	29	160	
Limousin	15	6	1	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	11	46	
Lorraine		288	371	83	21	10	23	3	2	22	0	0	1	0	4	0	6	2	13	2	85	938	
Midi-Pyrénées	31	16	1	13	2	1	3	0	1	1	0	0	0	0	2	0	2	1	1	2	18	94	
Nord-Pas-De-Calais	436				20	10	43	5	5	29	2	1	3	1	21	1	33	27	30	87		754	
Pays de la Loire	96	58	2	37	5	3	6	1	1	4	0	0	1	0	10	0	7	1	9	49	216	506	
Picardie	237				17	6	21	2	2	8	1	1	1	0	10	0	14	9	15		135	478	
Poitou-Charentes	25	18	0	17	2	1	1	1	0	3	0	0	0	0	5	0	2	1	1	20	50	147	
Provence-Alpes-Côte d'Azur	132	64	8	30	6	3	11	1	1	4	0	0	0	1	2	0	5	2	6	10	138	426	
Rhône-Alpes	277	94	12	47	20	7	24	6	4	12	1	0	1	0	9	0	10	8	12	4	117	667	
TOTAL	2343	1946	514	832	189	80	254	38	27	142	8	7	14	5	117	2	138	84	155	321	2244	9459	

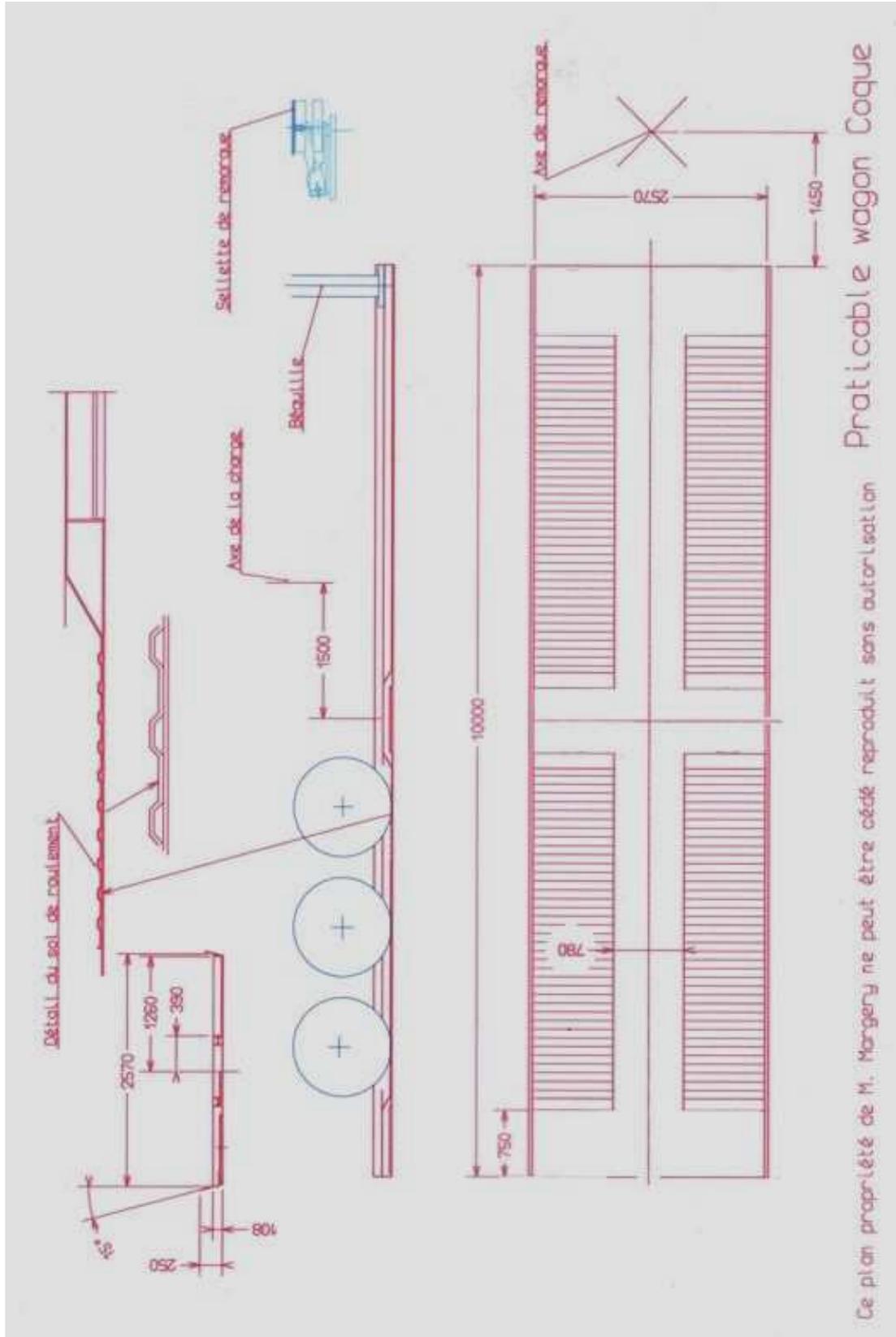
ANNEXE 4.4 : MATRICES O/D AUTRES PAYS - FRANCE (ECHANGES)

(trajets / jour)	DESTINATION DES FLUX																					
	Alsace	Aquitaine	Auvergne	Basse-Normandie	Bourgogne	Bretagne	Centre	Champagne-Ardenne	Franche-Comté	Haute Normandie	Île-de-France	Languedoc-roussillon	Limousin	Lorraine	Midi-Pyrénées	Nord-Pas-De-Calais	Pays de la Loire	Picardie	Poitou-Charentes	Provence-Alpes-Côte d'Azur	Rhône-Alpes	Total
ALLEMAGNE		62	49	47	111	60	152	142	100	137	605	39	15		46	376	116	237	37	76	313	2720
BELGIQUE	146	47	37	45	77	72	102	290	65	267	824	37	11	224	29	111	224	29	33	54	173	2644
LUXEMBOURG	19	4	1	4	7	3	3	25	4	3	23	2	0	92	3		7		1	7	18	228
PAYS-BAS	80	56	17	21	42	46	66	74	17	326	205	10	8	68	15		70		24	38	92	1276
AUTRICHE	34	4	3	3	5	1	11	4	11	3	38	2	0	15	2	24	9	21	4	6	21	219
HONGRIE	4	2	3	1	2	2	13	2	1	8	16	1	0	4	1	5	3	5	3	2	7	84
POLOGNE	12	5	4	4	6	6	12	5	3	7	35	3	3	31	9	30	14	31	4	6	25	254
SLOVAQUIE	3	1	1	0	1	1	3	2	2	1	10	0	0	4	0	3	7	10	3	1	8	60
SLOVENIE	1	0	0	0	1	0	1	3	1	2	3	0	0	4	0	1	1	2	1	0	11	33
TCHÈQUE, RÉPUBLIQUE	14	1	2	3	3	2	5	6	4	5	21	2	0	13	1	14	5	6	5	1	17	131
ESTONIE	0	3	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	2	0	1	0	0	3	15
LETTONIE	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	12
LITUANIE	2	0	0	0	0	1	1	7	0	5	1	0	0	8	0	9	2	6	0	0	1	44
CHYPRE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
GRÈCE	1	1	0	0	1	1	1	3	0	1	8	0	0	1	1	2	2	1	0	1	2	27
MALTE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
DANEMARK	4	2	1	2	1	5	5	2	1	3	21	1	0	5	1	20	4	8	2	3	12	103
FINLANDE	14	12	1	6	3	6	15	4	2	6	44	1	2	13	3	26	7	8	6	2	18	199
SUÈDE	13	6	4	4	19	13	13	7	2	7	43	1	5	9	3	21	24	18	6	4	39	261
IRLANDE	3	10	1	2	1	7	5	1	1	3	18	1	0	1	1	16	3		1	7	9	91
ROYAUME-UNI	54	80	11	14	17	85	34	21	9	849	244	16	3	60	4		227	84	63	139	67	2083
TOTAL	406	295	137	160	298	310	443	600	225	1631	2161	113	49	555	121	549	613	438	195	348	839	10485

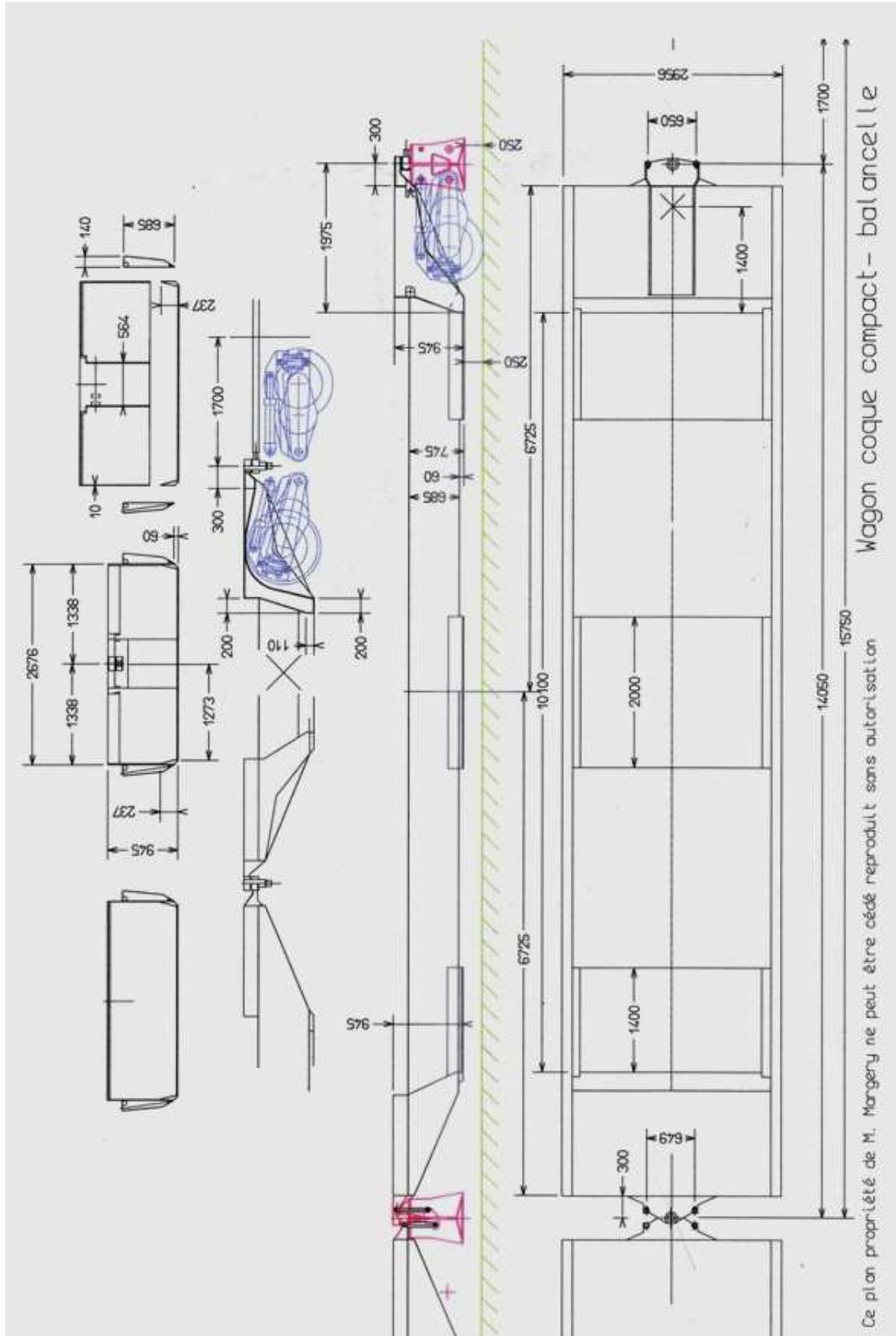
ANNEXE 4.5 : MATRICE O/D TRANSIT (TRAVERSEE DE LA FRANCE)

(trajets / jour)	DESTINATION DU FLUX																			Autres pays	Total									
	ALLEMAGNE	BELGIQUE	LUXEMBOURG	PAYS-BAS	AUTRICHE	HONGRIE	POLOGNE	SLOVAQUIE	SLOVÉNIE	TCHÈQUE, RÉPUBLIQUE	ESTONIE	LETTONIE	LITUANIE	GRÈCE	ITALIE	SUISSE	ESPAGNE - Biriadou	ESPAGNE - Le Perthus	PORTUGAL - Biriadou			PORTUGAL - Le Perthus	DANEMARK	FINLANDE	NORVÈGE	SUÈDE	IRLANDE	ROYAUME-UNI		
ALLEMAGNE															23		312	714	145	9									4	1208
BELGIQUE														2	168		219	140	61											589
LUXEMBOURG															20		8	14	2											45
PAYS-BAS														3	64		230	169	55										2	524
AUTRICHE																13	41	9	1											65
HONGRIE																2	17		2											21
POLOGNE																	23	50	7								2			82
SLOVAQUIE																3	20	1												24
SLOVÉNIE																		5		1										6
TCHÈQUE, RÉPUBLIQUE																	13	50												63
ESTONIE																		2												2
LETTONIE																		8												8
LITUANIE																		20												20
GRÈCE																		7		3										14
ITALIE	20	107	21	34									2			34	339	18	45	1				1	25	242	2		892	
SUISSE																														0
ESPAGNE - Biriadou	305	94	7	126	13	2	12	1	1	12		1	5		69	8					11	1	0	7	8	236	10	928		
ESPAGNE - Le Perthus	663	91	10	124	34	23	77	29	14	67	4	1	17	14	293	52					29	8	10	27	3	111	62	1761		
PORTUGAL - Biriadou	173	23	3	41	3	3	2	1		4					18						1	1			4	1	41		320	
PORTUGAL - Le Perthus	1				1	1				1	1			1	29														1	36
DANEMARK															1		11	16	2											30
FINLANDE															1		1	5	2											8
NORVÈGE															1		0	2	2											5
SUÈDE															1		9	17	0											28
IRLANDE														0	21		14	6		0									1	41
ROYAUME-UNI														2	154		131	92	34										3	416
Autres pays																		3		1										64
Total	1163	319	41	327	51	29	91	31	17	84	4	2	24	21	863	60	1025	1775	339	65	42	9	11	39	37	649	87	7203		

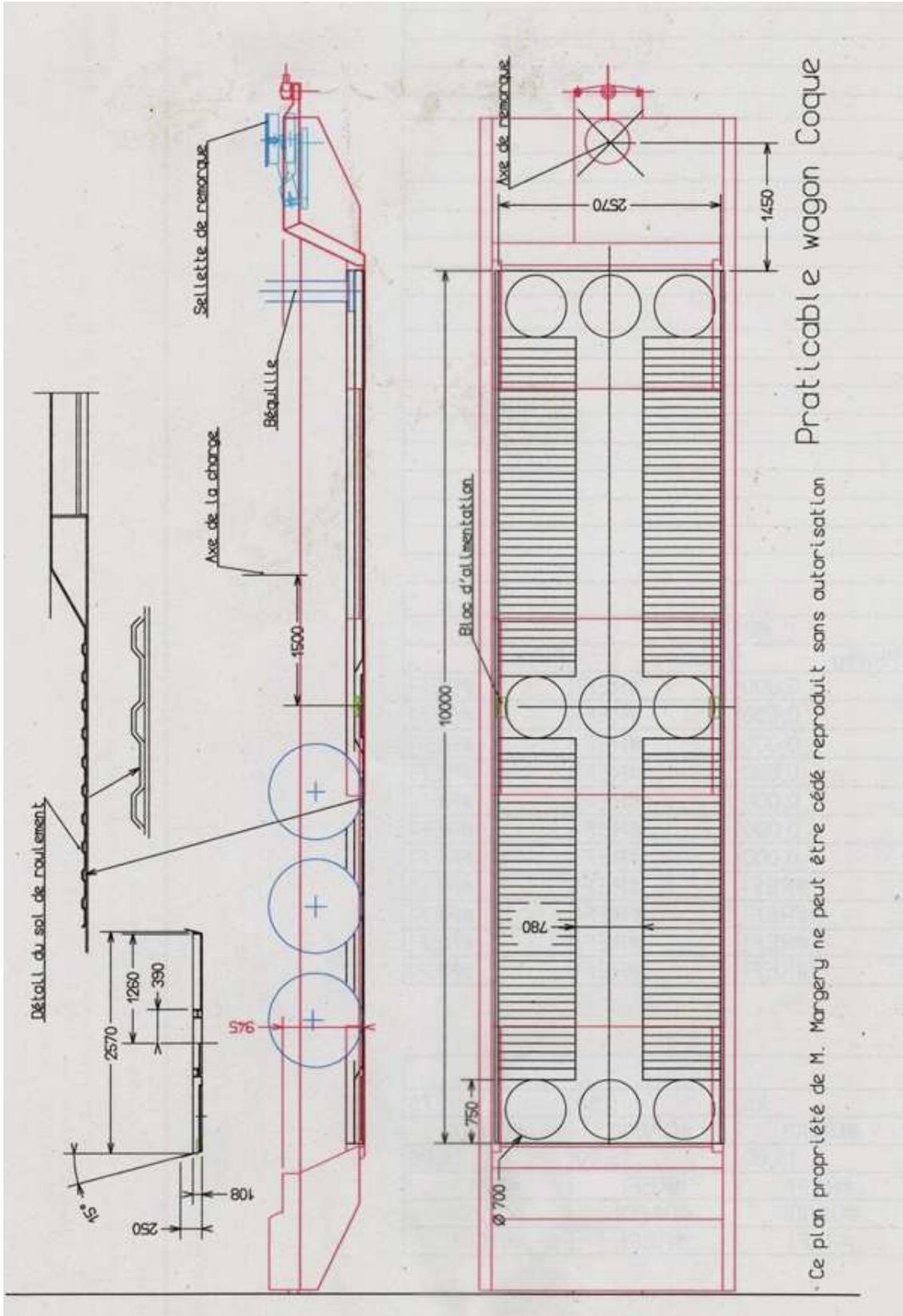
## ANNEXE 5 : PLAN DU PRATICABLE



## ANNEXE 6 : PLAN DE LA BALANCELLE



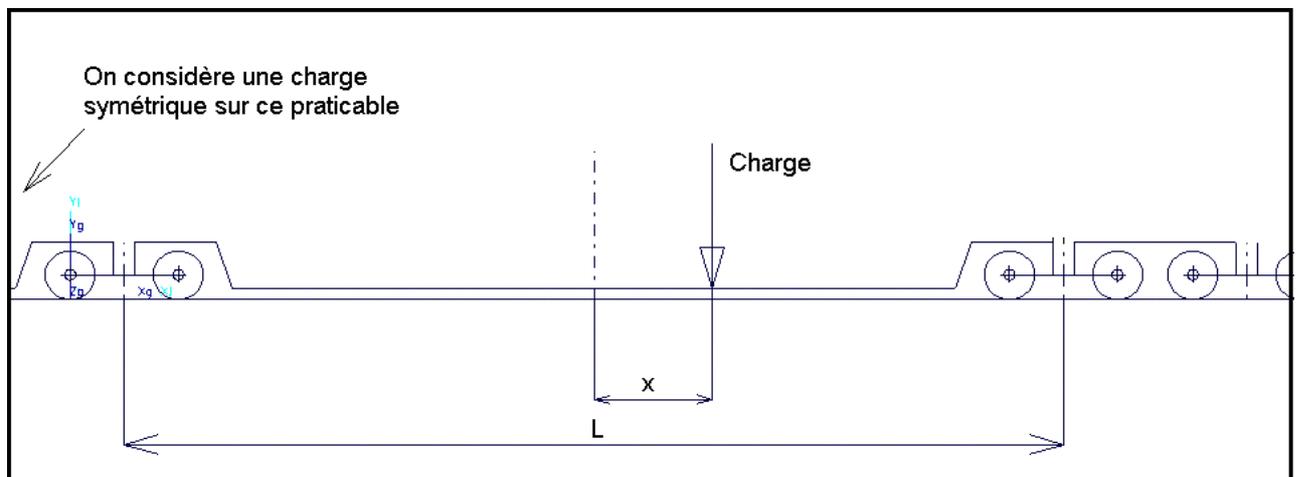
## ANNEXE 7 : PLAN DU PRATICABLE DANS LA BALANCELLE



## ANNEXE 8 : ETUDE DETAILLEE DES CHARGES UTILES

La structure retenue est une structure de type wagon double avec un bogie commun aux deux praticables au centre. Il est utile d'examiner la charge utile en fonction de la charge à l'essieu d'une part, et de l'excentration de cette même charge sur la balancelle. En effet, dans le cas où le chargement serait une semi-remorque, celle-ci est montée en étant décalée vers le bogie externe du wagon double. Par contre, si le chargement est constitué d'un conteneur, celui-ci sera monté plutôt de façon centrée.

### Hypothèses de calcul :



On considère une balancelle ayant un bogie commun à une extrémité avec la balancelle suivante et un bogie seul à l'autre extrémité.

Le point d'application de la charge d'un praticable est centré au milieu de chaque bogie par rapport au plan de symétrie longitudinal.

La charge utile s'applique en un point situé à une distance  $x$  du milieu du praticable et est toujours appliquée du côté du bogie double. Cela implique un sens imposé pour la mise en place d'une semi-remorque, afin de décaler la charge du côté des deux bogies assemblés et ainsi de décharger au maximum l'autre bogie (qui est le bogie motorisé).

Les valeurs numériques suivantes ont été choisies ou sont imposées par le cahier des charges :

- $L = 14,05$  m
- Empattement d'un bogie : emp = 2 m
- Masse de l'ensemble praticable + balancelle à vide : 8 Tonnes
- Masse du bogie central: 7 Tonnes
- Masse du bogie extrême : 7 Tonnes

*Remarque :* Les masses des bogies et praticable sont celles du cahier des charges des porteurs du projet. Il convient de prendre les résultats ci-après en tenant compte de cette donnée. En effet, la conception fine des bogies notamment ainsi que l'intégration des composants annexes conduira probablement à un alourdissement des masses de ces derniers.

Calcul de la charge par essieu à vide :

a. Bogie motorisé :

Le bogie motorisé étant le bogie central du wagon double, il reçoit la charge de "deux demi praticables" ainsi que la charge due à son propre poids :

$$C_{bogie} = 2 \times \left(\frac{1}{2} m_{praticable}\right) + m_{bogie} = 15T$$

Comme le chargement est symétrique alors la charge à vide par essieu est :

$$C_{essieu\_vide} = \frac{1}{2} C_{bogie} = 7.5T$$

b. Bogie freiné

Ce bogie reçoit à vide la charge due à "un demi praticable" ainsi que celle due à son propre poids :

$$C_{bogie} = \frac{1}{2} m_{praticable} + m_{bogie} = 11T$$

Comme le chargement est symétrique alors la charge à vide par essieu est :

$$C_{essieu\_vide} = \frac{1}{2} C_{bogie} = 5.5T$$

Application d'une charge sur le praticable :

On applique une charge ponctuelle F sur le praticable. Le point d'application de cette charge peut varier entre le milieu du praticable (pour un conteneur) et l'extrémité de ce dernier du côté du bogie freiné (pour une semi-remorque) (voir schéma précédant). Il est en effet plus judicieux de placer le point d'application de la charge du côté du bogie externe car celui-ci ne supporte que la charge d'un seul praticable alors que le bogie central supporte la charge des deux praticables l'entourant.

a. Bogie central :

On considère qu'une charge s'applique sur le praticable décalé de x ; cela correspond à la situation la plus défavorable.

Portion de la charge utile sur le bogie central :

$$C_{bogie} = \left(0.5 - \frac{x}{L}\right) F$$

En supposant un chargement identique sur l'autre la charge totale par essieu est :

$$C_{essieu} = \frac{1}{2} * 2 * \left(\left(0.5 - \frac{x}{L}\right) F\right) + C_{essieu\_vide}$$

b. Bogie externe :

Portion de la charge utile sur le bogie :

$$C_{bogie} = \left(\frac{x}{L} + 0.5\right) F$$

Charge totale appliquée sur l'essieu :

$$C_{essieu} = \left( \frac{x}{L} + 0.5 \right) * \frac{1}{2} * F + C_{essieu\_vide}$$

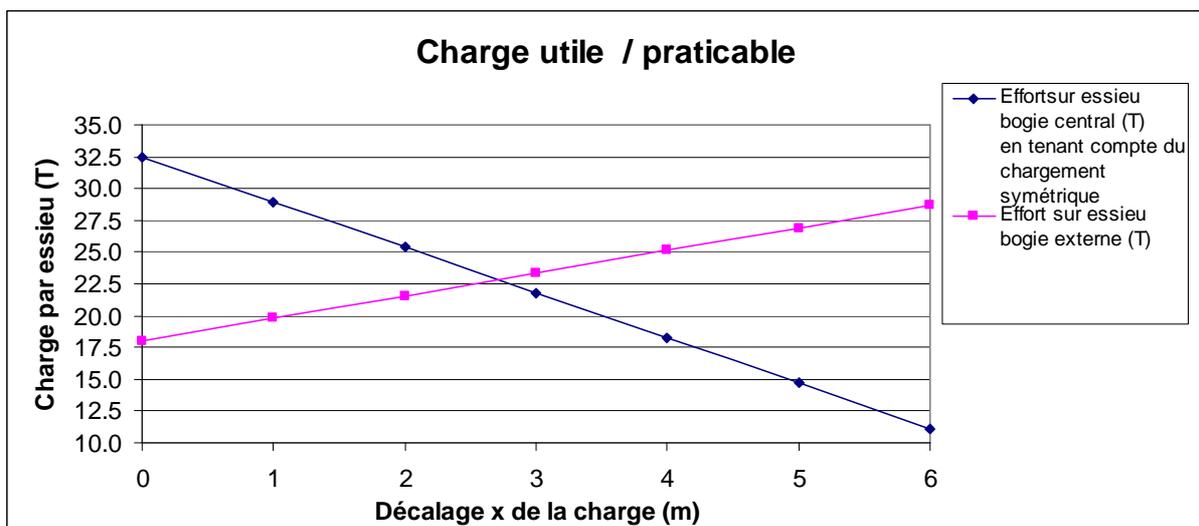
Résultats :

Les résultats ci-dessous sont donnés pour un chargement symétrique identique de part et d'autre du bogie motorisé central.

**Charge utile maximale acceptable dans la limite de 32.5 tonnes / essieu sur le bogie central :**

Dans le cas d'une charge parfaitement centrée sur le praticable, la charge maximale à l'essieu est atteinte pour une charge utile de 50 tonnes par praticable, soit 100 tonnes par wagon.

x (m)	Charge sur le bogie central (T)	Charge sur le bogie externe (T)	Efforts sur essieu bogie central (T) en tenant compte du chargement symétrique	Effort sur essieu bogie externe (T)
0	25.0	25.0	32.5	18.0
1	21.4	28.6	28.9	19.8
2	17.9	32.1	25.4	21.6
3	14.3	35.7	21.8	23.3
4	10.8	39.2	18.3	25.1
5	7.2	42.8	14.7	26.9
6	3.6	46.4	11.1	28.7



On aperçoit également que bien évidemment, un décalage  $x$  positif a pour conséquence de décharger le bogie central au contraire de charger le bogie externe. On peut remarquer que les pentes des droites étant différentes, il est en effet très intéressant d'avoir ce décalage car la charge sur le bogie central diminue rapidement.

Le tableau ci-dessous donne les charges utiles en fonction de  $x$  et pour une charge de 32,5 tonnes / essieu :

Charge à l'essieu de 32.5 tonnes	
Décalage $x$ (m)	Charge utile / praticable (T)
0	50
1	58
2	70

**Charge à l'essieu maximale dans le cas de deux semi-remorques sur un wagon double dont le chargement est parfaitement centré dans la remorque :**

Dans ce cas, à cause du positionnement décalé des remorques, le décalage  $x$  a une valeur voisine de :  $x = 1275$  mm.

Pour un camion complet de 44 T de PTAC et en prenant comme masse standard de tracteur une masse de 8 tonnes, la semi-remorque chargée aura donc une masse maximale approximative de 36 tonnes.

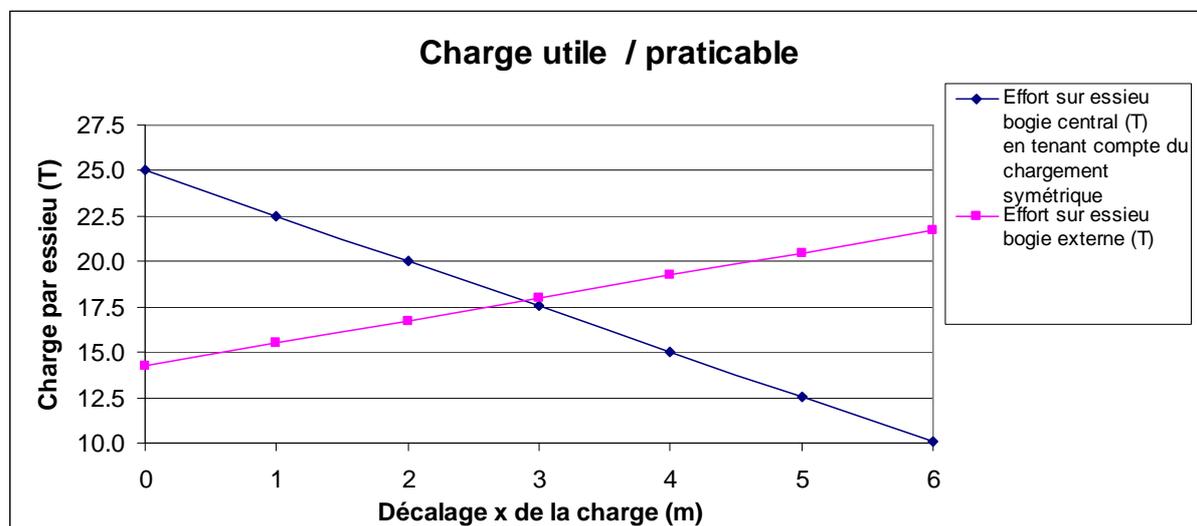
Dans ce cas, l'effort maximal à l'essieu du bogie central est de 22,2 tonnes, ce qui est en deçà dans la limite des 25 tonnes / essieu.

**Charge utile maximale acceptable dans la limite de 25 tonnes / essieu :**

Dans le cas d'une charge parfaitement centrée sur le praticable, la charge maximale à l'essieu est atteinte pour une charge utile de 35 tonnes par praticable, soit 70 tonnes par wagon double.

$x$ (m)	Charge sur le bogie central (T)	Charge sur le bogie externe (T)	Effort sur essieu bogie central (T) en tenant compte du chargement symétrique	Effort sur essieu bogie externe (T)
0	17.5	17.5	25.0	14.3
1	15.0	20.0	22.5	15.5
2	12.5	22.5	20.0	16.7
3	10.0	25.0	17.5	18.0
4	7.5	27.5	15.0	19.2
5	5.0	30.0	12.5	20.5

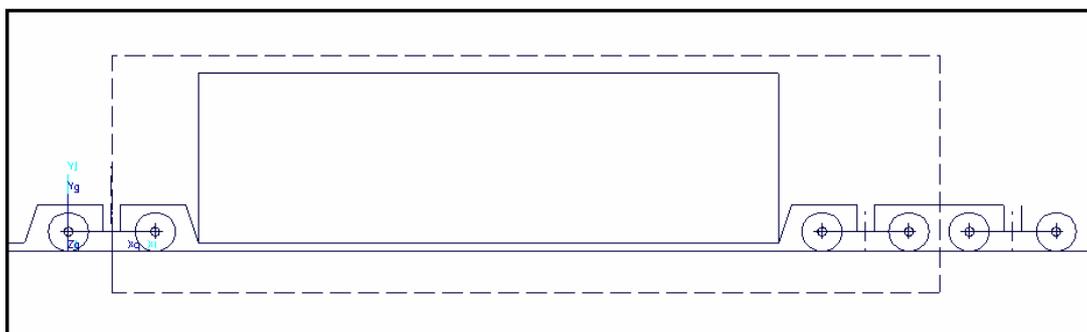
6	2.6	32.4	10.1	21.7
---	-----	------	------	------



Charge à l'essieu de 25 tonnes	
Décalage x (m)	Charge utile / praticable (T)
0	35
1	41
<b>1,4</b>	<b>44</b>
2	49

Ce tableau indique donc que pour une charge utile de 44 tonnes/praticable, il est nécessaire que le centre de gravité de celle-ci soit obligatoirement décalé de 1,4 mètre vers l'extérieur.

## ANNEXE 9 : ETUDE DETAILLEE DE LA MOTORISATION



$\frac{1}{2}$  wagon double

Pour dimensionner la motorisation, on considère un wagon double (car chaque wagon double est motorisé indépendamment). Chaque wagon est équipé de deux moteurs placés sur le bogie central.

### Hypothèses de calculs :

- Moteur électrique de 250 kW à puissance constante : 2 moteurs par wagon double.
- Frottements aérodynamiques et de roulement négligés.
- Coefficient d'adhérence roue / rail :  $\mu=0.15$
- Rendement transmission :  $\eta=0.9$

### Effort longitudinal maximum développable par wagon double :

Cet effort est fonction de la charge s'appliquant sur l'essieu moteur ainsi que du coefficient d'adhérence de la roue sur le rail. Ainsi pour un wagon double (donc deux essieux moteur placés sur le bogie central) :

$$E_{\text{wagon}} = \mu \times 9.81 \times C_{\text{essieu}}$$

Avec  $C_{\text{essieu}}$  = charge à l'essieu.

A partir de cette valeur, on peut déduire l'accélération maximale que subira le wagon :

$$a_{\text{max}} = \frac{E_{\text{wagon}}}{M}$$

Avec M = masse totale du wagon double.

### Effort de traction disponible :

En faisant l'hypothèse d'un moteur à puissance constante :

$P_{\text{moteur}} = F_d \times v$  avec v vitesse en m/s et  $F_d$  effort de traction délivré par les moteurs.

L'effort de traction disponible peut ainsi être obtenu en fonction de la vitesse, de la puissance  $P_m$  totale des deux moteurs et du rendement :

$$F_d = \frac{\eta * P_m}{v}$$

Effort de traction requis :

Pour déplacer le wagon, la motorisation doit vaincre en première approximation l'effort dû à la montée d'une pente d'inclinaison  $\alpha$ :

$$F_r = 9.81 \times M * \sin(\alpha)$$

Pour une puissance motrice fixée, la vitesse maximale en fonction de la pente est donc atteinte lorsque l'effort de traction nécessaire est égal à l'effort de traction disponible.

Accélération et temps d'accélération :

En utilisant le principe fondamental de la dynamique, l'accélération à une vitesse  $v$  du wagon est donnée par :

$$a(v) = \frac{F}{M} = \frac{F_d - F_r}{M}$$

Connaissant l'accélération pour chaque vitesse on peut en déduire le temps d'accélération : Il s'agit du temps déjà écoulé plus le temps pour augmenter la vitesse d'un incrément (1km/h dans les calculs de la feuille excel correspondante). Après  $n$  incréments de vitesse, le temps écoulé est ainsi :

$$t_n = t_{n-1} + \frac{v_n}{a_n(v_n)}$$

Il en va de même pour la distance parcourue pendant l'accélération du wagon. Après  $n$  incréments de vitesse, la distance parcourue est :

$$d_n = d_{n-1} + v_{n-1} \times (t_n - t_{n-1})$$

Résultats :

La puissance de la motorisation d'un wagon double (deux moteurs) est fixée à  $2 * 250 = 500$  kW pour les calculs.

Lorsque le train circule sur une voie parfaitement horizontale, les efforts résistants sont limités aux frottements (pris en compte dans le rendement de la transmission) et à la résistance aérodynamique. Le calcul de cette dernière impose de connaître la géométrie de l'ensemble de la rame ce qui n'est pas possible à ce stade de l'étude.

Les performances théoriques sont synthétisées dans les tableaux ci-dessous et ne tiennent pas compte des frottements aérodynamiques. Il convient donc d'être prudent quant à l'interprétation de ces résultats car ces valeurs sont des valeurs par excès.

Charge utile	Pente ‰	Vitesse maximale théorique (km/h)	Durée pour atteindre 90 % de la vitesse maximale (s)
50 tonnes / praticable (32,5 tonnes / essieu)	10	120	483
	20	60	128
	35	34	48
44 tonnes / praticable	10	132	544
	20	66	138
	35	37	49
35 tonnes / praticable (25 tonnes / essieu)	10		
	20	77	161
	35	44	57

Dans le cas d'une pente nulle :

Charge utile	Durée pour atteindre 120 km/h	Durée pour atteindre 180 km/h
50 tonnes / praticable (32,5 tonnes / essieu)	174	386
44 tonnes / praticable	159	352
35 tonnes / praticable (25 tonnes / essieu)	136	301

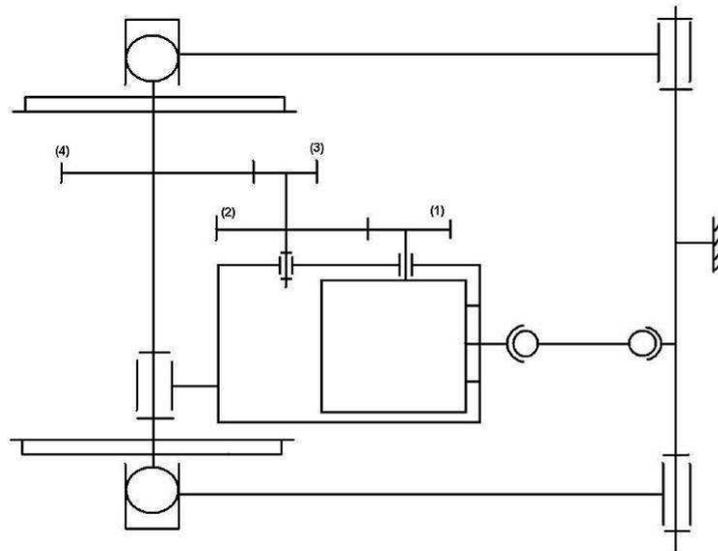
### Pré-dimensionnement du réducteur

Le moteur électrique est prévu pour fonctionner à sa vitesse nominale de 1500tr/min lorsque le train circule à la vitesse de 72km/h.

Le rapport de réduction cible est ainsi déduit :

$$i_{cible} = \frac{\omega_{moteur}}{\omega_{roue}} = \frac{1500}{\frac{72 \times 1000}{3600 D_{roue} / 2} \times \frac{60}{2\pi}} = 3.61$$

La structure du réducteur est choisie de la façon suivante :



Cette disposition est suffisamment compacte et permet de respecter l'entre axe entre l'essieu et le moteur.

Par itérations successives, les diamètres permettant d'obtenir le rapport de réduction cible sont obtenus :

- D1= 140mm
- D2= 260mm
- D3= 180mm
- D4= 350mm

$$\text{Avec } \frac{D_2 \times D_4}{D_1 \times D_3} = 3.61$$

En fixant le module m de tous les pignons à 10, les nombres de dents sont calculés :

$$Z = \frac{D}{m}$$

- Z1= 14
- Z2= 26
- Z3= 18
- Z4= 35

### Détermination des largeurs de dentures

Les largeurs de dents sont déterminées en fonction des contraintes qui sont calculées avec la méthode ISO.

### Calcul des forces s'appliquant sur les dents :

Forces normales :

L'effort maximal qui peut être transmis par l'essieu avant le patinage permet de calculer l'effort maximal présent sur chaque dent :

$$\text{Pignons 3 et 4 : } F_{n3}=F_{n4}=\frac{D_{roue}}{D_4}\times F_{essieu}=83.7kN \quad (F_{essieu}= 32,5kN)$$

$$\text{Pignons 1 et 2 : } F_{n1}=F_{n2}=\frac{D_3}{D_2}\times F_{n3}=57.9kN$$

Calcul des efforts tangentiels utilisés pour les calculs de dents :

$$\text{Pignons 3 et 4 : } F_{t3}=F_{t4}=F_{n3}\cos(\alpha)=78.6kN$$

$$\text{Pignons 1 et 2 : } F_{t1}=F_{t2}=F_{n1}\cos(\alpha)=54.4kN$$

L'angle  $\alpha$  vaut  $20^\circ$  pour les géométries de dents standard.

Calcul des contraintes dans les dents :

D'après la méthode ISO, la contrainte nominale statique en pied de dent est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{FO}=\frac{F_t}{bm}Y_{FA}Y_{SA}Y_\epsilon Y_\beta$$

Avec :

- $Y_{sa}$  : Facteur de concentration de contrainte en pied de dent
- $Y_\epsilon$  : Facteur de conduite
- $Y_\beta$  : Facteur d'inclinaison
- $Y_{FA}$  : Facteur de forme
- $b$  : Largeur de dent

Les différents facteurs sont déterminés en utilisant des tables ou formules normalisées. Les résultats suivants sont obtenus :

Pignons	1	2	3	4
Module m	10	10	10	10
$Y_{FA}$	1.48	1.6	1.54	1.65
$Y_{sa}$	1.8	1.8	1.8	1.8
$Y_\epsilon$	0.79	0.79	0.79	0.79
$Y_\beta$	0.65	0.65	0.65	0.65
<b>Largeur de denture b (mm)</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
$\sigma_{FO}$ (Mpa)	123.4	133.4	139.1	149.1

La contrainte nominale statique doit être majorée avec des coefficients dépendants des conditions de fonctionnement et de la qualité des pignons afin d'obtenir la contrainte maximum de flexion effective en fonctionnement.

D'après la norme ISO :  $\sigma_F = \sigma_{FO} K_A K_V K_{F\beta} K_{F\alpha}$

Avec :

- $K_A$  : Facteur d'application des charges (surcharges dues au type de fonctionnement)
- $K_V$  : Facteur dynamique (vibrations des pignons)
- $K_{F\beta}$  : Facteur de répartition de charge longitudinale (qualité de l'assemblage)
- $K_{F\alpha}$  : Facteur de distribution de charge transversale (qualité de fabrication)

Les résultats suivants sont obtenus :

Pignons	1	2	3	4
$K_A$	1.25	1.25	1.25	1.25
$K_V$	1.00	1.01	1.00	1.01
$K_{F\beta}$	1.30	1.30	1.30	1.30
$K_{F\alpha}$	1.10	1.10	1.10	1.10
<b>Contrainte maxi</b>	<b>221</b>	<b>240</b>	<b>250</b>	<b>269</b>

La contrainte maximum est donc présente dans le pignon 4. Compte tenu de la valeur de cette contrainte, les pignons peuvent par exemple être réalisés avec une fonte à graphite sphéroïdale du type FGS 42.

### Couple à fournir par le moteur

On déduit du rapport de réduction le couple maximal à fournir par le moteur :  $C = F_i \times \frac{D_i}{2} = 4053 Nm$

Ce couple peut être fourni jusqu'à la vitesse de rotation du moteur suivante :

$$\omega = \frac{P_{moteur}}{C} \times \frac{60}{2\pi} = 592 tr/min$$

La vitesse correspondante du wagon est :  $V = \frac{\omega}{r} \times \pi D_{roue} \times \frac{60}{1000} = 30 km/h$

## ANNEXE 10 : ETUDE DETAILLEE DU CHASSIS

### *Dimensionnement de la liaison rotule balancelle / châssis*

Cette liaison rotule doit être capable d'encaisser les efforts horizontaux provenant des balancelles. Sur le matériel roulant classique, les attelages sont conçus pour résister à un effort de traction de 110 tonnes ; c'est cette valeur qui sera choisie pour dimensionner la liaison rotule en y ajoutant la force créée par l'accélération latérale du wagon.

### Calcul de la contrainte de cisaillement dans l'axe

Calcul de l'effort radial à encaisser :

Cet effort a deux composantes :

- La traction dans le sens de la voie. Cette force est fixée à 110T (valeur utilisée pour les attelages classiques).
- L'effort latéral créé par l'accélération latérale du wagon (0,5g selon la réglementation UIC). La masse accélérée a pour valeur la moitié de la charge utile et du praticable (respectivement 44 et 8T) car cette force est encaissée par les deux rotules de la balancelle.

$$F = \sqrt{1100000^2 + \left(0,5 \times 9,81 \times \frac{44000 + 8000}{2}\right)^2} = 1107kN$$

Le diamètre de l'axe d est fixé à 120mm. On en déduit la contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{F}{\pi d^2/4} = 98MPa$$

Limite élastique que doit respecter le matériau avec le coefficient de sécurité  $\alpha$  :

$$\sigma_e = 2\alpha\tau = 510MPa$$

Un acier faiblement allié du type 25CrMo4 ( $\sigma_e = 600MPa$ ) peut convenir pour cette application.

### Choix d'une rotule

#### Données :

- Coefficient de sécurité :  $\alpha = 2.6$
- Diamètre intérieur : 120mm

Il faut donc choisir une rotule ayant un diamètre intérieur de 120mm et une charge statique (car rotation très faible) supérieure à :

$$C = \alpha F = 3484kN$$

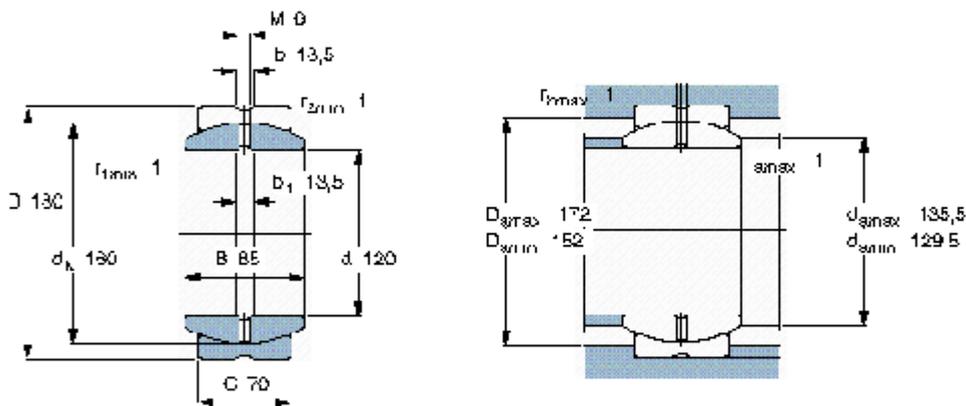
Dans la gamme du fabricant SKF, la rotule suivante convient (voir fiche produit pour détails) :

- d= 120mm
- L= 85mm

- D= 180mm
- C<sub>0</sub>= 4750kN

Rotules à lubrifier, acier/acier

Dimensions d'encombrement				Angle de déversement ± degrés	Charges de base dynamique C		Masse kg	Désignation
d	D	B	C		C	C <sub>0</sub>		
mm					N			-
120	180	85	70	6	950000	4750000	8,25	GE 120 ES



Système "multi rainures" dans la bague extérieure aménagée de séries

Coefficient de pression spécifique K 100

Calcul de l'angle de rotation de la rotule à prévoir

Données :

- Rayon minimum de la voie : R= 70m
- Empattement du wagon : L= 14,05

L'angle est obtenu par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{L/2}{R}\right) = 5,76^\circ \approx 6^\circ$$

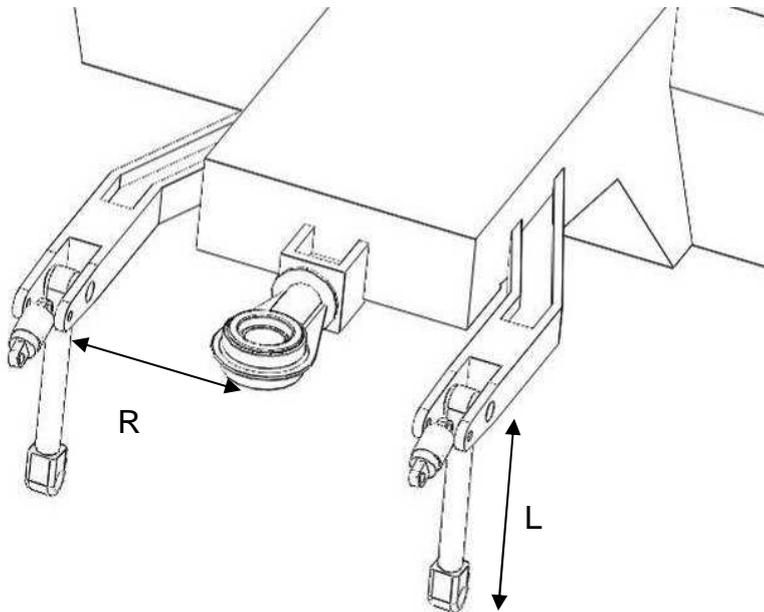
Dimensionnement des bielles supportant la charge

Détermination de la variation de hauteur du praticable lors d'un passage en courbe

Données :

- Angle de rotation du wagon :  $\alpha = 7^\circ$
- Rayon d'action de la bielle : R = 675mm (pour les bielles courtes)
- Longueur des bielles : L = 700mm

Les bielles courtes sont choisies car c'est avec elles que les plus grandes variations de hauteur verticales seront obtenues.



Distance horizontale parcourue par l'extrémité de la bielle :

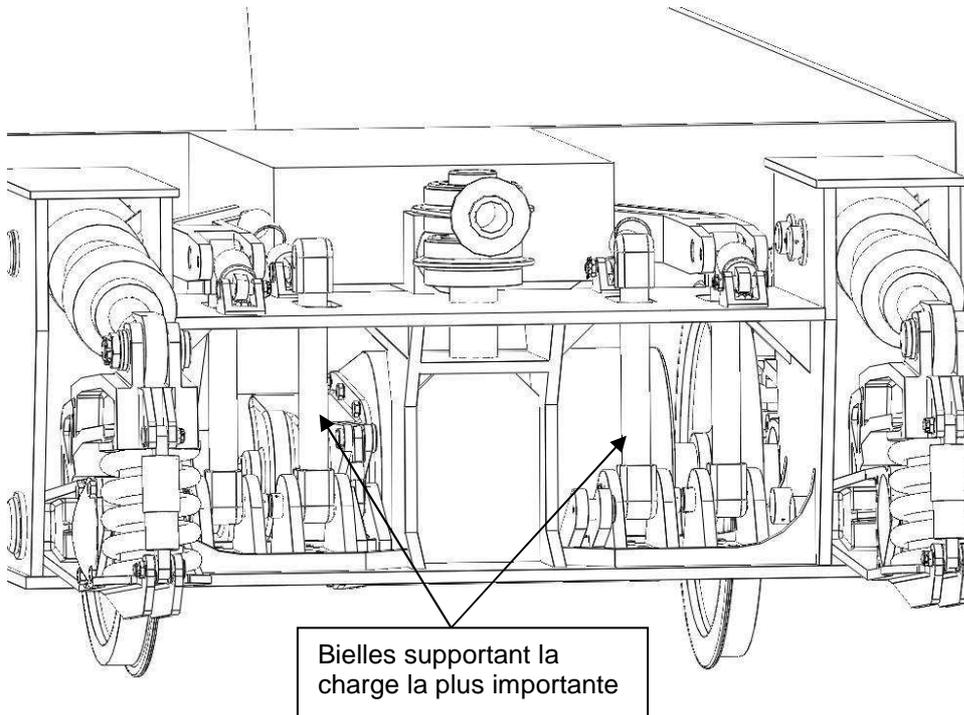
$$d = R \sin(\alpha) = 82 \text{ mm}$$

Variation de hauteur du praticable :

$$\Delta h = d \cdot \tan\left(\arcsin\left(\frac{d}{L}\right)\right) = 10 \text{ mm}$$

### Dimensionnement des bielles supportant la charge la plus importante :

Ces bielles correspondent aux bielles supportant la charge avec le plus petit bras de levier. Il s'agit donc des bielles de la balancelle basse placées sur le bogie central.



Données :

- Accélération verticale réglementaire (source SNCF):  $a = 0.3g \text{ m/s}^2$
- Rayon du bras de levier :  $R = 0.4\text{m}$
- Masse de la charge utile :  $M = 44\text{T}$
- Masse du praticable :  $m = 8\text{T}$

Force encaissée par l'ensemble des deux bielles due à la charge utile :

$$F = \frac{M}{4} + \frac{M}{4} a = 14.3\text{T}$$

En tenant compte d'une excentration latérale  $e$  de cette charge utile, les deux bielles encaissent les efforts suivants :

- Bielle la plus chargée :  $F_1 = F \cdot \frac{R+e}{2R}$
- Bielle la moins chargée :  $F_2 = F - F \cdot \frac{R+e}{2R}$

Il convient également d'ajouter la charge due au poids du praticable à vide :

$$F_p = \frac{m}{4} + \frac{m}{4} a = 2.6\text{T}$$

Les résultats suivants sont obtenus pour différentes excentrations :

Excentration			
0	0.2m	0.4m	0.45m

<b>F1 (T)</b>	8.5	12.7	16.9	17.9
<b>F2 (T)</b>	8.5	4.2	0	-1.1

Il convient donc de ne pas avoir une excentration supérieure à 0.45m pour garantir un effort raisonnable sur la bielle la plus sollicitée et pour ne pas avoir l'autre bielle en traction.

Calcul de la contrainte de compression maximale dans une bielle :

En choisissant un diamètre d de 70mm la contrainte suivante est obtenue :

$$\sigma_c = \frac{F_{1\max}}{\pi d^2/4} = 45.7 \text{ MPa}$$

Choix d'un matériau :

Il faut que celui-ci ait une limite élastique supérieure à :

$$\sigma = \alpha \cdot \sigma_c = 91,4 \text{ MPa} \text{ avec } \alpha \text{ coefficient de sécurité.}$$

Un acier standard de type S185 pourra donc convenir.

Calcul de la contrainte de cisaillement des axes :

En choisissant un diamètre d de 60mm la contrainte suivante est obtenue :

$$\tau = \frac{F_{1\max}}{\pi d^2/4} = 62.3 \text{ MPa}$$

Choix d'un matériau :

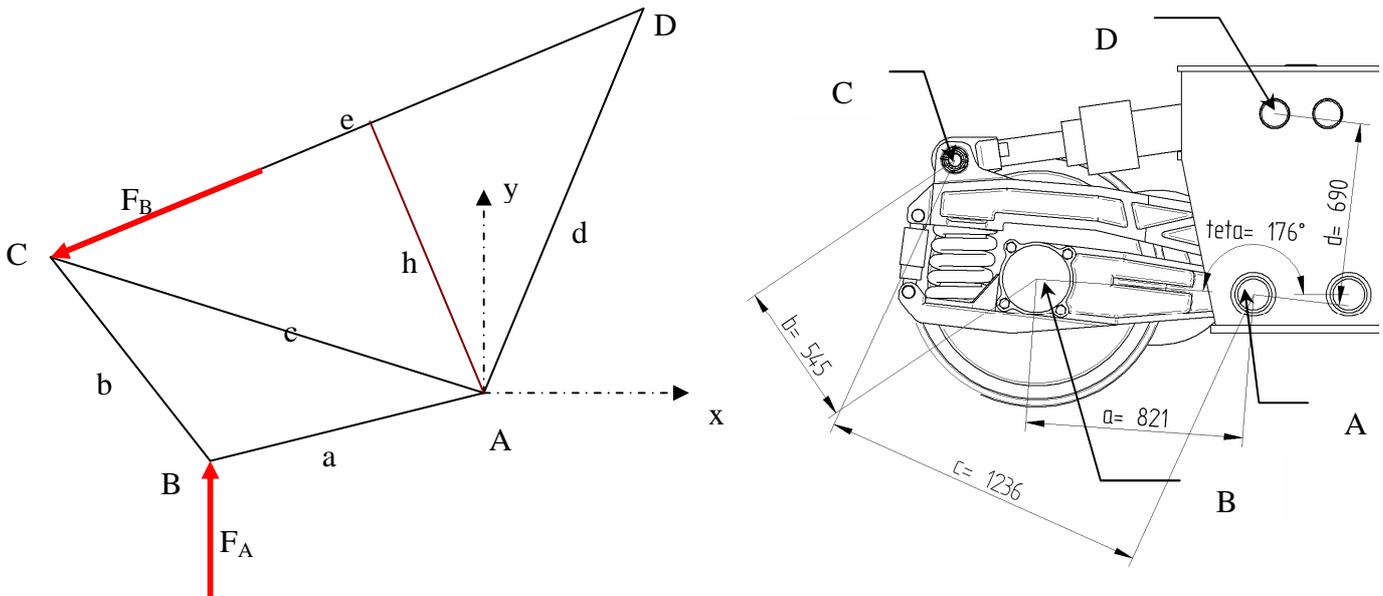
En tenant compte du coefficient de sécurité  $\alpha$ , il faut que ce matériau ait une limite élastique supérieure à :

$$\sigma = \alpha \cdot 2 \tau = 249,2 \text{ MPa}$$

(en considérant que la limite élastique en cisaillement est deux fois plus faible que celle en traction).

## ANNEXE 11 : ETUDE DETAILLEE DE LA SUSPENSION

### Détermination de la poussée à fournir par les vérins hydrauliques



L'architecture et le paramétrage retenus pour le système de variation de hauteur est représentée sur le schéma ci-dessus.

Sur chaque bras de suspension, le vérin hydraulique doit fournir une force de poussée  $F_B$  capable de vaincre l'action de l'essieu  $F_A$  sur le bras.

Soit :

- $\square$  l'angle entre l'axe x et le segment AB
- $\square$  l'angle entre AD et AC
- $\alpha$  l'angle entre AC et AB

On a  $\square$  et  $\square$  variables en fonction de e et  $\square$  constants (on suppose que la compression du ressort ne change pas lors du changement de la garde au rail).

Données :

- $a = 0,821$  m
- $b = 0,545$  m
- $c = 1,236$  m
- Accélération verticale réglementaire (source SNCF):  $\alpha_{\text{dvert}} = 1.3$
- $F_A = 16.25T$  (dans la cas le plus défavorable : 32.5T / essieu)

En supposant les manœuvres quasi-statique et en écrivant l'équilibre du triangle ABC, l'égalité des moments des deux actions  $F_A$  et  $F_B$  s'écrit :

$$F_a \times a \times |\cos \psi| = F_b \times h$$

La hauteur du triangle ADC a pour expression :  $h^2 = d^2 - \left(\frac{e^2 + d^2 - c^2}{2e}\right)^2$

On a donc :

$$F_b = F_a \times \frac{a}{h} |\cos \psi|$$

Soit :

$$F_b = F_a \times \frac{a |\cos \psi|}{\sqrt{d^2 - \left(\frac{e^2 + d^2 - c^2}{2e}\right)^2}}$$

D'après le théorème d'Al Kashi :  $e^2 = c^2 + d^2 - 2cd \cos \theta$

$$e = \sqrt{c^2 + d^2 - 2cd \cos \theta}$$

### Détermination de la garde au rail

La garde au rail est fonction des paramètres suivants :

- La course du vérin
- La longueur du ressort
- La géométrie

Soit  $G$  la garde au rail,  $R$  le rayon de la roue et  $h$  la hauteur du châssis. On a alors :

$$G = R + a \times |\sin \psi| - h$$

On obtient les résultats suivants :

-Pour le bogie double motorisé :

course du vérin = (mm)	Garde au rail pour une longueur de ressort de 281 mm	Garde au rail pour une longueur de ressort de 347 mm	position
223	264	313	position haute
212	250	300	

200	236	285	position basse
175	205	254	
80	93	141	
70	82	129	
60	70	118	
50	59	106	
43	51	98	
40	48	95	

**-Pour le bogie non motorisé :**

course du vérin = (mm)	Garde au rail pour une longueur de ressort de 277 mm	Garde au rail pour une longueur de ressort de 329 mm	position
207	278	317	position haute
200	269	308	
195	262	301	
190	256	294	
186	250	289	
45	69	106	position basse
40	62	100	
35	56	93	
31	51	88	
30	50	87	
22	40	77	

Un premier choix peut se porter sur un vérin Bosch-Rexroth de type CDH3 MP5 140/100 :



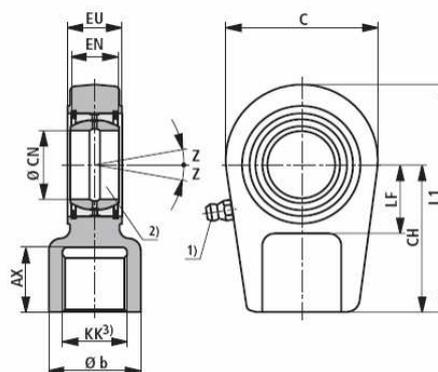
### Sections, forces, débit

piston AL Ø mm	tige de vérin MM Ø mm	rapport surfaces $\varphi$ $A_1/A_3$	section			force à 250 bar <sup>1)</sup>			débit à 0,1 m/s <sup>2)</sup>		
			piston $A_1$ cm <sup>2</sup>	tige $A_2$ cm <sup>2</sup>	annulaire $A_3$ cm <sup>2</sup>	compr. $F_1$ kN	diff. $F_2$ kN	traction $F_3$ kN	déploiem. $q_{V1}$ L/min	diff. $q_{V2}$ L/min	rentrée $q_{V3}$ L/min
40	28	1,96	12,56	6,16	6,40	43,96	21,56	22,40	7,5	3,7	3,8
50	36	2,08	19,63	10,18	9,45	68,71	35,63	33,08	11,8	6,1	5,7
63	45	2,04	31,17	15,90	15,27	109,10	55,65	53,45	18,7	9,5	9,2
80	56	1,96	50,26	24,63	25,63	175,91	86,21	89,71	30,2	14,8	15,4
100	70	1,96	78,54	38,48	40,06	274,89	134,68	140,21	47,1	23,1	24,0
125	90	2,08	122,72	63,62	59,10	429,52	222,67	206,85	73,6	38,2	35,4
140	100	2,04	153,94	78,54	75,40	538,79	274,89	263,90	92,4	47,1	45,3
160	110	1,90	201,06	95,06	106,00	703,71	332,71	371,00	120,6	57,0	63,6
180	125	1,93	254,47	122,72	131,75	890,65	429,52	461,13	152,7	73,6	79,1
200	140	1,96	314,16	153,96	160,20	1099,56	538,86	560,70	188,5	92,4	96,1
220	160	2,12	380,1	201,0	179,1	1330,5	703,7	626,8	228,1	120,7	107,4
250	180	2,08	490,8	254,4	236,4	1718,1	890,6	827,4	294,5	152,7	141,8

### Caractéristiques principales :

- Pression nominale : 350 bars.
- Huiles minérales selon : DIN 51 524 (HL, HLP)
- Plage de température du fluide hydraulique : -20°C à + 80 °C.
- Vitesse maximale : 0.5 m/s.

Ce vérin sera bi-rotulé afin de ne pas augmenter l'hyperstaticité du montage. La rotule montée en bout de tige est une rotule Bosch-Rexroth CGA 65 :



### Validation des axes de fixation des vérins

Calcul de la contrainte de cisaillement dans les axes du vérin :

#### Données :

- Effort de cisaillement : 52,7T (Cf page 15)
- Diamètre des axes : 70 mm

La contrainte de cisaillement s'écrit :  $\tau = \frac{F}{\pi d^2/4} = 137 MPa$

Limite élastique que doit respecter le matériau :

$$\sigma_e = 2\alpha\tau = 364 MPa$$

Un acier non allié du type C80E ( $\sigma_e = 500 MPa$ ) peut convenir pour cette application.

### Validation des axes de liaisons des bras inférieurs de suspension :

Calcul de la contrainte de cisaillement dans les axes des bras :

Données :

- Effort de cisaillement : 6T
- Diamètre des axes : 100mm

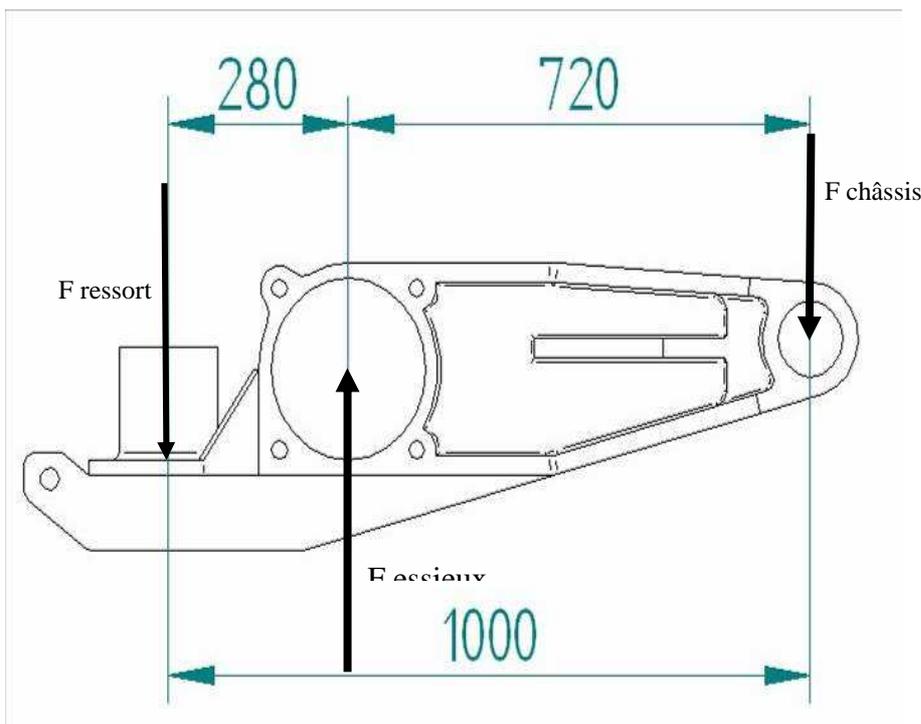
La contrainte de cisaillement s'écrit :  $\tau = \frac{F}{\pi d^2/4} = 7.6MPa$

Limite élastique que doit respecter le matériau :

$$\sigma_e = 2\alpha\tau = 156MPa$$

Un acier non allié du type S235 ( $\sigma_e = 240MPa$ ) peut convenir pour cette application.

**Pré-dimensionnement des ressorts de suspension**



Soit la modélisation approchée ci-dessus (on suppose les actions mécaniques purement verticales).

**Calcul de la charge maximale appliquée sur le ressort du bogie double motorisé :**

Données :

- Charge maxi par essieu : 32,5T
- a = 821mm

- $b = 1102\text{mm}$
- Accélération verticale :  $acc = 0.3g = 2.943\text{m/s}^2$
- Module de cisaillement du matériau :  $G = 80000\text{Mpa}$

La charge supportée par le ressort est due au poids du wagon (la moitié de la charge par essieu) et à l'accélération verticale de celui-ci :

$$C_{poids} = \frac{32500 \times 9.81}{2} \times \frac{a}{b} = 118764\text{N}$$

$$C_{acc} = \frac{C_{poids}}{9.81} \times acc = 35629\text{N}$$

Le ressort doit donc pouvoir encaisser la charge suivante :

$$C = C_{poids} + C_{acc} = 154393\text{N} \approx 15.44\text{T}$$

#### Détermination des caractéristiques géométriques du ressort :

Le diamètre du fil est donné par la relation suivante :  $d = \left( \frac{8C_{poids}D_3n}{Gf} \right) = 46\text{mm}$ .

Avec :

- $D$  : diamètre d'enroulement
- $n$  : nombre de spires

Par calcul itératif, les caractéristiques suivantes permettent d'obtenir un ressort acceptable :

- $D = 200\text{mm}$
- $n = 4$
- $d = 46$
- rapport  $D/d = 4,3$

Le pas est fixé à  $80\text{mm}$  afin de ne pas mettre les spires en contact.

On en déduit les longueurs du ressort dans ses différents cas de chargement :

- Longueur libre :  $l_{libre} = n \times p + d = 365.6\text{mm}$
- Longueur mini du ressort (spires en contact) :  $l_{mini} = d(n + 1) = 230\text{mm}$
- Soit une flèche maxi :  $f_{maxi} = l_{libre} - l_{mini} = 136\text{mm}$

#### Calcul de la raideur du ressort :

$$K = \frac{G \times d^4}{8n \times D^3} = 1399\text{N/mm}$$

### Calcul de la flèche subie par le ressort et par l'essieu lors de la mise en charge :

La flèche au niveau du ressort pour un chargement de 32.5T/essieu est donc :

$$Fleche\_ressort = \frac{F\_essieu * a}{2 * K * c} = 110mm$$

Flèche au niveau de l'essieu pour une charge de 32.5T :

$$Fleche\_essieu = fleche\_ressort * \frac{a}{c} = 82mm$$

	effort ressort (N)	Charge à l'essieu (kg)	Flèche ressort (mm)	Longueur ressort (mm)	Flèche essieu (mm)	Contrainte de torsion dans le fil R (Mpa)
F ressort mini statique	27407	7500	20	346	15	187
F ressort mini dynamique	35629	9750	25	341	19	243
F ressort maxi statique	118764	32500	85	281	63	809
F ressort maxi dynamique	154393	42250	110	256	82	<b>1052</b>
F ressort pour semi-remorque vide de 7 tonnes	40197	11000	29	337	21	

### Calcul de la charge maximale appliquée sur le ressort du bogie non motorisé :

#### Données :

- Charge maxi par essieu : 16.25T
- a= 821mm
- b= 1102mm
- Accélération verticale : acc= 0.3g = 2.943m/s<sup>2</sup>
- Module de cisaillement du matériau : G= 80000Mpa

La charge supportée par le ressort est due au poids du wagon (la moitié de la charge par essieu) et à l'accélération verticale de celui-ci :

$$C_{poids} = \frac{32500 \times 9.81}{2} \times \frac{a}{b} = 59382N$$

$$C_{acc} = \frac{C_{poids}}{9.81} \times acc = 17815N$$

Le ressort doit donc pouvoir encaisser la charge suivante :

$$C = C_{poids} + C_{acc} = 77197N \approx 7.72T$$

### Détermination des caractéristiques géométriques du ressort :

Le diamètre du fil est donné par la formule suivante :

$$d = \left( \frac{8C_{poids} D^3 n}{Gf} \right) = 39mm$$

Avec :

- D : diamètre d'enroulement
- n : nombre de spires

Par calcul itératif, les caractéristiques suivantes permettent d'obtenir un ressort acceptable :

- D= 200mm
- n= 4
- d= 39mm
- rapport D/d= 5.1

Le pas est fixé à 80mm afin de ne pas mettre les spires en contact.

On en déduit les longueurs du ressort dans ses différents cas de chargement :

- Longueur libre :  $l_{libre} = n \times p + d = 359mm$
- Longueur mini du ressort (spires en contact) :  $l_{mini} = d(n+1) = 195mm$
- Soit une flèche maxi :  $f_{maxi} = l_{libre} - l_{mini} = 164mm$

### Calcul de la raideur du ressort :

$$K = \frac{G \times d^4}{8n \times D^3} = 723N/mm$$

### Calcul de la flèche subie par le ressort et par l'essieu lors de la mise en charge :

La flèche au niveau du ressort pour un chargement de 16,25T/essieu est donc :

$$Fleche\_ressort = \frac{F_{essieu} \times a}{2 \times K \times c} = 107mm$$

Flèche au niveau de l'essieu pour une charge de 16,25T/essieu :

$$Fleche\_essieu = fleche\_ressort * \frac{a}{c} = 80mm$$

	effort ressort (N)	Charge à l'essieu (kg)	Flèche ressort (mm)	Longueur ressort (mm)	Flèche essieu (mm)	Contrainte de torsion dans le fil R (Mpa)
F ressort mini statique	21469	5875	30	329	22	221
F ressort mini dynamique	27909	7637,5	39	320	29	288
F ressort maxi statique	59382	16250	82	277	61	613
F ressort maxi dynamique	77196	21125	107	252	80	<b>796</b>
F ressort pour semi-remorque vide de 7 tonnes	27864	7625	39	320	29	287

### Dimensionnement des roulements des essieux

Des roulements rotules à rouleaux ont été choisis pour réaliser la liaison entre l'essieu et les bras de suspension. Un roulement est disposé à chaque extrémité de l'essieu.

### Estimation de la durée de vie à prévoir

Les roulements sont dimensionnés pour avoir une durée de vie de dix millions de kilomètres.

Calcul de valeur correspondante en million de tours :

$$L = \frac{10}{\pi d} = 3,46Mtours \quad \text{Avec } d \text{ diamètre de la roue}$$

### Choix d'un roulement à rotule

Le roulement suivant est choisit dans la gamme SKF (roulement à deux rangées de rouleaux) :

D= 240mm, d= 160mm, B= 80mm avec C=750kN

### Calcul de la durée de vie en régime stationnaire :

Dans ce cas de fonctionnement, le roulement est uniquement soumis à l'effort radial du à la charge soit au maximum 32,5T/essieu.

La charge équivalente est donc :

$$P = \frac{325000}{2} = 162,5kN$$

Durée de vie correspondante :  $L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} = 164 \text{Mtours}$

Calcul de la durée de vie en prenant en compte les accélérations verticales et latérales du wagon :

D'après la réglementation SNCF, les valeurs des accélérations sont les suivantes :

$$a_{\text{vert}} = 0,3g = 2,943 \text{m} / \text{s}^2$$

$$a_{\text{lat}} = 0,5g = 4,905 \text{m} / \text{s}^2$$

Calcul de la charge verticale maximale créée par l'accélération (pour l'essieu chargé à 32,5T) sur un roulement:

$$F_v = \frac{32500}{2} a_{\text{vert}} = 47824 \text{N}$$

Calcul de la charge latérale créée par l'accélération (pour un wagon de 65T) sur un roulement :

Lors d'une accélération latérale, l'effort est encaissé par les trois roulements d'un même coté des trois essieux, d'où :

$$F_l = \frac{65000}{3} a_{\text{lat}} = 106275 \text{N}$$

Pour se mettre dans le cas de fonctionnement le plus défavorable du roulement, on considère que les charges dues aux accélérations sont présentes en permanence :

La charge équivalente est alors donnée par la relation suivante (d'après la documentation SKF) :

$$P = \left(\frac{325000}{2} + F_v\right) + 2,8 \times F_l = 507,9 \text{kN}$$

On en déduit une nouvelle durée de vie :

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} = 3,7 \text{Mtours} \geq 3,46 \text{Mtours}$$

En pratique, les accélérations verticales et latérales ne seront jamais présentes en permanence donc on peut considérer que la durée de vie des roulements sera comprise entre 3,7 et 164Mtours ce qui est suffisant pour parcourir 10 millions de kilomètres.

## ANNEXE 12 : ETUDE DETAILLEE DU SYSTEME DE FREINAGE

Pour dimensionner le dispositif de freinage, on considère un wagon seul muni de trois essieux dont deux peuvent être utilisés pour le freinage (le troisième contient la motorisation).

### Données :

- Masse à stopper :  $M = 65T$
- Décélération cible :  $a = 0,7m/s^2$  (d'après réglementation UIC)
- Diamètre de roue :  $d_{roue} = 920mm$
- Coefficient d'adhérence roue / rail :  $\mu_{adh} = 0.15$

### Disques utilisés :

- Diamètre extérieur :  $D = 610mm$
- Diamètre intérieur :  $d = 322mm$
- Nombre de plaquettes par disque : 2
- Coefficient de frottement disque/plaquette :  $\mu = 0,35$

### Calcul de l'effort de freinage transmissible maximal par essieu :

Le freinage devant être dimensionné pour la charge maximale admissible. Celui-ci est mené dans le cas des bogies motorisés chargés à 32,5 tonnes/essieu. Comme on l'a vu précédemment, cette valeur est une valeur dimensionnante et non un cas réel puisque la charge maximale embarquée par praticable ne doit pas dépasser 25 tonnes/essieu.

Les freins sont montés sur les essieux des bogies externes, donc chargés à 16,25 tonnes/essieu.

Avec un coefficient d'adhérence  $\mu_{adh} = 0.15$  l'effort maximal transmissible par essieu à la limite du dérapage vaut :

$$F_{essieu} = charge_{essieu} * \mu_{adh} = 162500 * 0,15 = 24375N$$

La force de freinage maximale à la limite du patinage pour le bogie externe est donc de 48750 N

### Calcul du nombre d'essieux freinant nécessaires

La force de freinage à fournir pour stopper un wagon est :  $F_{totale} = Ma = 45,5kN$

Un essieu étant capable de fournir un effort de 24 kN, il est donc nécessaire d'utiliser deux essieux pour stopper le wagon.

### Calcul de la force à fournir par plaquette

Chaque essieu doit fournir la force de freinage suivante :

$$F = \frac{F_{totale}}{2} = 22,75kN$$

Cette force est valable pour un point d'application situé au niveau de la surface de la roue. Au niveau du rayon moyen des disques, cette force a la valeur suivante :

$$F' = F \times \left( d_{roue} \times \frac{1}{(d + D)/2} \right) = 44,9kN$$

En considérant un dispositif avec trois disques par essieu, chaque disque doit fournir l'effort suivant :

$$F_{disque} = \frac{F'}{3} = 15kN$$

Pour que chaque disque puisse fournir cet effort, il faut lui appliquer un effort latéral de frottement avec la valeur suivante :

$$F_{lat} = \frac{F_{disque}}{\mu} = 42,8kN$$

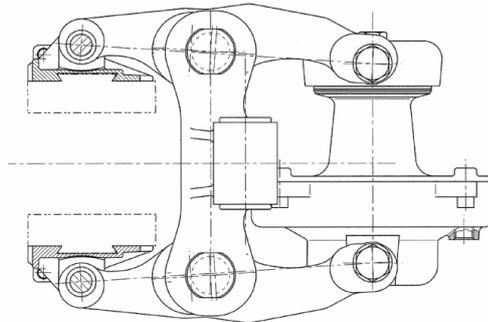
Comme cet effort est fourni par deux plaquettes, l'effort à fournir par plaquette est donc :

$$F_{plaquette} = \frac{F_{lat}}{2} = 21,4kN$$

### Dispositif pneumatique : calcul de la force maximale applicable par plaquette

Avec un système de freinage pneumatique, l'effort appliqué par plaquette est limité par la pression du circuit d'air qui vaut 3,8 bars sur le matériel roulant classique.

Schéma d'un étrier pneumatique :



Source: FreinRail

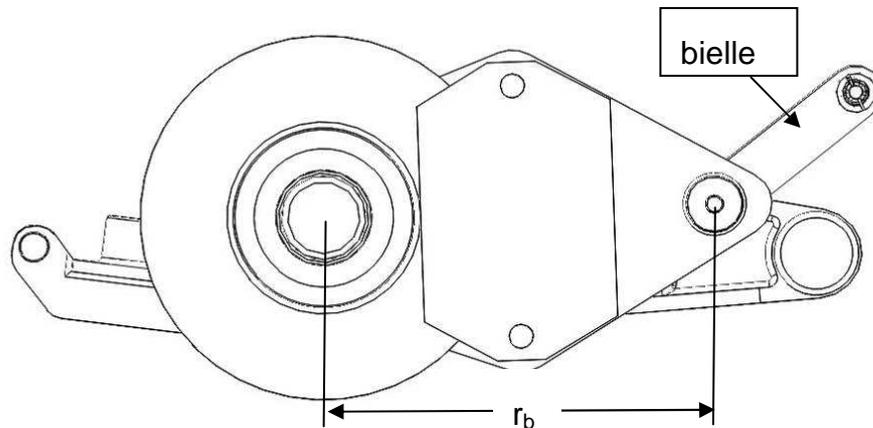
### Données :

- Pression du circuit d'air :  $p = 3,8\text{bars}$
- Surface du piston :  $S = 510\text{cm}^2$  (d'après le fabricant FreinRail)
- Force de rappel du ressort interne :  $F_{ressort} = 1500\text{N}$
- Rendement global :  $\mu = 0,95$

Le rapport du bras de levier des biellettes est fixé à  $r = 2,8$ . La force maximale appliquée sur une plaquette pouvant être obtenue est donc :

$$F_{max} = \frac{1}{2} [(\mu \cdot p \cdot S - F_{ressort}) r] = 23,7kN$$

### Dimensionnement de la bielle retenant le dispositif de freinage



L'effort engendré par un freinage est repris par une bielle reliant le support des étriers au châssis.

#### Données :

- Rayon d'application de la bielle :  $r_b = 700\text{mm}$

Calcul de la force de traction encaissée par la bielle :

$$F = \frac{d + D}{r_b} \times 3F_{\text{disque}} = 15\text{kN}$$

Calcul de la contrainte maximale dans la bielle :

Cette contrainte est présente sur la section minimale de la pièce ( $s = 1280\text{mm}^2$ ) :

$$\sigma = \frac{F}{s} = 12\text{MPa}$$

Une fonte de type EN-L-250 ( $\sigma_e = 165\text{MPa}$ ) peut convenir pour la réalisation de cette pièce qui sera moulée.

## ANNEXE 13 : ETUDE DETAILLEE DU CIRCUIT HYDRAULIQUE

L'hydraulique est utilisée pour actionner les vérins du dispositif de variation de hauteur et aussi pour actionner les freins dans le cas de la solution hydraulique. Ces deux fonctions peuvent être réalisées par des circuits séparés. La partie suivante ne concerne que le circuit de commande des vérins de variation de hauteur.

### *Détermination des caractéristiques de la pompe hydraulique à choisir*

#### Calcul du débit nécessaire :

La pompe doit alimenter les 4 vérins de chacun des trois bogies ce qui fait un total de 12 vérins. Le temps pour passer de la position basse à la position haute du bogie est fixé à 20 secondes.

Données :

- Nombre de vérins : 12
- Diamètre des pistons :  $D= 125\text{mm}$
- Course des vérins :  $c= 145\text{mm}$
- Temps de déplacement :  $t= 20\text{s}$

On en déduit le volume de fluide à fournir par la pompe :

$$V = 12 \left( c \times \pi \frac{D^2}{4} \right) = 21,35L$$

Ce volume doit être fournit en 20s d'où le débit :

$$q = V \frac{60}{20} = 64,1L / \text{min}$$

## ANNEXE 14 : NOMENCLATURES

BOGIE MOTORISE					
Référence	Désignation	Nombre	Masse unitaire (kg)	Masse totale (kg)	Remarques
<b>CHASSIS</b>					
1	Châssis	1	1860	1860	Mécano-soudé
2	Axe praticable	1	38	38	usiné
3	Axe bras	4	22,2	88,8	usiné
6	axe vérin anti lacet	4	0,74	2,96	usiné
12	U pour vérin anti lacet	4	3,5	14	moulé
13	Bielle courte	2	25	50	moulé
16	Axe corps vérin	4	11	44	usiné
314	écrou à créneaux - uni 5594 m24x2-10	4	0,08	0,32	Fournisseur
315	rondelle din 126 26 100hv	4	0,031	0,124	Fournisseur
316	goupille din 94-4 6x50-st	4	0,007	0,028	Fournisseur
<b>TRANSMISSION</b>					
101	Roue	4	245	980	standard
102	Carter	1	290	290	moulé
103	Couvercle carter	1	125	125	moulé
104	Moteur	2	600	1200	Fournisseur
105	Pignon intermédiaire	1	37	37	moulé, usiné
106	Pignon roue	1	52	52	moulé, usiné
107	Axe essieu moteur	1	325	325	usiné
108	Roulement rotule	4	10	40	SKF 160-240-80
109	Support roulement	4	6	24	usiné
110	Roulement rouleaux	2	5	10	SKF 170-230-32
111	Axe essieu simple	1	310	310	usiné
112	Roulement rouleaux 40	2	5	10	SKF 40-90-35.25
115	vis iso 7411 m20x55-10_9	7	0,231	1,617	standard

116	écrou 07210-20	7	0,067	0,469	standard
117	vis iso 7411 m20x45-10_9	2	0,206	0,412	standard
118	rondelle iso 7092-20-140 hv	9	0,013	0,117	standard
119	rondelle nf e 25-517 20-4_5	7	0,021	0,147	standard
<b>FREINAGE</b>					
201	Disque	3	80	240	Fournisseur
202	étrier	3	80	240	Fournisseur
203	Support disque	3	36	108	moulé, usiné
204a	Support 1 étrier	1	62	62	Mécano-soudé
204b	Support 2 étriers	1	68	68	Mécano-soudé
205	Roulement à billes	2	4	8	SKF 160-220-28
206	Bielle	1	10	10	moulé
208	Tube support étrier	1	4	4	Mécano-soudé
<b>SUSPENSION</b>					
301	Bras principal	4	187	748	moulé
302	tige vérin	4	30	120	Fournisseur
303	corps vérin	4	65	260	Fournisseur
304	embout tige	4	2	8	usiné
305	bras supérieur	4	257	1028	moulé
306	amortisseur	4	15	60	Fournisseur
307	ressort	4	35	140	formé
308	Bouchon	4	12	48	moulé
309	axe tenon vérin	4	6	24	usiné
312	axe tige amortisseur	4	0,66	2,64	usiné
314	écrou à créneaux - uni 5594 m24x2-10	8	0,08	0,64	Fournisseur
315	rondelle din 126 26 100hv	8	0,031	0,248	Fournisseur
316	goupille din 94-4 6x50-st	8	0,007	0,056	Fournisseur
317	écrou à créneaux - uni 5594 m52x3-6s	4	0,7	2,8	Fournisseur
318	rondelle din 126 56 100hv	4	0,3	1,2	Fournisseur

319	goupille iso 1234-7 5x80	4	0,003	0,012	Fournisseur
			Masse totale (kg) :		8688

<b>BOGIE FREINE</b>					
<b>Référence</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre</b>	<b>Masse unitaire (kg)</b>	<b>Masse totale (kg)</b>	<b>Remarques</b>
<b>CHASSIS</b>					
2	Axe praticable	1	38	38	usiné
3	Axe bras	4	22,2	88,8	usiné
6	axe vérin anti lacet	2	0,74	1,48	usiné
11	Châssis sans moteur	1	2170	2170	usiné
12	U pour vérin anti lacet	2	3,5	7	moulé
14	Bielle longue	4	30	120	usiné
16	Axe corps vérin	4	11	44	usiné
17	attache bielle	2	11,5	23	usiné
19	vis iso 7411 m20x55 10-9	8	0,23	1,84	standard
20	rondelle iso 7091 24-100 hv	8	0,03	0,24	standard
209	axe bielle	2	0,77	1,54	usiné
314	écrou à créneaux - uni 5594 m24x2-10	4	0,08	0,32	standard
315	rondelle din 126 26 100hv	4	0,031	0,124	standard
316	goupille din 94-4 6x50-st	4	0,007	0,028	standard
<b>TRANSMISSION</b>					
101	Roue	4	245	980	standard
108	Roulement rotule	4	10	40	SKF 160-240-80
109	Support roulement	4	6	24	usiné
111	Axe essieu simple	2	310	620	usiné
<b>FREINAGE</b>					
201	Disque	6	80	480	Fournisseur
202	étrier	6	80	480	Fournisseur
203	Support disque	6	36	216	moulé, usiné
204a	Support 1 étrier	2	68,5	137	Mécano-soudé
204b	Support 2 étriers	2	75	150	Mécano-soudé

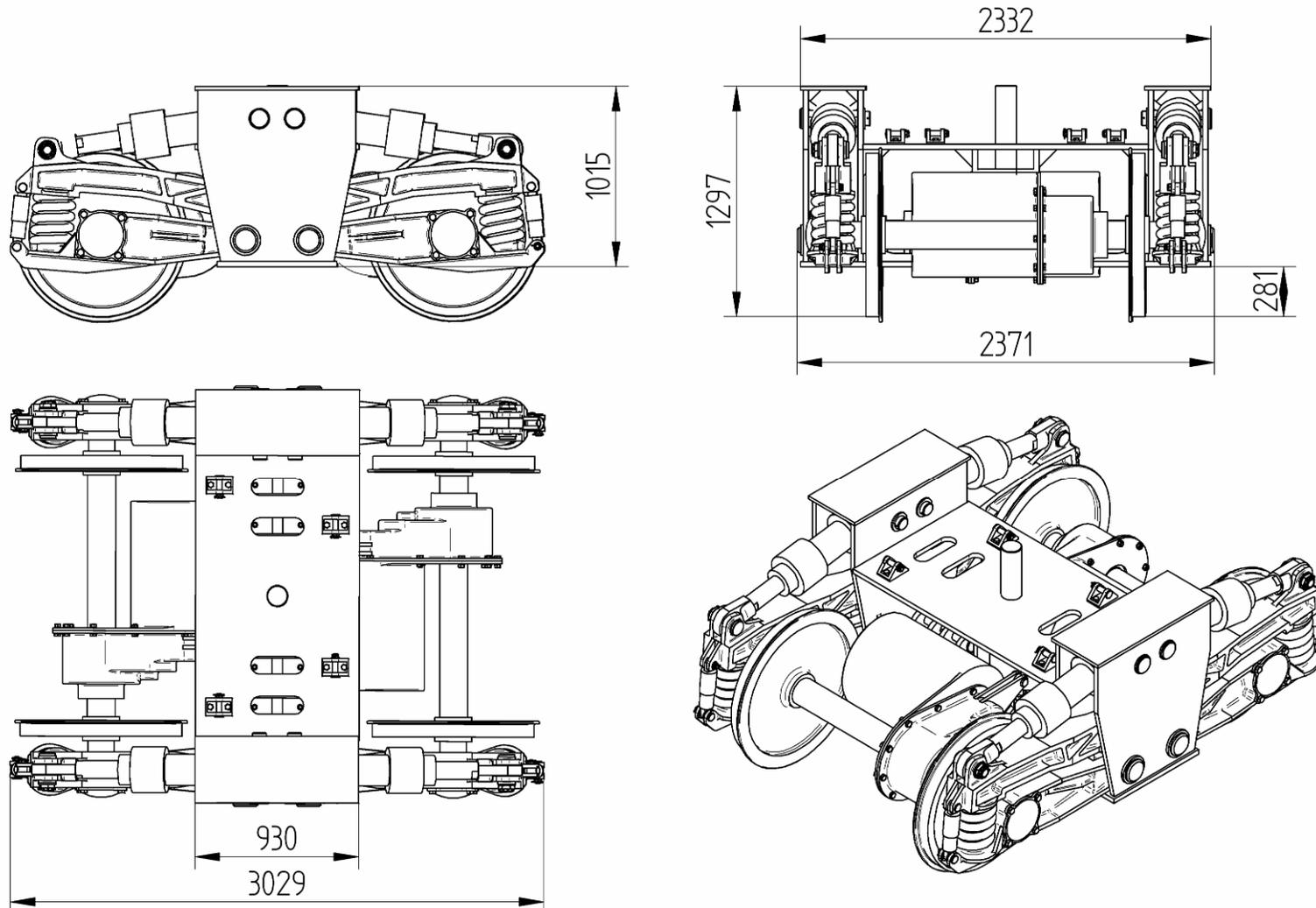
205	Roulement à billes	4	4	16	SKF 160-220-28
206	Bielle	2	6,2	12,4	moulé
208	Tube support étriers	2	2,3	4,6	standard
<b>SUSPENSION</b>					
301	Bras principal	4	187	748	usiné
302	tige vérin	4	30	120	Fournisseur
303	corps vérin	4	65	260	Fournisseur
304	embout tige	4	2	8	Fournisseur
305	bras supérieur	4	257	1028	moulé
306	amortisseur	4	15	60	Fournisseur
307	ressort	4	35	140	formé
308	Bouchon	4	12	48	moulé
<b>Masse totale (kg) :</b>				<b>7912,372</b>	

## Autres

Ces sous-assemblages ne font pas réellement partie de l'étude car ne faisant pas partie du bogie mais leur présence est nécessaire pour le dimensionnement géométrique des différents éléments des bogies.

<b>AUTRES</b>				
Référence	Désignation	Nombre	Masse unitaire (kg)	Masse totale (kg)
<b>BALANCELLE BASSE</b>				
4	Rotule	1	8,25	8,25
5	Bras balancelle	1	46	46
6	Bouchon rotule	2	2,5	5
7	Cylindre balancelle	2	60	120
8	Balancelle basse	1		0
12	Bras balancelle fixe	1		0
306	amortisseur	4	15	60
<b>BALANCELLE HAUTE</b>				
4	Rotule	1	8,25	8,25
5	Bras balancelle	1	46	46
6	Bouchon rotule	2	2,5	5
7	Cylindre balancelle	2	60	120
9	Balancelle haute	1		0
12	Bras balancelle fixe	1		0
306	amortisseur	4	15	60
<b>ATTELAGE</b>				
5	Bras balancelle	2	46	92
10	Tube attelage	1	125	125

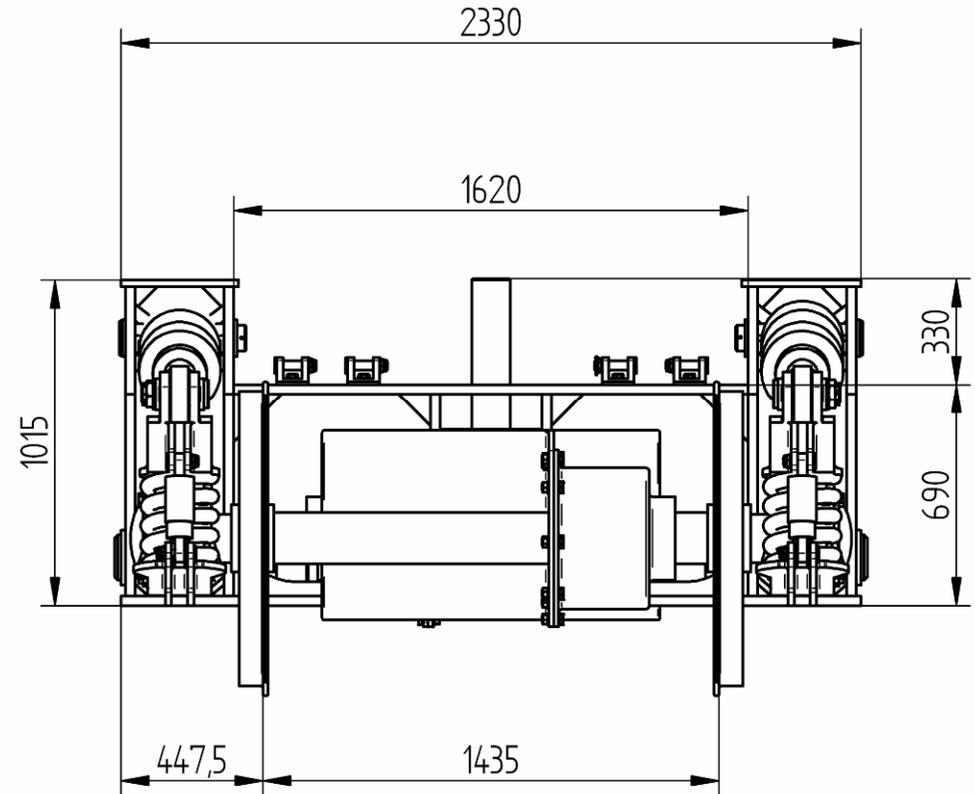
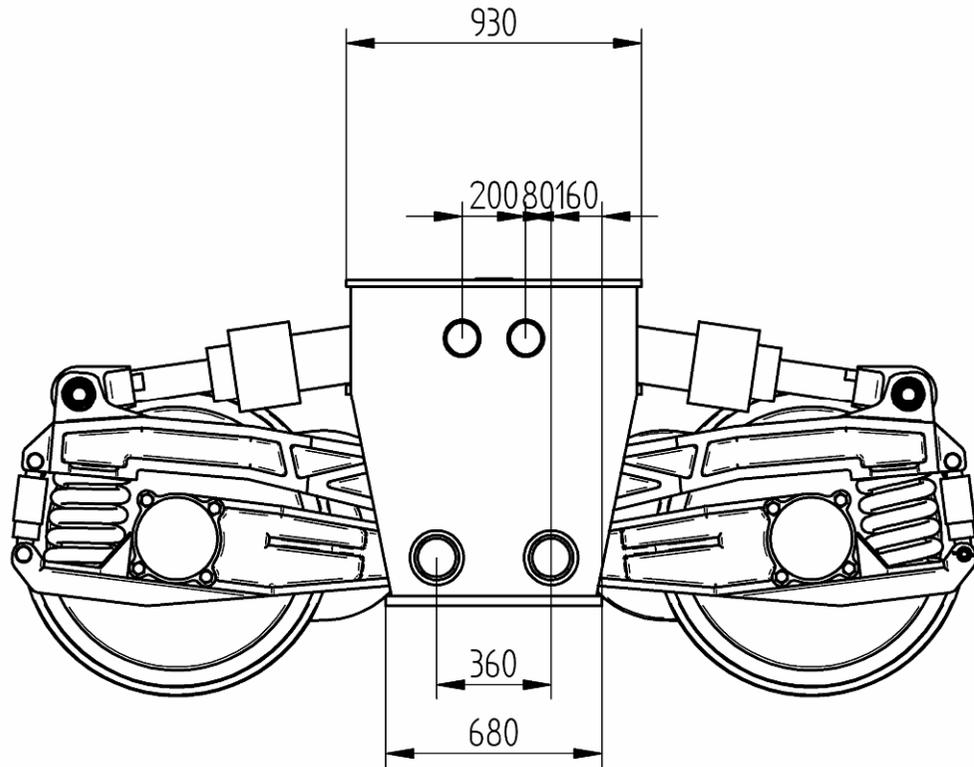
ANNEXE 15 : DIMENSIONS HORS TOUT DU BOGIE ET DU CHASSIS





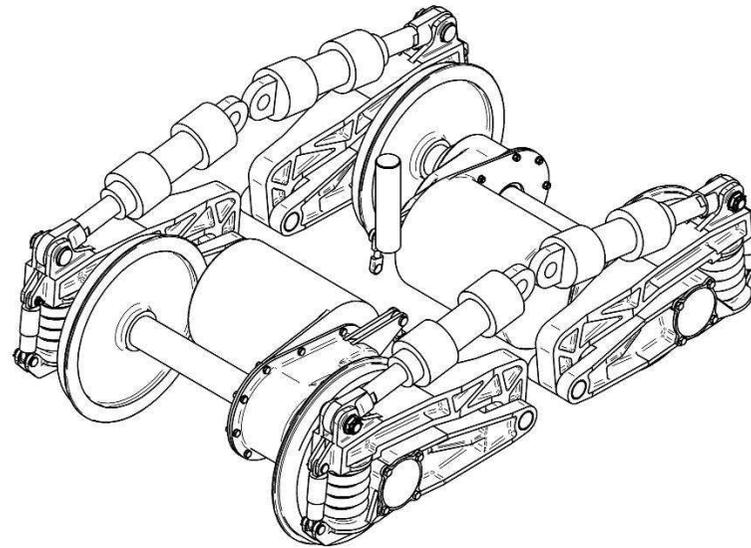
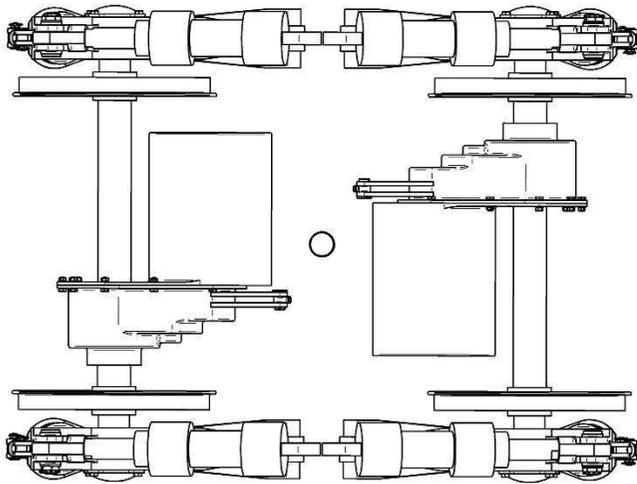
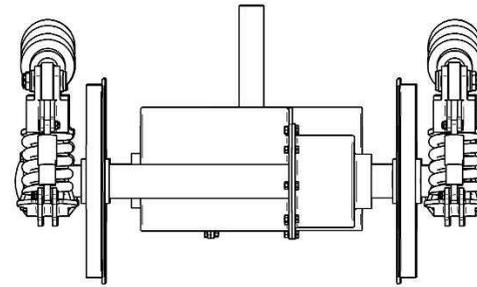
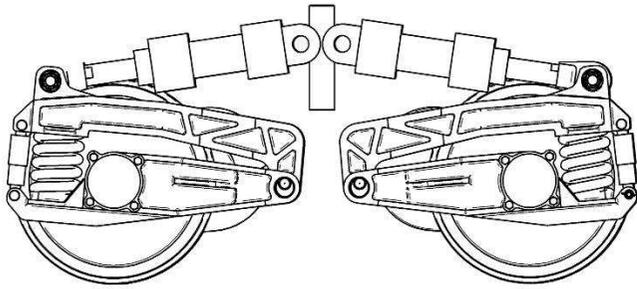
*Rapport final*





## ANNEXE 16 : REPRESENTATIONS 3D DES BOGIES

Bogie freiné sans le châssis



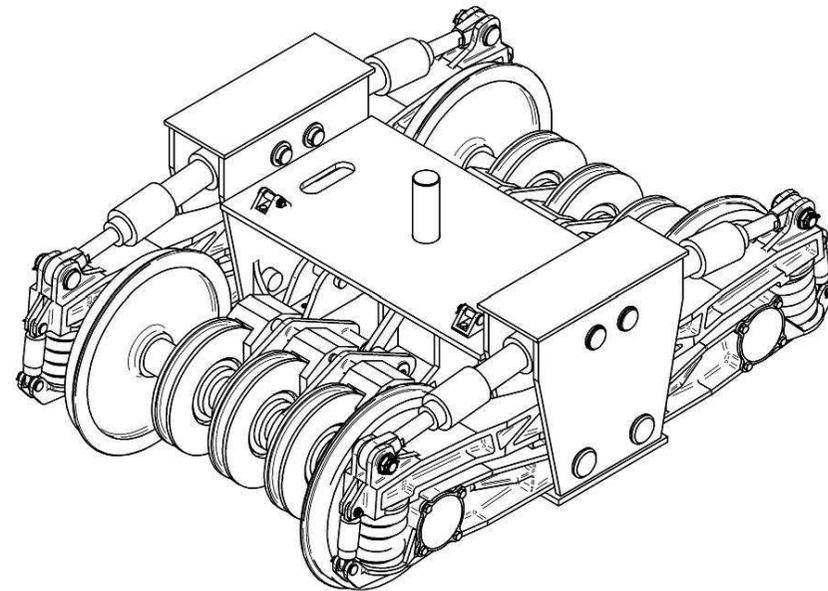
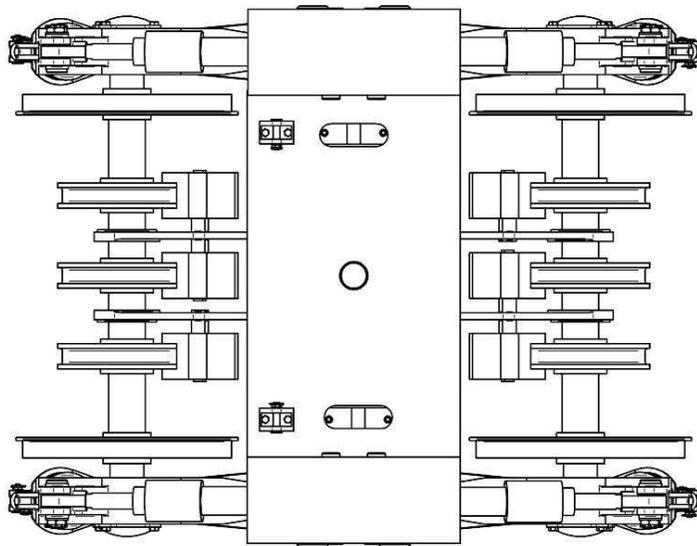
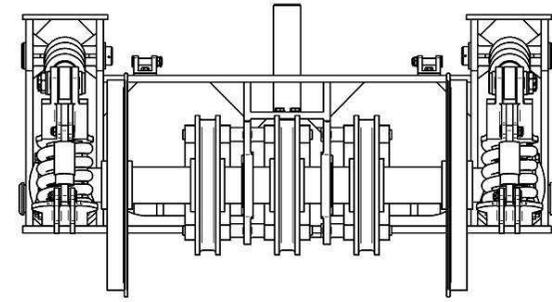
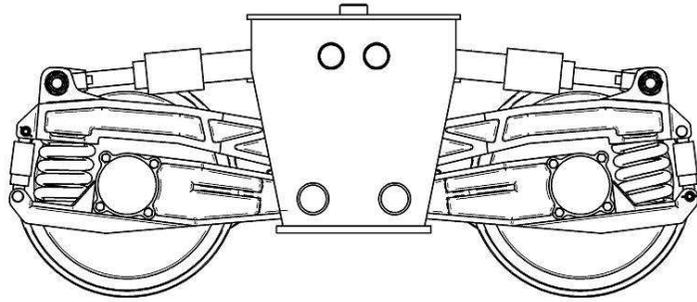


*Rapport final*



Bogie moteur



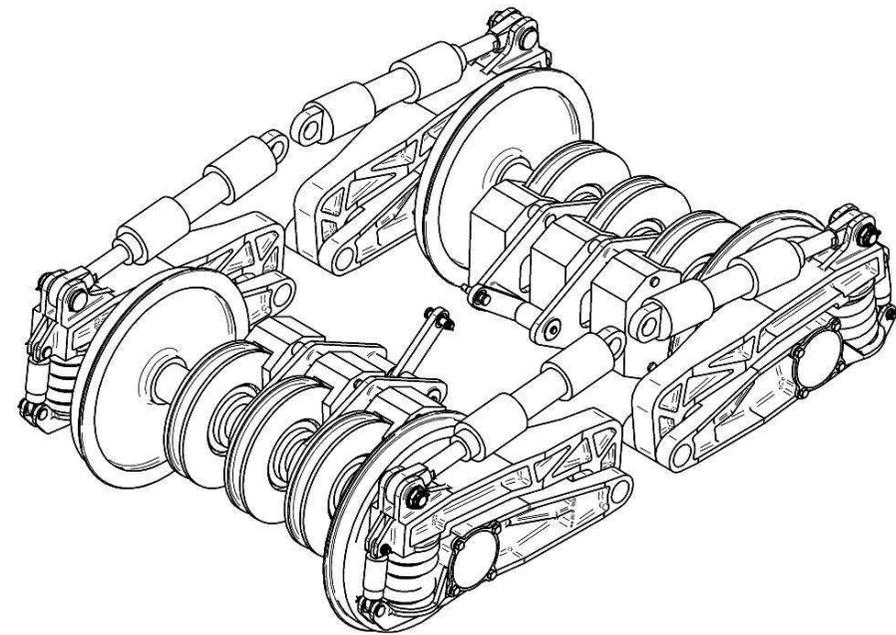
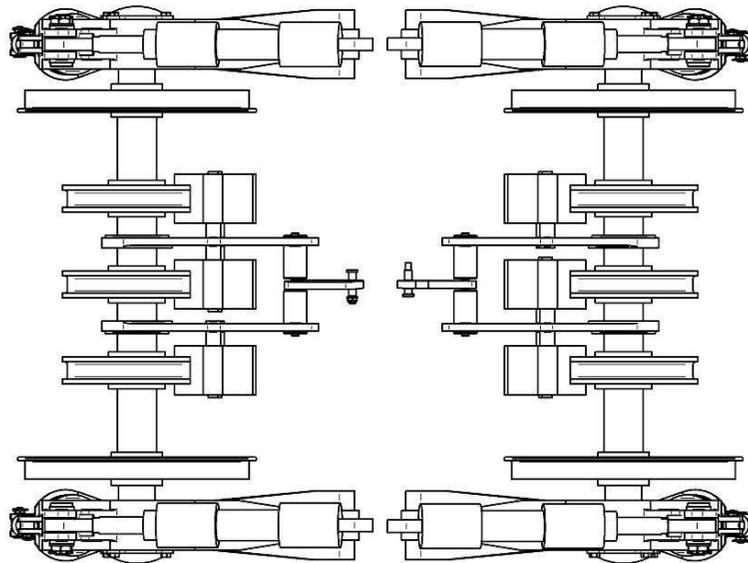
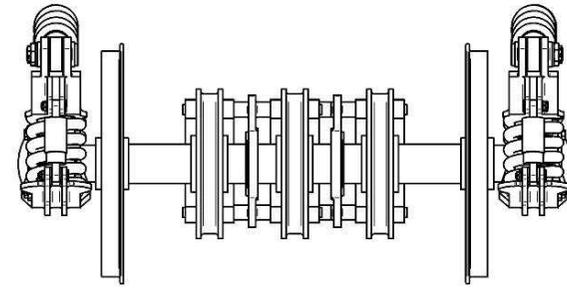
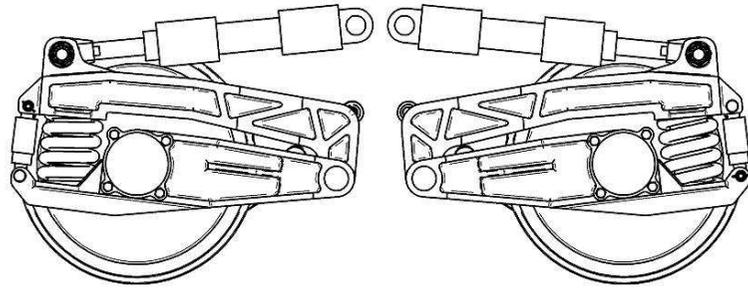




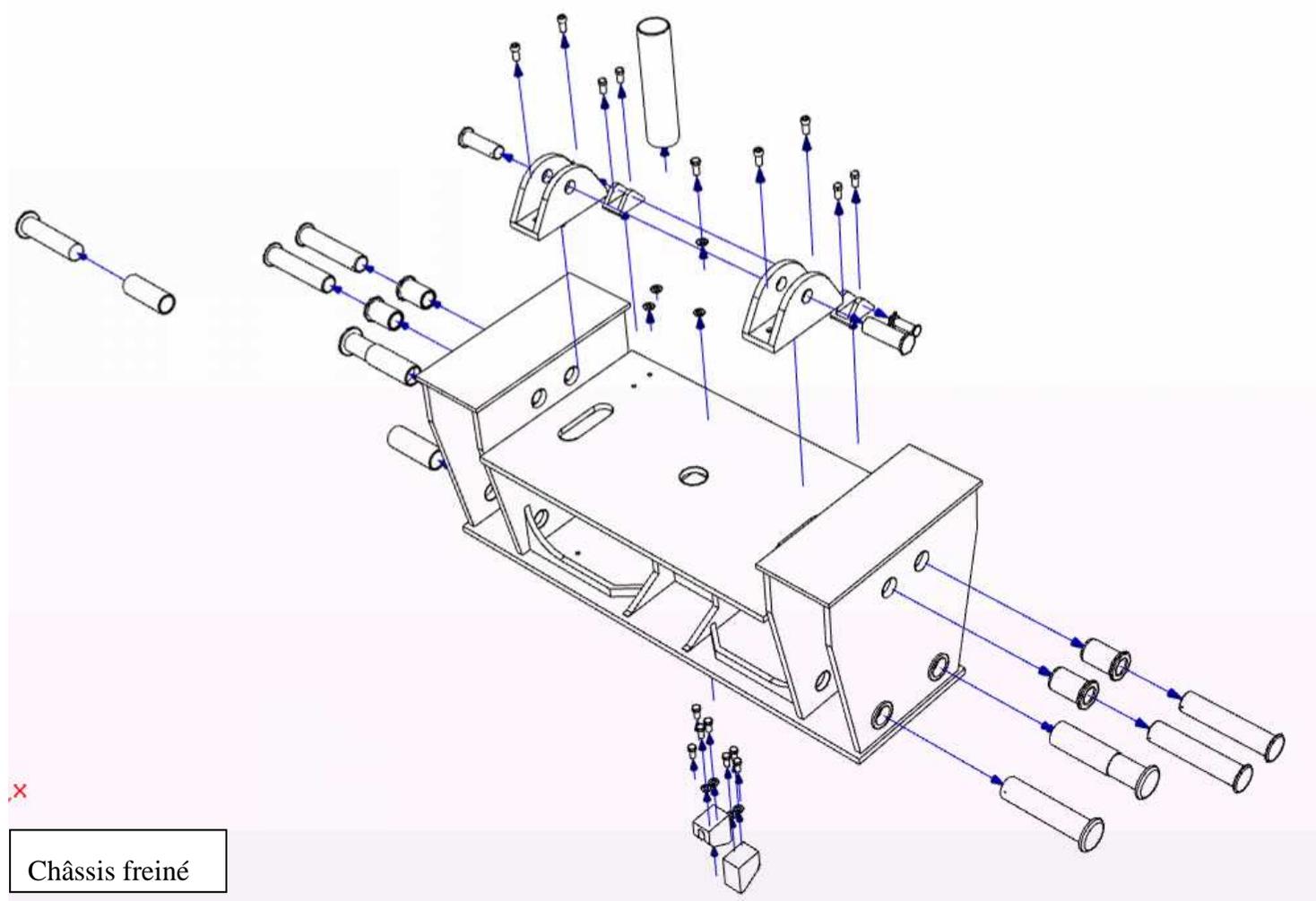
*Rapport final*



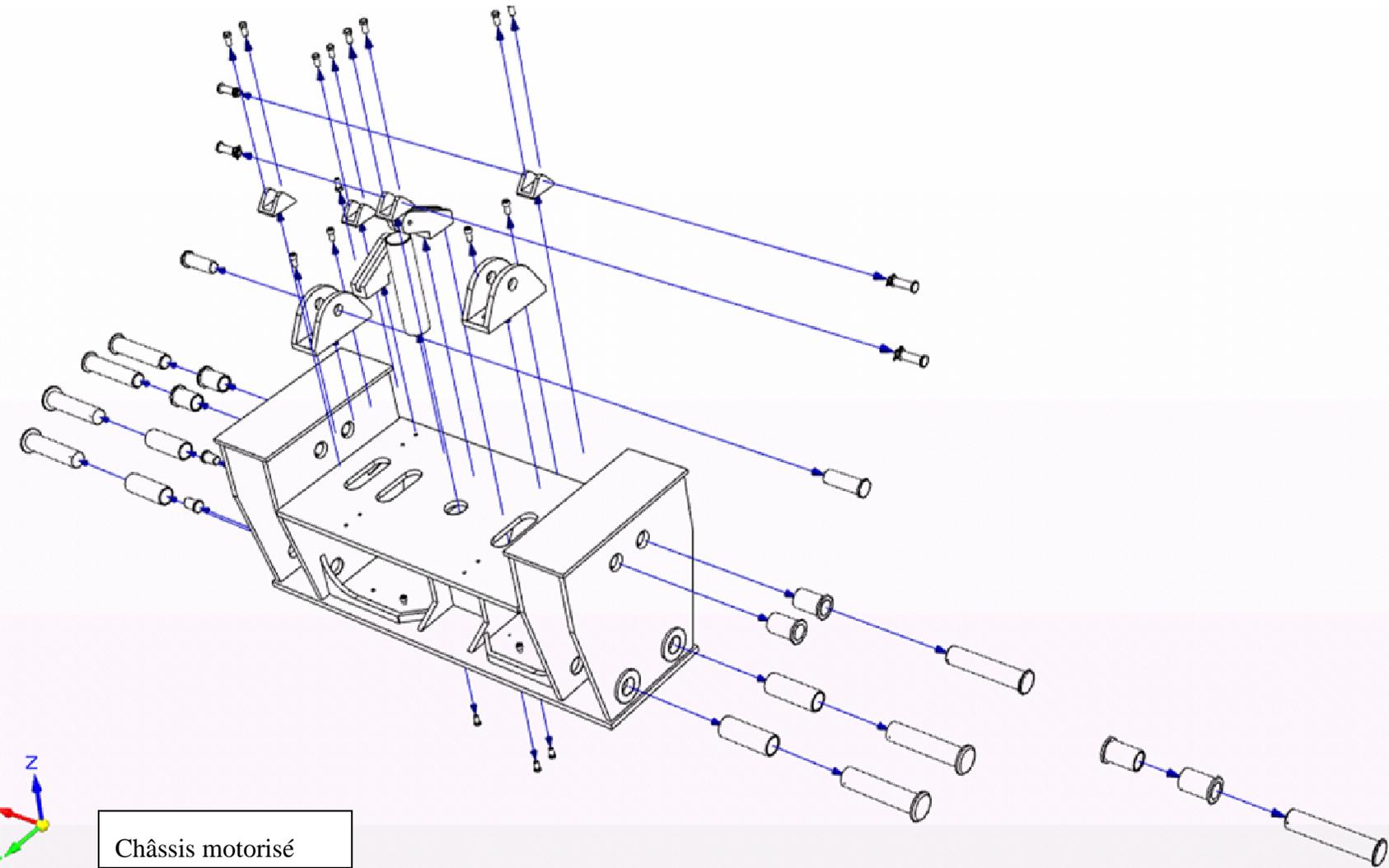
Bogie freiné sans châssis



Eclatés



Châssis freiné





*Rapport final*

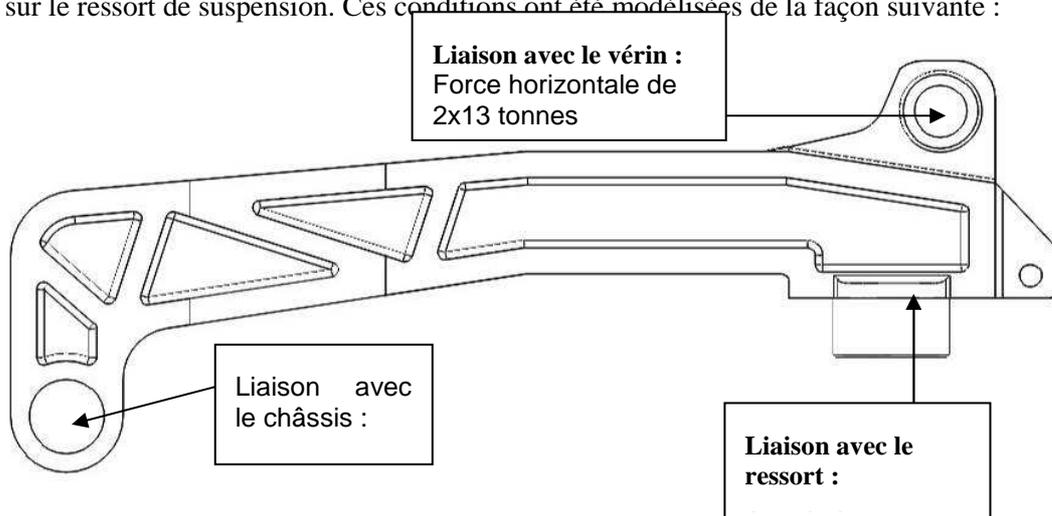


## ANNEXE 17 : RESULTATS DES SIMULATIONS PAR ELEMENTS FINIS

Les trois principales pièces du bogie ont été étudiées par éléments finis. Il s'agit du bras supérieur, du bras principal de suspension et du châssis. Cette étude a été menée sur la première version de la maquette numérique. Les pièces en questions ont été modifiées notamment à la suite des résultats issus de ce premier pré-dimensionnement. Cette étude a été réalisée avec le logiciel FEMAP qui utilise le code de calcul NASTRAN. Il est à noter qu'il ne s'agit que d'une pré-étude des pièces (pas d'optimisation du maillage, choix d'éléments tétraédriques...) ayant pour but de valider la géométrie des pièces et non pas de les optimiser.

### Bras supérieur

Le bras supérieur est en liaison pivot avec le châssis et avec la tige du vérin hydraulique. De plus, il est en appui sur le ressort de suspension. Ces conditions ont été modélisées de la façon suivante :



Les résultats du maillage sont les suivants :

-- TETRAHEDRAL MESH QUALITY  
 WORST ELEMENT QUALITY 11.74139

#### TET QUALITY TABLE

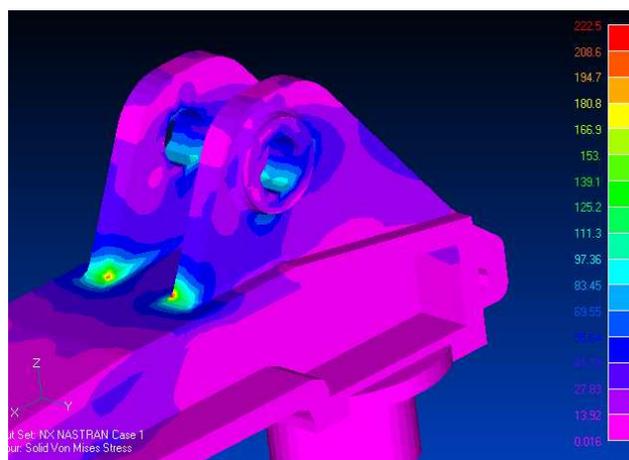
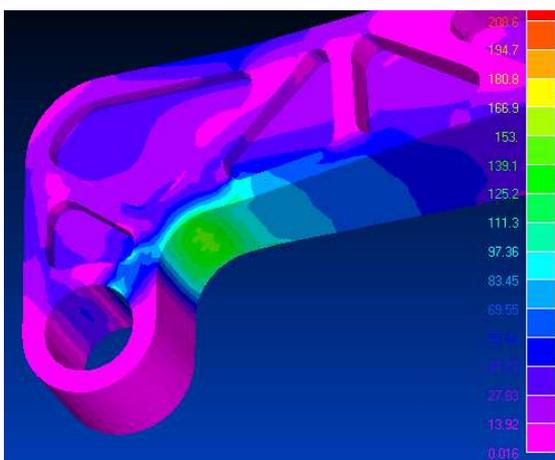
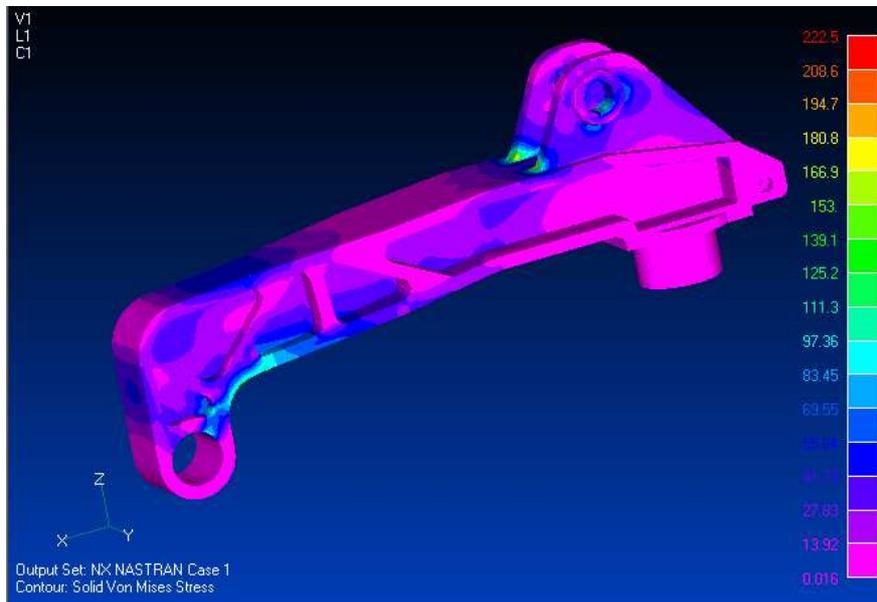
1 < Q < 2	89%	43968 ELEMENTS
2 < Q < 3	9%	4766 ELEMENTS
3 < Q < 4	0%	110 ELEMENTS
4 < Q < 5	0%	17 ELEMENTS
5 < Q < 6	0%	13 ELEMENTS
6 < Q < 7	0%	9 ELEMENTS
7 < Q < 8	0%	2 ELEMENTS

8 < Q < 9 0% 4 ELEMENTS  
 9 < Q < 10 0% 6 ELEMENTS  
 10. < Q < 100. 0% 2 ELEMENTS

-- STORING MESH

TOTAL NUMBER OF NODES 13674  
 NUMBER OF TETRAHEDRA 48897

Résultat de la simulation :



Zones à surveiller

D'après la simulation, il y a deux zones à surveiller. La première se trouve près de la liaison pivot avec le châssis et la contrainte maxi y est de 150MPa environ (contrainte de Von Misses). La deuxième se trouve au niveau de la jonction entre les supports de la liaison avec le vérin et le corps principal de la pièce. La contrainte maximale y est de 222.5MPa. Cependant, cette concentration de contrainte est aussi due au maillage de la pièce qui a pu présenter un défaut dans cette zone.

De plus, il pourrait être judicieux de refaire une simulation en modélisant le contact avec le ressort d'une manière plus fine qu'avec une liaison appui-plan. En effet, cette liaison augmente considérablement la surface de contact par rapport à la réalité ce qui réduit les contraintes localement.

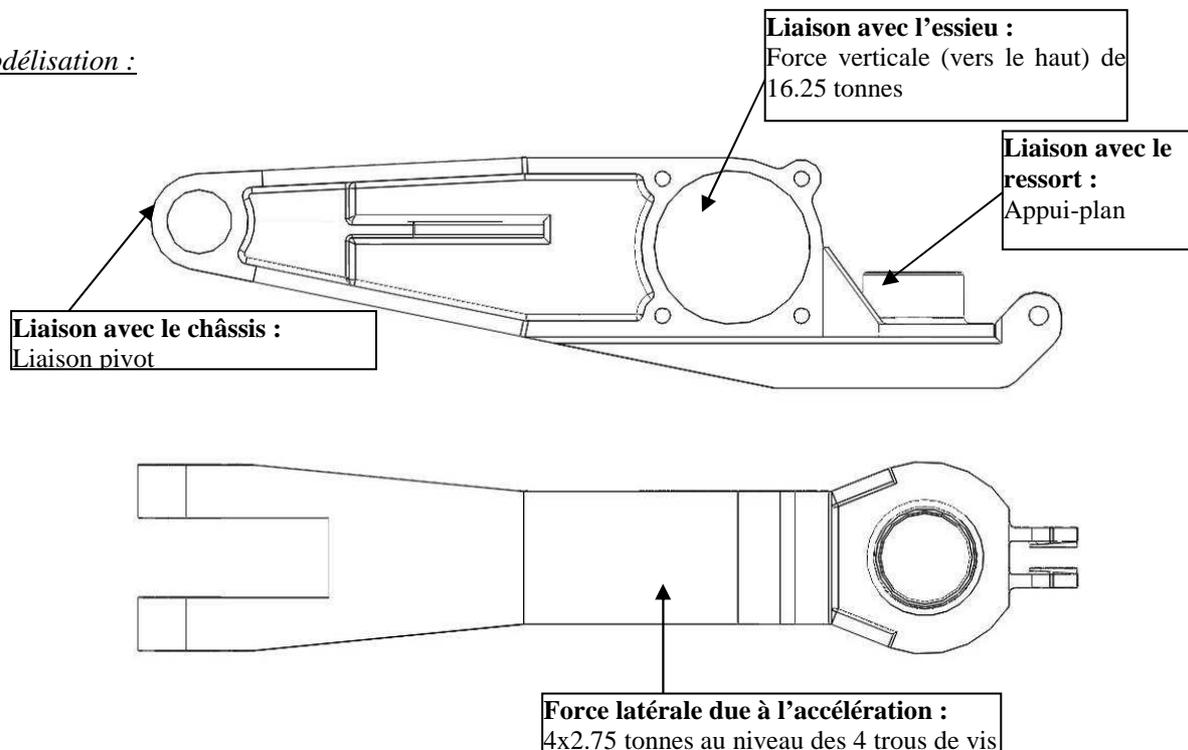
Choix d'un matériau pour la pièce :

Avec un coefficient de sécurité de 2.6, il faut choisir un matériau ayant une limite élastique de 400MPa environ (en négligeant le point localisé de la contrainte maxi). Comme cette pièce est moulée, une fonte à graphite sphéroïdale de type EN-GJS-700 peut convenir.

**Bras principal**

Le bras principal de suspension est en liaison pivot avec le châssis et avec l'essieu. Il reçoit également l'appui du ressort de suspension. La charge par essieu maximale (32.5T) fournit la valeur de l'effort à placer dans la liaison pivot avec l'essieu. De plus, lors d'un choc latéral, la force créée par l'inertie du wagon est transmise au bras par l'intermédiaire du bouchon qui bloque le déplacement du roulement rotule de l'essieu. Cette force est à prendre en compte dans la simulation.

Modélisation :



Les résultats du maillage sont les suivants :

-- TETRAHEDRAL MESH QUALITY

WORST ELEMENT QUALITY 26.41174

TET QUALITY TABLE

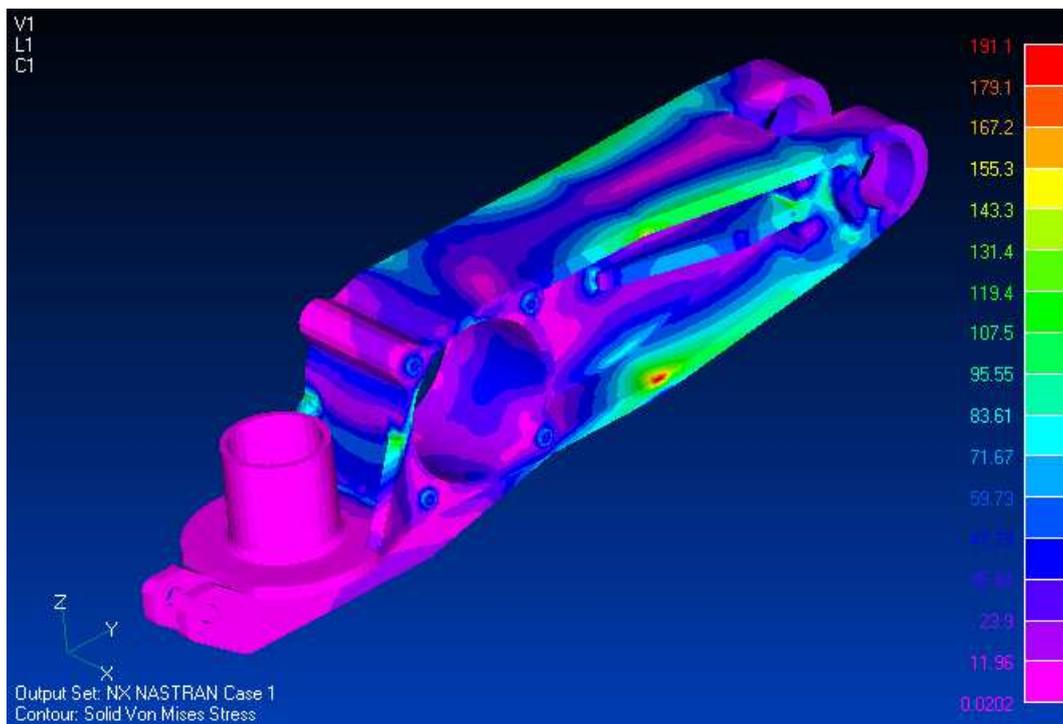
1 < Q < 2	85%	28633 ELEMENTS
2 < Q < 3	12%	4140 ELEMENTS
3 < Q < 4	1%	417 ELEMENTS
4 < Q < 5	0%	53 ELEMENTS
5 < Q < 6	0%	11 ELEMENTS
6 < Q < 7	0%	3 ELEMENTS
7 < Q < 8	0%	1 ELEMENTS
8 < Q < 9	0%	13 ELEMENTS
9 < Q < 10	0%	21 ELEMENTS
10. < Q < 100.	0%	17 ELEMENTS

-- STORING MESH

TOTAL NUMBER OF NODES 10663

NUMBER OF TETRAHEDRA 33309

Résultat de la simulation :



Les contraintes les plus élevées dans cette pièce sont dues à l'accélération latérale qui tend à la faire fléchir sur le côté. La contrainte la plus élevée est de 191MPa (contrainte de Von Mises), elle est très localisée et provient surtout du manque de qualité locale du maillage. La contrainte maxi réelle à prendre en compte est d'environ 150MPa.

Cependant, comme pour le bras supérieur, il pourrait être utile de modéliser le contact avec le ressort de manière plus précise car la modélisation actuelle induit des contraintes non conformes à la réalité dans cette zone.

Choix d'un matériau pour la pièce :

Avec un coefficient de sécurité de 2.6, il faut choisir un matériau ayant une limite élastique de 400MPa environ (en négligeant le point localisé de la contrainte maxi). Comme cette pièce est moulée, une fonte à graphite sphéroïdale de type EN-GJS-700 peut convenir.

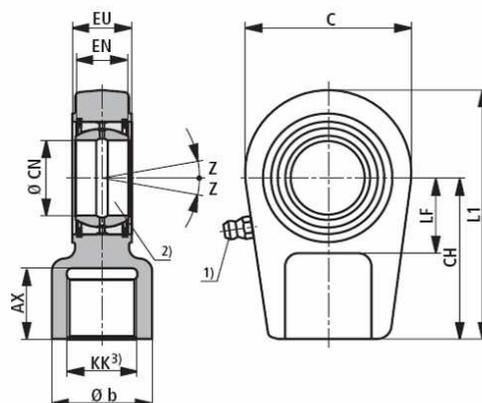
Extrait Documentation technique vérin Bosch Rexroth CDH3 MP5 125-90 :



**Sections, forces, débit**

piston	tige de vérin	rapport surfaces	section			force à 350 bar <sup>1)</sup>			débit à 0,1 m/s <sup>2)</sup>		
			piston	tige	annulaire	pression	diff.	traction	déploiement	diff.	rentrée
AL Ø mm	MM Ø mm	$\varphi$ $A_1/A_3$	$A_1$ cm <sup>2</sup>	$A_2$ cm <sup>2</sup>	$A_3$ cm <sup>2</sup>	$F_1$ kN	$F_2$ kN	$F_3$ kN	$q_{V1}$ L/min	$q_{V2}$ L/min	$q_{V3}$ L/min
40	28	1,96	12,56	6,16	6,40	43,96	21,56	22,40	7,5	3,7	3,8
50	36	2,08	19,63	10,18	9,45	68,71	35,63	33,08	11,8	6,1	5,7
63	45	2,04	31,17	15,90	15,27	109,10	55,65	53,45	18,7	9,5	9,2
80	56	1,96	50,26	24,63	25,63	175,91	86,21	89,71	30,2	14,8	15,4
100	70	1,96	78,54	38,48	40,06	274,89	134,68	140,21	47,1	23,1	24,0
125	90	2,08	122,72	60,62	59,10	429,52	222,67	206,85	73,6	38,2	35,4
140	100	2,04	153,94	78,54	75,40	538,79	274,89	263,90	92,4	47,1	45,3
160	110	1,90	201,08	98,00	106,60	700,71	352,71	371,00	120,6	57,0	63,6
180	125	1,93	254,47	122,72	131,75	890,65	429,52	461,13	152,7	73,6	79,1
200	140	1,96	314,16	153,96	160,20	1099,56	538,86	560,70	188,5	92,4	96,1
220	160	2,12	380,1	201,0	179,1	1330,5	703,7	626,8	228,1	120,7	107,4
250	180	2,08	490,8	254,4	236,4	1718,1	890,6	827,4	294,5	152,7	141,8
280	200	2,04	615,7	314,1	301,6	2155,1	1099,6	1055,6	369,4	188,5	180,9
320	220	1,90	804,2	380,1	424,2	2814,9	1330,5	1484,4	482,5	228,1	254,4

Ø AL 40 - 250 mm



AL Ø	type	référence	AX	b	C	CH	CN	EN	EU - 0,4	KK	L1	LF	Z	m <sup>4)</sup> kg
40	CGA 22	R900303126	23	34	64	60	30 <sub>-0,010</sub>	22 <sub>-0,12</sub>	28	M22x1,5	94	30	7°	0,7
50	CGA 28	R900303127	29	44	78	70	35 <sub>-0,012</sub>	25 <sub>-0,12</sub>	30	M28x1,5	112	40	7°	1,1
63	CGA 35	R900303128	36	55	94	85	40 <sub>-0,012</sub>	28 <sub>-0,12</sub>	35	M35x1,5	135	45	7°	2,0
80	CGA 45	R900303129	46	70	116	105	50 <sub>-0,012</sub>	35 <sub>-0,12</sub>	40	M45x1,5	168	55	7°	3,3
100	CGA 58	R900303130	59	87	130	130	60 <sub>-0,015</sub>	44 <sub>-0,15</sub>	50	M58x1,5	200	65	7°	5,5
125	CGA 65	R900303131	66	93	154	150	70 <sub>-0,015</sub>	49 <sub>-0,15</sub>	55	M65x1,5	232	75	6°	8,6
140	CGA 80	R900303132	81	125	176	170	80 <sub>-0,015</sub>	55 <sub>-0,15</sub>	60	M80x2	265	80	6°	12,2
160	CGA100	R900303133	101	143	206	210	90 <sub>-0,020</sub>	60 <sub>-0,20</sub>	65	M100x2	325	90	6°	21,5
180	CGA110	R900303134	111	153	230	235	100 <sub>-0,020</sub>	70 <sub>-0,20</sub>	70	M110x2	360	105	7°	27,5
200	CGA120	R900303135	125	176	265	265	110 <sub>-0,020</sub>	70 <sub>-0,20</sub>	80	M120x3	407,5	115	6°	40,7
220	CGA120	R900303135	125	176	265	265	110 <sub>-0,020</sub>	70 <sub>-0,20</sub>	80	M120x3	407,5	115	6°	40,7
250	CGA130	R900303136	135	188	340	310	120 <sub>-0,020</sub>	85 <sub>-0,20</sub>	90	M130x3	490	140	6°	76,4
280	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
320	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## **ANNEXE 18 : ABREGES BREVETS**

### **ANNEXE 18.1 : ABREGE BREVET REPRISE DE CHARGE**

L'invention dénommée « reprise et immobilisation - par la cheville ouvrière - d'une remorque routière sur un wagon » est destinée comme son nom l'indique à immobiliser des remorques routières sur des trains pendant les déplacements de ce dernier. Elle est constituée d'un système mécanique, solidaire du wagon et d'un sous-ensemble mobile solidarisé à chaque remorque, pendant le temps de son transfert par le rail. L'ensemble se répétera autant de fois qu'il y aura de wagon sur le train et de remorque à embarquer.

### **ANNEXE 18.2 : ABREGE BREVET PORTE CONTENEUR**

L'invention dénommée « Remorque porte conteneur ou porte caisse mobile disposant de l'outillage nécessaire à la manipulation de son chargement » a pour fonction de rendre la remorque indépendante pour son chargement/déchargement de son environnement ; elle est destinée à être utilisée dans les gares ferroviaires ou sur les quais d'usines. Sa mise en œuvre (pour la prise ou la dépose d'un conteneur ou de la caisse mobile) est assurée par la seule intervention du chauffeur.