Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est

École doctorale VTT

Laboratoire : GRETTIA et LTN (IFSTTAR)

Spécialité : Transport

Le choix d'un système de transport durable : analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface

présentée et soutenue publiquement par

Jeong-hwa AN

le 11 avril 2011

Membres du jury :

François Badin	directeur de recherche de l'IFP,	rapporteur
Pierre Zembri	professeur à l'Université de Cergy-Pontoise,	rapporteur
E. Dupont Kerlan	CGEDD, Collège de recherche et technologie,	examinateur
Patrice Aknin	directeur de recherche de l'IFSTTAR,	examinateur
Francis Kühn	expert auprès de CERTIFER,	examinateur
J. Laterrasse	professeur à l'Université Paris-Est,	directeur de thèse
G. Coquery	directeur de recherche à l'IFSTTAR,	directeur de thèse

Remerciements

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à mes directeurs de thèse, Monsieur Gérard Coquery et Monsieur Jean Laterrasse, d'avoir accepté de diriger ma thèse après m'avoir orienté sur un sujet intéressant et d'actualité en me consacrant une partie de leur temps pour me rappeler la rigueur scientifique et m'assister de leurs précieux conseils qui ont fait progresser cette thèse.

J'associe tout particulièrement à ces remerciements Monsieur Francis Kühn pour m'avoir encadré et guidé tout au long de ces années vers le monde des transports en me prodiguant ses conseils constructifs, pour sa connaissance des systèmes de transport guidés et aussi pour sa grande disponibilité et sa patience à corriger mes erreurs.

Mes remerciements très sincères à Monsieur François Badin et Monsieur Pierre Zembri qui ont accepté d'être rapporteurs en vue de la soutenance de ma thèse pour leurs remarques constructives et leurs conseils judicieux sur le manuscrit, et aussi pour avoir bien voulu fournir leur rapport dans des délais très contraints.

J'aimerais également remercier Madame Élisabeth Dupont Kerlan qui a accepté de participer au jury et d'y apporter la vision et l'expertise des services de l'Etat.

Ma gratitude va aussi à Monsieur Patrice Aknin, également membre du jury, ainsi qu'à l'ensemble des membres du GRETTIA (anciennement LTN de l'INRETS) qui m'ont aidé lors de la réalisation de cette thèse et m'ont soutenu au quotidien, à tous les collègues de l'IFSTTAR, et en particulier, à M. Carlos De-Melo du service de reprographie.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont consacré leurs temps lors de mes différentes visites de réseaux de transport urbain, des AOT et du GART, qui m'ont fourni des informations et des données sur leurs réseaux de transport sans lesquelles je n'aurais pas pu réaliser ma thèse. J'ai pu apprécier la pertinence de leurs réponses et l'intérêt des réflexions dont ils ont bien voulu me faire part.

Je remercie en particulier M. Pierre Debano expert des systèmes de transport urbain qui m'a aidé dans la complétude des données de coût d'exploitation des différents systèmes de transport étudiés, M. Sylvain Zalkind, Président du COPEF qui a organisé plusieurs visites de réseaux de transport urbain en Allemagne auxquelles j'ai participé, Mme Odile Heddebaut, chargée de recherche au DEST et François Rambaud du CERTU qui m'ont invité à participer au projet COST relatif au projets en cours de BHNS. Ces contacts et ces rencontres m'ont beaucoup appris sur les enjeux du transport et m'ont donné l'envie de me lancer définitivement dans la recherche sur les transports.

Pour terminer, je remercie ma famille qui est ma raison de vivre, plus particulièrement mon épouse Dae-Young.

Résumé

Le choix d'un système de transport guidé de surface exploité en site propre (TCSP) est un travail complexe et difficile. Les différents systèmes peuvent sembler offrir des services équivalents pour les utilisateurs tandis que manquent souvent les informations nécessaires pour mieux distinguer les différences entre tel ou tel système.

L'objectif de cette recherche vise, au-delà d'une présentation des différents systèmes guidés de surface qui structurent les réseaux de transport public en France, à procéder à une analyse comparative afin de mieux guider les choix des collectivités territoriales, dans le contexte des efforts qu'elles conduisent pour promouvoir des transports urbains répondant aux enjeux du développement durable. Les avantages et points faibles de chaque système est analysé et présenté de manière désagrégé. De manière complémentaire, est proposée et discutée une méthode multicritère ELECTRE III permettant d'agréger les résultats obtenus et de proposer le (ou les) système(s) le(s) mieux adapté(s) à différents contextes d'exploitation.

Le résultat principal met en évidence le fait que le tramway moderne sur fer occupe une place privilégiée dans la majorité des scenarii. Cependant, le CIVIS, le Translohr, TVR et même le trolleybus ont leur place selon le contexte d'exploitation, dès lors en particulier que sont pris en compte les coûts d'infrastructure et d'exploitation associés.

Les résultats de cette recherche nous encouragent en outre à recommander, chaque fois qu'il y a un projet de système de transport de surface, de passer en revue la gamme des systèmes et d'effectuer l'analyse comparative avec les différentes contraintes du lieu et du moment, en y intégrant une vision de moyen et long terme et les effets prévisibles sur l'aménagement urbain.

Mots-clés : analyse comparative, transport en commun en site propre (TCSP), système de transport guidé de surface, ELECTRE, coût d'infrastructure, coût d'exploitation, tramway moderne sur fer, Translohr, TVR, CIVIS, trolleybus, autobus

Abstract

The choice of a guided surface transit system operated on separated RoW is a complex and difficult task. Even if different transit systems could provide equivalent services to users, we often lack the necessary information to better distinguish among different systems.

Beyond giving a presentation of different surface guided systems structuring the public transport networks in France, the aim of this research is to conduct a comparative analysis in order to better guide decisions of local authorities in their efforts to promote urban transport that meets the challenges of sustainable development. The advantages and the drawbacks of each system are analyzed and presented in a disaggregated way. In addition, a multicriteria method ELECTRE III is proposed and discussed for aggregating the results and proposing system(s) best suited for different operating conditions.

The main result shows that the modern tramway on rail occupies a privileged place in most scenarios. However, the CIVIS, Translohr, TVR and even trolleybuses have their places with respect to operating conditions, given that the related infrastructure and operating costs are taken into account.

The results of this research therefore encourage us to recommend, every time we propose a surface transit system, to review the whole range of systems and to do the comparative analysis with different context and time constraints integrating mid-term and long-term visions and predictable effects on the urban requalification.

Keywords: comparative analysis, public transit system on separated Right-of-Way, guided surface transit system, ELECTRE, capital and operating costs, modern tramway (Light Rail Transit), Translohr, TVR, CIVIS, trolleybus, bus

Sommaire

INTRODUCTION **21**

CHAPITRE I : ENJEUX ACTUELS DU TRANSPORT ET LES PROBLEMES LIES A SON EVALUATION **31**

1. DEFINITION DES TERMES DU TRANSPORT **31**

1.1. HISTOIRE DU TRANSPORT EN COMMUN 31
1.2. TRANSPORTS EN COMMUN EN SITE PROPRE (TCSP) 32

2. L'EMERGENCE DU CONCEPT DE DEVELOPPEMENT DURABLE **36**

3. ENJEUX ACTUEL DU TRANSPORT : LE TRANSPORT « DURABLE » **37**

4. ÉVALUATION ET CHOIX DES SYSTEMES DE TRANSPORT **40**

4.1. ANALYSE COUTS/AVANTAGES 41
4.1.1. Principes de l'analyse coûts/avantages 41
4.1.2. Critiques de l'analyse coûts/avantages 42
4.2. RECOMMANDATION DU CERTU POUR LE CHOIX DU TCSP 45
4.2.1. Problèmes liés à la recommandation du Certu 46
4.3. DEMARCHE PROPOSEE 47

CHAPITRE II : METHODES D'ANALYSE MULTICRITERE **51**

1. **METHODES DE CHOIX** **51**

1.1. METHODES BASIQUES (ELEMENTAIRES) 51
1.1.1. Méthode catégorique (Timmermans 1986) 51
1.1.2. Méthode de la somme pondérée (Timmermans 1986) 52
1.1.3. Méthode du « Maxmin » (Guitouni et Martel 1998) 52
1.2. METHODES D'OPTIMISATION MATHEMATIQUE MULTICRITERE 53
1.2.1. Goal programming 53
1.2.2. Méthode du critère global (Vincke 1989) 54
1.2.3. Méthode ε-Contrainte (Festa, Grandinetti et al. 2010) 54
1.2.4. Programmation mathématique à objectifs multiples (Zopounidis et Pardalos 2010) 55
1.3. METHODE D'ANALYSE MULTICRITERE : LES METHODES D'AIDE A LA DECISION MULTICRITERE 55
1.3.1. Rappels 56
1.3.2. Méthode d'agrégation complète : approche du critère unique de synthèse 57
1.3.2.1. TOPSIS : Technique for Order by Similarity to Ideal Solution (Hwang et Yoon 1981) 57
1.3.2.2. SMART : Simple Multi-Attribute Rating technique (Edwards 1971) 58
1.3.2.3. MAVT : Multiple Attribute Value Theory (Keeney et Raifa 1976) 58
1.3.2.4. MAUT : Multiple Attribute Utility Theory (Keeney et Raifa 1976) 59
1.3.2.5. UTA : Utility Theory Additive (Jacquet-Lagreze, Meziani et al. 1987) 60
1.3.2.6. AHP : Analytic Hierarchy Process (Saaty 1980) 62
1.3.3. Méthode d'agrégation partielle: approche de surclassement de synthèse 63
1.3.3.1. PROMETHEE (Brans, Vincke et al. 1986) 63
1.3.3.2. ELECTRE (Roy 1985) 65

2. CHOIX D'UNE METHODE ELECTRE **75**

2.1. COMMENT EFFECTUER UN CHOIX ? 75
2.2. LIMITE D'UNE APPROCHE TRADITIONNELLE POUR LE CHOIX DU TRANSPORT GUIDE DE SURFACE 75
2.3. AVANTAGES DES METHODES MULTICRITERES 75
2.4. METHODE RETENUE : ELECTRE 76

CHAPITRE III : DESCRIPTION DES SYSTEMES DE TCSP ETUDIES **81**

1. PETITE HISTOIRE DES TRANSPORTS URBAINS **81**

2. TRAMWAY **102**

2.1. TRAMWAY SUR FER « MODERNE » 102
2.1.1. Explication générale 102
2.1.2. Aspect technique 106
2.1.2.1. Les voies d'un tramway moderne 106
2.1.2.2. Revêtement 109
2.1.2.3. Matériels roulants 110
2.1.2.4. Alimentation électrique 114
2.1.3. Aspect économique 116
2.1.4. Aspect urbanistique 118
2.1.4.1. Emprise au sol 118
2.1.4.2. Accessibilité 119
2.2. TRAMWAY SUR PNEU : TRANSLOHR 120
2.2.1. Explication générale 120
2.2.2. Aspect technique 121
2.2.2.1. Les voies du Translohr 121
2.2.2.2. Matériels roulants 124
2.2.2.3. Capacité 125
2.2.2.4. Le guidage 125
2.2.3. Aspect économique 126
2.2.4. Aspect urbanistique 126
2.2.4.1. Emprise au sol 126
2.2.4.2. Accessibilité 128

3. BHNS « BUS A HAUT NIVEAU DE SERVICE » **129**

3.1. TVR 129
3.1.1. Explication générale 129
3.1.2. Aspect technique 131
3.1.2.1. Les voies de TVR 131
3.1.2.2. Matériels roulants 134
3.1.2.3. Guidage 135
3.1.2.4. Traction électrique 137
3.1.3. Aspect économique 137
3.1.4. Aspect urbanistique 137
3.1.4.1. Emprise au sol 137
3.1.4.2. Accessibilité 138
3.2. AUTOBUS AVEC GUIDAGE OPTIQUE : « CIVIS » 139
3.2.1. Explication générale 139
3.2.2. Aspect technique 139
3.2.2.1. Matériels roulants 139
3.2.2.2. Guidage optique 139
3.2.3. Aspect économique 142
3.2.4. Aspect urbanistique 143
3.2.4.1. Emprise au sol 143
3.2.4.2. Accessibilité 144
3.3. AUTOBUS AVEC GUIDAGE MAGNETIQUE : « PHILEAS » 145
3.3.1. Explication générale 145
3.3.2. Aspect technique 146
3.3.2.1. Infrastructure pour Phileas 146
3.3.2.2. Matériels roulants 149
3.3.3. Aspect économique 151
3.3.4. Aspect urbanistique 152
3.3.4.1. Emprise au sol 152
3.3.4.2. Accessibilité 155
3.4. TROLLEYBUS 156
3.4.1. Explication générale 156
3.4.2. Aspect technique 156
3.4.3. Aspect économique 158
3.4.4. Aspect urbanistique 158

3.5. AUTOBUS 159
3.5.1. Explication générale 159
3.5.2. Aspect technique 159
3.5.2.1. Matériels roulants 159
3.5.2.2. Capacité 163
3.5.2.3. Autobus hybride 164
3.5.2.4. Autobus électrique 165
3.5.3. Aspect économique 166
3.5.4. Aspect urbanistique 166
3.5.4.1. Emprise au sol 167
3.5.4.2. Accessibilité 168

CHAPITRE IV : APPLICATION DE LA METHODE ELECTRE III ET IV 171

1. UTILISATION DE LA METHODE ELECTRE III ET IV **171**

1.1. PROBLEME D'AGREGATION DES DONNEES 171
1.2. ELECTRE III 172
1.3. ELECTRE IV 172

2. GRILLE D'ANALYSE **173**

3. CHOIX DES CRITERES **174**

3.1. CRITERES LIES AUX PERFORMANCES ET AUX SERVICES RENDUS 175
3.1.1. Capacité 175
3.1.2. Fréquence 177
3.1.3. Vitesse commerciale 179
3.1.4. Ponctualité (on-time performance) 180
3.1.5. Emprise au sol 180
3.1.6. Fiabilité 181
3.1.7. Accessibilité 182
3.2. CRITERES LIES AUX COUTS 183
3.2.1. Coûts d'investissement 184
3.2.2. Coûts d'exploitation 189
3.2.2.1. La consommation d'énergie 191
3.3. CRITERES LIES AUX IMPACTS « ENVIRONNEMENTAUX » 192
3.3.1. Émission du gaz à effet de serre 192
3.3.2. Critères urbanistique : image de l'insertion 195

4. PONDERATION DES POIDS **197**

5. RECAPITULATIF DES CRITERES **199**

6. APPLICATION DE LA METHODE ELECTRE III ET IV POUR LE CHOIX D'UN SYSTEME DE TRANSPORT **200**

6.1. APPLICATION DES DONNEES REELLES MOYENNES 200
6.1.1. Tramway 32 m 201
6.1.1.1. Coût d'investissement 201
6.1.1.2. Coût d'exploitation 202
6.1.2. Translohr 202
6.1.2.1. Coût d'investissement 202
6.1.2.2. Coût d'exploitation 203
6.1.3. TVR 203
6.1.3.1. Coût d'investissement 203
6.1.3.2. Coût d'exploitation 204
6.1.4. CIVIS 204
6.1.4.1. Coût d'investissement 204
6.1.4.2. Coût d'exploitation 205
6.1.5. Trolleybus 205
6.1.5.1. Coût d'investissement 205
6.1.5.2. Coût d'exploitation 206
6.1.6. Autobus articulé 206
6.1.6.1. Coût d'investissement 206

6.1.6.2. Coût d'exploitation 207
6.1.7. RESULTATS 211
6.1.7.1. Introduction du poids de référence 213
6.1.7.2. Introduction du poids 1 216
6.1.7.3. Introduction du poids 2 217
6.1.7.4. Introduction du poids 3 218
6.1.7.5. Analyse par la méthode Electre IV 219
6.2. ÉTABLISSEMENT DES SCENARII 220
6.3. SCENARIO 1 222
6.3.1. Hypothèses 222
6.3.1.1. Tramway 32m 223
6.3.1.2. Translohr 32m 225
6.3.1.3. TVR 25m 226
6.3.1.4. CIVIS 18m 228
6.3.1.5. Trolleybus 18m 229
6.3.1.6. Autobus articulé 18m type BHNS 230
6.3.2. Résultat 233
6.3.2.1. Résultat du poids de référence 234
6.3.2.2. Résultat du poids 1 235
6.3.2.3. Résultat du poids 2 236
6.3.2.4. Résultat du poids 3 237
6.4. SCENARIO 2 238
6.4.1. Hypothèses 238
6.4.2. Résultat 241
6.4.2.1. Résultat du poids de référence 243
6.4.2.2. Résultat du poids 1 244
6.4.2.3. Résultat du poids 2 245
6.4.2.4. Résultat du poids 3 246
6.5. SCENARIO 3 247
6.5.1. Hypothèses 247
6.5.2. Résultat 251
6.5.2.1. Résultat du poids de référence 253
6.5.2.2. Résultat du poids 1 254
6.5.2.3. Résultat du poids 2 255
6.5.2.4. Résultat du poids 3 256
6.6. SCENARIO 4 257
6.6.1. Hypothèses 257
6.6.2. Résultat 261
6.6.2.1. Résultat du poids de référence 263
6.6.2.2. Résultat du poids 1 264
6.6.2.3. Résultat du poids 2 265
6.6.2.4. Résultat du poids 3 266
6.7. SYNTHESE DES RESULTATS : DONNEES REELLES ET ANALYSE DES 4 SCENARII 267
6.8. CONCLUSION ET COMMENTAIRE 270

CONCLUSION 277

ANNEXE 283

BIBLIOGRAPHIE 283
RECAPITULATIF DES SYSTEMES DE TRANSPORT GUIDE DE SURFACE 301
CALCUL DU COUT D'EXPLOITATION 303
COUTS D'EXPLOITATION ESTIMES POUR LE SCENARIO 2 347
COUTS D'EXPLOITATION ESTIMES POUR LE SCENARIO 3 353
COUTS D'EXPLOITATION ESTIMES POUR LE SCENARIO 4 359

Liste des figures

FIGURE 1: EXEMPLE DE RECOMMANDATION DU CERTU POUR LE CHOIX DU TCSP 45
FIGURE 2: TYPES DE CRITERES ET FONCTIONS DE PREFERENCE POUR PROMETHEE 64
FIGURE 3: ZONES DE PREFERENCE ET INDIFFERENCE 70
FIGURE 4: DETERMINATION D'UN INDICE DE CONCORDANCE 71
FIGURE 5: DETERMINATION D'UN INDICE DE DISCORDANCE 72
FIGURE 6 : SECTION DU RAIL LOUBAT 19 KG/ML ECH.1/2 83
FIGURE 7 : UN TRAMWAY HIPPOMOBILE DE LA CGO 83
FIGURE 8 : UNE MACHINE MERRYWEATHER 85
FIGURE 9 : TRAMWAY MEKARSKI 1900 DE LA CGO ENTRE LOUVRES ET ST CLOUD 86
FIGURE 10 : LA CGO EXPLOITE DES TRAMWAYS ELECTRIQUES ALIMENTES PAR ACCUMULATEURS EN VILLE ET PAR TROLLEYS AERIENS EXTRA MUROS (1898) 87
FIGURE 11 : UNE RAME ELECTRIQUE ET SA REMORQUE 89
FIGURE 12 : RAMES PCC 91
FIGURE 13 : AUTOBUS BRILLIE-SCHNEIDER 94
FIGURE 14 : BUS PROTOTYPE SCHNEIDER SUR LA LIGNE H 94
FIGURE 15 : UN BUS LIGNE J A LA PLACE SAINT MICHEL ET A L'ARRIERE, UN TRAMWAY DE LA CGO 95
FIGURE 16 : L'AUTOBUS TYPE TN 6 DU RESEAU DE LA STCRP PUIS DE LA RATP 96
FIGURE 17 : LE SOMUA OP5, LE BUS DE L'APRES-GUERRE MONDIAL 97
FIGURE 18 : LE SC10 CONSTRUIT A GRANDE ECHELLE DE 1965 A 1988 98
FIGURE 19 : L'AUTOBUS R312 98
FIGURE 20 : L'AUTOBUS RENAULT AGORA A PLANCHER SURBAISSE 99
FIGURE 21: SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE VOIE SUR BETON 106
FIGURE 22: POSE A UN ETAGE ELASTIQUE SUR PLATE-FORME 107
FIGURE 23: SCHEMA DE DALLE FLOTTANTE 108
FIGURE 24: POSE SUR DALLE FLOTTANTE 108
FIGURE 25: COUPE TRANSVERSALE DE LA VOIE SUR DALLE FLOTTANTE 108
FIGURE 26: APPITRACK D'ALSTOM 109
FIGURE 27: EXEMPLES DES REVETEMENTS UTILISES EN FRANCE 110
FIGURE 28: CITADIS 402 A PARIS 112
FIGURE 29: FLEXITY A BRUXELLES 112
FIGURE 30: FLEXX BOGIE DE BOMBARDIER 113
FIGURE 31: DIAGRAMME DU FLEXITY DE BOMBARDIER A MARSEILLE 113
FIGURE 32: ALIMENTATION PAR LE SOL (APS) 115
FIGURE 33: BATTERIE POUR TRAMWAY 115
FIGURE 34: PRIMOVE DE BOMBARDIER 116
FIGURE 35: INSERTION EN COURBE 118
FIGURE 36: EMPRISE DU TRAMWAY DE LARGEUR DE 2,30 M 118
FIGURE 37: EMPRISE DU TRAMWAY DE LARGEUR DE 2,65 M 119
FIGURE 38: COUPE TYPE DU QUAI D'UNE STATION DE TRAMWAY 119
FIGURE 39: COUPE TYPE DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE DU TRANSLOHR 122
FIGURE 40: LA VOIE PREFABRIQUEE POUR LE TRANSLOHR 124
FIGURE 41: DIFFERENTES RAMES DE TRANSLOHR 125
FIGURE 42: GUIDAGE DU TRANSLOHR 125
FIGURE 43: DETAIL DU GUIDAGE DU TRANSLOHR 126
FIGURE 44: RAYON DE GIRATION ET PENTE ADMISSIBLE DU TRANSLOHR 127
FIGURE 45: EMPRISE AU SOL DU TRANSLOHR 127
FIGURE 46: ACCESSIBILITE DU TRANSLOHR POUR PMR 128
FIGURE 47: COUPE TYPE DU TVR DE CAEN 133
FIGURE 48: COUPE DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE DU TVR DE CAEN 133
FIGURE 49: DIAGRAMME DU TVR 135
FIGURE 50: PRINCIPE DU GUIDAGE DU TVR 136

FIGURE 51: SCHEMA SIMPLIFIE DU SYSTEME DE GUIDAGE DU TVR 136
FIGURE 52: RAIL DE GUIDAGE DU TVR 136
FIGURE 53: COMPARAISON DES RAYONS DE GIRATION DE L'AUTOBUS ARTICULE ET DU TRAMWAY SUR PNEU 138
FIGURE 54: COUPE ET DIMENSION DU TVR 138
FIGURE 55: SCHEMA DU GUIDAGE OPTIQUE DU CIVIS 140
FIGURE 56: FONCTIONNEMENT SCHEMATIQUE DU GUIDAGE OPTIQUE 141
FIGURE 57: PLAN SCHEMATIQUE DU MARQUAGE AU SOL DU CIVIS 142
FIGURE 58: GABARIT LIMITE D'OBSTACLE DU CIVIS 143
FIGURE 59: COUPE TYPE DE VOIE DU CIVIS 144
FIGURE 60: COMPARAISON DES LACUNES AU DROIT DU QUAI DES STATIONS SELON LES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT (SOURCE : SIEMENS) 144
FIGURE 61: PLOT MAGNETIQUE DU PHILEAS 147
FIGURE 62: IMPLANTATION DES PLOTS MAGNETIQUES DE LA VOIE DU PHILEAS SUR UN OUVRAGE EN BA 148
FIGURE 63: EMPRISE NECESSAIRE EN COURBE DU PHILEAS BI-ARTICULE 152
FIGURE 64: COUPE TYPE DE LA STRUCTURE DE CHAUSSEE D'ÉVÉOLE DE DOUAI 153
FIGURE 65: COUPE TYPE D'UNE VOIE UNIQUE POUR ÉVÉOLE 154
FIGURE 66: COUPE TYPE D'UNE VOIE DOUBLE POUR ÉVÉOLE 154
FIGURE 67: BORDURE DU PHILEAS 155
FIGURE 68: ÉLEMENTS PRINCIPAUX DU TROLLEYBUS ARTICULE 157
FIGURE 69: DIAGRAMME DE PERFORMANCE DE MARCHE POUR UN TROLLEYBUS ARTICULE CHARGE 157
FIGURE 70: PRINCIPE D'UN AUTOBUS HYBRIDE 165
FIGURE 71: MICROBUS 100 % ELECTRIQUE DE GRUAU 165
FIGURE 72: CARACTERISTIQUES DE GIRATION DE L'AUTOBUS STANDARD 167
FIGURE 73: CARACTERISTIQUES DE GIRATION DE L'AUTOBUS ARTICULE 167
FIGURE 74: CARACTERISTIQUE GEOMETRIQUE L'AUTOBUS ARTICULE 168
FIGURE 75: DIMENSIONNEMENT D'UN POINT D'ARRET POUR PERMETTRE L'ACCES EN FAUTEUIL ROULANT AU VEHICULE EQUIPE D'UNE RAMPE 168
FIGURE 76 : GRILLE D'ANALYSE 173
FIGURE 77: CAPACITE DES SYSTEMES DE TRANSPORT 176
FIGURE 78: CAPACITE THEORIQUE EN FONCTION DE LA FREQUENCE 178
FIGURE 79: STRUCTURE DES COUTS D'UN TRAMWAY 183
FIGURE 80: ÉMISSION GLOBALES DE GES DES MODES DE TRANSPORT 193
FIGURE 81: ÉMISSION GLOBALES DE GES DES MODES DE TRANSPORT AVEC SENSIBILITE AU TAUX D'OCCUPATION 194
FIGURE 82: ÉMISSION DE CO2 DES MODES DE TRANSPORT 194
FIGURE 83: RESULTAT DES BASES DE DONNEES REELLES 212
FIGURE 84: RESULTAT D'ELECTRE III AVEC LES BASES DE DONNEES REELLES (POIDS DE REFERENCE) 213
FIGURE 85: TEST DE ROBUSTESSE 215
FIGURE 86: RESULTAT D'ELECTRE III AVEC LES BASES DE DONNEES REELLES (POIDS 1) 216
FIGURE 87: RESULTAT D'ELECTRE III AVEC LES BASES DE DONNEES REELLES (POIDS 2) 217
FIGURE 88: RESULTAT D'ELECTRE III AVEC LES BASES DE DONNEES REELLES (POIDS 3) 218
FIGURE 89: RESULTAT D'ELECTRE IV AVEC LES BASES DE DONNEES REELLES 219
FIGURE 90: RAISONNEMENT SUR L'ETABLISSEMENT DES SCENARII 220
FIGURE 91: VITESSE COMMERCIALE EN FONCTION DE LA VITESSE MAXIMALE ET L'ESPACEMENT 222
FIGURE 92: RESULTAT DU SCENARIO 1 233
FIGURE 93: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 1 (POIDS DE REFERENCE) 234
FIGURE 94: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 1 (POIDS 1) 235
FIGURE 95: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 1 (POIDS 2) 236
FIGURE 96: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 1 (POIDS 3) 237
FIGURE 97: RESULTAT DU SCENARIO 2 242
FIGURE 98: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 2 (POIDS DE REFERENCE) 243
FIGURE 99: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 2 (POIDS 1) 244
FIGURE 100: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 2 (POIDS 2) 245
FIGURE 101: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 2 (POIDS 3) 246

FIGURE 102: RESULTAT DU SCENARIO 3 252
FIGURE 103: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 3 (POIDS DE REFERENCE) 253
FIGURE 104: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 3 (POIDS 1) 254
FIGURE 105: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 3 (POIDS 2) 255
FIGURE 106: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 3 (POIDS 3) 256
FIGURE 107: RESULTAT DU SCENARIO 4 261
FIGURE 108: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 4 (POIDS DE REFERENCE) 263
FIGURE 109: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 4 (POIDS 1) 264
FIGURE 110: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 4 (POIDS 2) 265
FIGURE 111: RESULTAT D'ELECTRE III, SCENARIO 4 (POIDS 3) 266
FIGURE 112: REPARTITION DES RANGS DES SYSTEMES SELON LES SCENARII 268
FIGURE 113: CLASSEMENT DES 6 DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT 269
FIGURE 114: CLASSEMENT DES 4 DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT 270
FIGURE 115: RESULTAT DU SCENARIO 2 271
FIGURE 116: RESULTAT DE L'APPLICATION DU POIDS 1 271
FIGURE 117: RESULTAT DE L'APPLICATION DU POIDS 2 272
FIGURE 118: RESULTAT DE L'APPLICATION DU POIDS 3 272

Liste des tableaux

TABLEAU 1: TYPES DE PROBLEMATIQUE 65
TABLEAU 2: RECAPITULATIF DES METHODES MULTICRITERES PRESENTEES 77
TABLEAU 3: ÉVOLUTION DU TRAMWAY 105
TABLEAU 4: CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES TRAMWAYS EN FRANCE 114
TABLEAU 5: COUTS DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT 117
TABLEAU 6: CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU TRANSLOHR 124
TABLEAU 7: HYPOTHESE DE CHARGE SUR LES ESSIEUX DU TVR 132
TABLEAU 8: CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU TVR 134
TABLEAU 9: CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES VEHICULES 137
TABLEAU 10: CAPACITE UNITAIRE DES VEHICULES PHILEAS 149
TABLEAU 11: CHARGE A L'ESSIEU DES DIFFERENTS VEHICULES 151
TABLEAU 12: RAYONS DE GIRATION DU PHILEAS 152
TABLEAU 13: ASPECT ECONOMIQUE DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT 158
TABLEAU 14: CARACTERISTIQUE DES AUTOBUS STANDARD EN FRANCE 161
TABLEAU 15: CARACTERISTIQUE DES AUTOBUS ARTICULES EN FRANCE 162
TABLEAU 16: CAPACITE DES 4 TYPES D'AUTOBUS 164
TABLEAU 17: COUTS DES DIFFERENTS TYPES D'AUTOBUS ET DE TROLLEYBUS 166
TABLEAU 18: COUTS D'EXPLOITATION DES DIFFERENTS TYPES D'AUTOBUS ET DE TROLLEYBUS 166
TABLEAU 19: CAPACITE D'UN VEHICULE 177
TABLEAU 20: CAPACITE THEORIQUE EN FONCTION DE LA FREQUENCE 178
TABLEAU 21: VITESSE COMMERCIALE DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT 179
TABLEAU 22: PONCTUALITE 180
TABLEAU 23: EMPRISE AU SOL 181
TABLEAU 24: FIABILITE 182
TABLEAU 25: ACCESSIBILITE 182
TABLEAU 26: REPARTITION DU COUT PAR POSTE 184
TABLEAU 27: COUT D'INVESTISSEMENT DES 6 SYSTEMES DE TRANSPORT 188
TABLEAU 28: DECOUPAGE DU COUT D'EXPLOITATION 190
TABLEAU 29: CONSOMMATION D'ENERGIE DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT 191
TABLEAU 30: ÉMISSION DE CO2 195
TABLEAU 31: IMAGE DE L'INSERTION DES DIFFERENTS SYSTEMES DE TRANSPORT 196
TABLEAU 32: PONDERATION DES POIDS 198
TABLEAU 33: RECAPITULATIF DES CRITERES 199
TABLEAU 34: ORIGINE DES BASES DE DONNEES 200
TABLEAU 35: COUT D'INVESTISSEMENT DES TRAMWAYS EN FRANCE 201
TABLEAU 36: COUT D'INVESTISSEMENT DES TRAMWAYS 32 M EN FRANCE 201
TABLEAU 37: COUT D'EXPLOITATION DU TRAMWAY 32 M 202
TABLEAU 38: COUT D'INVESTISSEMENT DU TRANSLOHR 202
TABLEAU 39: COUT D'EXPLOITATION DU TRANSLOHR 32 M 203
TABLEAU 40: COUT D'INVESTISSEMENT DU TVR 203
TABLEAU 41: COUT D'EXPLOITATION DU TVR 204
TABLEAU 42: COUT D'INVESTISSEMENT DU CIVIS 204
TABLEAU 43: COUT D'INVESTISSEMENT DU TROLLEYBUS 205
TABLEAU 44: COUT D'EXPLOITATION DU TROLLEYBUS 206
TABLEAU 45: COUT D'INVESTISSEMENT DE L'AUTOBUS ARTICULE 206
TABLEAU 46: COUT D'EXPLOITATION DE L'AUTOBUS ARTICULE 207
TABLEAU 47: MATRICE DE PERFORMANCE AVEC LES BASES DE DONNEES REELLES ET LE POIDS DE REFERENCE 209
TABLEAU 48: RANGS DE CHAQUE SYSTEME SELON DES POIDS 211
TABLEAU 49: LES HYPOTHESES DE CHAQUE SCENARIO 221
TABLEAU 50: COMPARAISON DES USURES DE ROUE ET DE PNEU 223

TABLEAU 51: COUT D'EXPLOITATION ESTIME D'UN TRAMWAY CONCERNANT LE PERSONNEL 224
TABLEAU 52: COUT D'EXPLOITATION ESTIME D'UN TRAMWAY 224
TABLEAU 53: ÉMISSION DE CO2 225
TABLEAU 54: COUT D'EXPLOITATION ESTIME D'UN TRANSLOHR 226
TABLEAU 55: COUT D'EXPLOITATION ESTIME D'UN TVR 227
TABLEAU 56: COUT D'EXPLOITATION ESTIME D'UN CIVIS 228
TABLEAU 57: COUT D'EXPLOITATION ESTIME D'UN TROLLEYBUS ARTICULE 229
TABLEAU 58: COUT D'EXPLOITATION ESTIME D'UN AUTOBUS ARTICULE 230
TABLEAU 59: MATRICE DE PERFORMANCE AVEC DES HYPOTHESES : SCENARIO 1 231
TABLEAU 60: RANGS DE CHAQUE SYSTEME SELON LE SCENARIO 1 233
TABLEAU 61: MATRICE DE PERFORMANCE AVEC DES HYPOTHESES : SCENARIO 2 239
TABLEAU 62: RANGS DE CHAQUE SYSTEME SELON LE SCENARIO 2 241
TABLEAU 63: MATRICE DE PERFORMANCE AVEC DES HYPOTHESES : SCENARIO 3 249
TABLEAU 64: RANGS DE CHAQUE SYSTEME SELON LE SCENARIO 3 251
TABLEAU 65: MATRICE DE PERFORMANCE AVEC DES HYPOTHESES : SCENARIO 4 259
TABLEAU 66: RANGS DE CHAQUE SYSTEME SELON LE SCENARIO 4 261
TABLEAU 67: RESULTATS DES ANALYSES COMPARATIVES 267
TABLEAU 68: CLASSEMENT DES SYSTEMES DE TRANSPORT 268
TABLEAU 69: RECAPITULATIF DES CONDITIONS DE CHAQUE SCENARIO 270

INTRODUCTION

INTRODUCTION

La problématique : intérêts du transport de surface

Le transport participe à la construction de la vie des hommes, à leurs choix de lieux de résidence, d'activités et de loisirs. Il est aussi un outil qui nous permet d'organiser la vie, avec moins de contraintes de déplacement, d'une manière autonome. C'est la raison pour laquelle le besoin d'utiliser les transports ne cesse d'augmenter. Cependant, l'automobile est aujourd'hui mise en cause au regard des défis du développement durable pour des raisons liées aux nuisances que son utilisation induit (bruit, pollution, insécurité), à « consommation » d'espace qu'implique ce mode, et plus encore à sa contribution au changement climatique du fait de l'utilisation massive d'énergie d'origine fossile. De plus, le nombre et la taille des infrastructures ne pouvant évoluer au même rythme que le nombre de véhicules routiers en raison de la double pression des contraintes économique et environnementale, le développement d'une mobilité « tirée » par l'automobile se heurte à la congestion croissante des zones urbaines denses.

Or la ville d'aujourd'hui est elle-même en pleine mutation. Les enjeux en sont liés à la fois au cadre de vie et à l'environnement, à la qualité des services et à leurs conditions socio-spatiales d'accès, et de manière inséparable, à la maîtrise de l'urbanisation, pour rendre celle-ci plus compatible avec la maîtrise les consommations d'énergie. Dans ce contexte, la démographie, l'évolution des modes de vie, les « tensions » des marchés foncier et immobilier sont observées avec une plus grande attention. Dans ce contexte, le transport apparaît plus que jamais comme une composante essentielle non seulement du bon fonctionnement de la ville en lien avec les activités commerciales, industrielles, sociales, culturelles et touristiques, et la possibilité pour chacun de réaliser ses « programmes d'activités » quotidiens, mais aussi comme partie intégrante des politiques d'aménagement, en bref, comme un élément majeur des politiques publiques urbaines.

Constatons ici que le transport public a connu au cours des quarante dernières années une remarquable évolution. Ainsi, la redécouverte de certains systèmes de déplacements « modernes » et performants dont le tramway par les grandes métropoles françaises a fortement contribué à la croissance de l'offre de transport public et à l'amélioration de leur qualité de service. Hors Ile de France, les réseaux en site propre assurent désormais la moitié des déplacements de transport en commun dans cinq agglomérations, alors qu'en 1998 ce n'était le cas que pour celle de Lille.

La création de nombreuses lignes de transport en site propre (TCSP) a permis de diversifier l'offre de transport et a entraîné une amélioration qualitative de l'offre de transport des réseaux concernés. Les véhicules des transports en commun en site propre sont plus confortables que les autobus classiques. Ils sont tous climatisés et disposent d'un plus grand nombre de places assises. La vitesse commerciale des lignes de TCSP constitue pour les usagers le principal avantage de ce mode de transport. Pour les métros, elle se situe entre 26 et 35 km/h et pour les tramways entre 15 et 21 km/h, alors qu'elle est habituellement beaucoup plus faible pour les lignes de transports urbains classiques sans site propre. Par ailleurs, les TCSP permettent une forte amélioration des conditions d'exploitation, et les agglomérations dotées d'un TCSP offrent en général de meilleures fréquences moyennes sur l'année que les réseaux sans « site propre ».

En montant d'investissement, les tramways représentent globalement la masse la plus importante sur la période 1994-2002 avec 58 % du total, contre 37 % pour les métros et 5% pour les bus[1]. On constate un net renforcement des transports de surface au détriment des métros beaucoup plus coûteux.

Par ailleurs, les avantages d'un projet de TCSP dépassent souvent le strict cadre des transports publics pour s'inscrire dans une politique globale des déplacements et une stratégie de développement de l'agglomération. Il n'est pas qu'un moyen de transport mais considéré comme un incontestable fil conducteur de la politique des déplacements et de l'urbanisme pour la ville et l'agglomération.

Les TCSP, moins polluants et moins bruyants que les modes de transports collectifs plus classiques, puisqu'il s'agit souvent de véhicules électriques, devraient en outre favoriser l'amélioration de l'environnement. La réalisation de « sites propres » est enfin l'occasion de développer des projets urbains comportant l'aménagement de la voirie, la rénovation de l'éclairage public, la création d'espaces verts, de pistes cyclables et l'élargissement de trottoirs pour favoriser la marche à pied. Les lignes de TCSP deviennent alors des axes d'aménagement urbain dont la vocation est de redistribuer les activités dans la ville et de revitaliser les centres urbains ou les quartiers disqualifiés afin de renforcer la cohésion sociale. Enfin, ils peuvent faciliter l'intégration du transport ferroviaire dans les dessertes urbaines (tram/train, pôles d'échange multimodaux).

C'est la raison pour laquelle les collectivités qui se sont engagées dans des Plans de Déplacements Urbains ont parfaitement intégré les multiples possibilités offertes par un projet de transport en site propre.

De plus, par l'engagement du développement durable, nous nous intéressons de plus en plus au développement des réseaux de transport en commun qui nous semble un des éléments importants pour limiter les nuisances émises par la voiture et assurer les besoins de déplacement du futur. Avec le développement des TCSP de surface (tramways, bus en site propre), les autorités organisatrices peuvent favoriser un partage plus équilibré de la voirie entre ses différents usages, collectifs et individuels. Elles obligent ainsi, par la matérialisation d'espaces réservés aux usages collectifs, à une redistribution de la voirie au profit des transports en commun.

[1] Ce chiffre a été communiqué par le groupe de travail (TCSP).

À la différence des couloirs de bus, qui assurent théoriquement une voie de circulation réservée aux transports collectifs mais sont souvent obstrués par des automobiles, les « sites propres » sont exclusivement affectés aux transports en commun et ne sont pas soumis aux aléas de la circulation, puisqu'ils sont inutilisables et non franchissables par les voitures particulières sur la majeure partie de leur tracé et bénéficient d'une priorité lorsqu'ils traversent le réseau viaire urbain.

À titre d'exemple, dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, l'État français a pris des mesures concrètes afin de mettre en œuvre ce développement du transport public et favoriser la mobilité urbaine durable[2]. Rappelons que le gouvernement s'est alors engagé à consacrer une enveloppe de 2 milliards d'euros aux TCSP, les 2/3 de cette enveloppe étant actuellement engagés ou en cours d'engagement.

Dans ce contexte qui favorise de plus en plus les systèmes de transport moins lourd financièrement et plus propice en termes de l'environnement, le transport guidé de surface devient un enjeu important en répondant aux problèmes actuels concernant la ville. D'où l'intérêt de procéder à une analyse comparative de tous les avantages et inconvénients des différents systèmes de transport guidé existant et d'être en capacité de choisir « un système bien adapté » dès la conception d'un projet, en fonction des objectifs et des contraintes que ce projet stipule.

Champ de recherche : le transport guidé de surface

Nous avons évoqué les différents intérêts du transport collectif en site propre (TCSP). Actuellement, en France, il existe en principe deux systèmes: un système basé sur la technique ferroviaire dont le tramway et un système basé sur la technique routière dont l'autobus. Mais cette dichotomie se trouve remise en cause par le développement de plusieurs gammes du système de transport dit « intermédiaire » plus ou moins différentes, et se situant « entre » le tramway et l'autobus.

Ces systèmes de transport « intermédiaire » font presque toujours l'objet de deux argumentations contrastées : l'une favorable et l'autre défavorable.

Du côté des « pour », on parle d'une véritable « révolution » dans le domaine du transport : « le même service que le tramway à moindre coûts » ou « un meilleur service que celui offert par l'autobus aux mêmes coûts ». Il est vrai qu'avec une image de marque supérieure à celle de l'autobus, l'accès à de réels sites propres grâce au guidage, une traction électrique non-polluante, une grande flexibilité, un plancher bas intégral, le système intermédiaire basé sur la technique ferroviaire ou routière présente des atouts incontestables.

Mais du côté des « contre », on constate que cela ne permet pas d'atténuer la polémique autour du transport en commun, notamment en terme d'utilisation de fonds publics : « gaspillage d'argent public » ou inefficacité de son utilisation. Les comparaisons sont d'autant plus difficiles que le coût d'estimation des systèmes guidés de surface peut varier considérablement selon qu'on compte ou pas les frais de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage, les acquisitions foncières, les coûts liés à la réfection de la voirie et

[2] http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=16176

des canalisations. En outre, l'appréciation des premiers effets induits par les TCSP est malaisée, en raison du manque de précision des objectifs visés. Rares sont d'ailleurs les autorités organisatrices à s'être véritablement livrées à des évaluations socio-économiques rigoureuses.

De plus, les nouveaux systèmes de transport n'ont pas amené la « révolution » que promettaient les promoteurs des systèmes intermédiaires, mais au contraire ils ont parfois été confrontés à des difficultés techniques. Plusieurs incidents ont par exemple contrarié la vie des usagers du transport sur voie réservée (TVR) exploité à Nancy puis à Caen. La direction des transports terrestres a diligenté une expertise sur la sécurité du système de guidage utilisé, au terme de laquelle le Conseil Général des Ponts et Chaussées a formulé en 2003 un certain nombre de recommandations techniques visant à assurer une plus grande sécurité du dispositif.

En parallèle, le tramway, jugé dans les années trente comme un système obsolète, tout au moins par certains pays dont la France, a fait un grand retour[3] en améliorant ses performances, montrant sa capacité d'adaptation à s'intégrer dans les enjeux actuels du transport et même de la ville.

Dans ce contexte compliqué, il est difficile de juger si les systèmes intermédiaires constituent une alternative aux systèmes classiques, et si oui, sous quelles conditions. Pour autant, la question ne peut pas être éludée : ces « systèmes intermédiaires » sont particulièrement évoqués pour assurer une offre de transport pour les villes de taille moyenne ou dans les grandes agglomérations pour la desserte de banlieues de densité moyenne, là où la capacité nécessaire varie entre 2 000 et 6 000 passagers par heure et par sens. Ce besoin, en pleine croissance dès lors que l'objectif est d'étendre les territoires bien desservis par les TC, montre bien l'intérêt potentiel de ces systèmes et leur place possible dans l'offre des systèmes de transport entre le tramway et l'autobus, ce dernier incluant le développement des BHNS[4]

Là est l'objet de notre recherche : nous y inclurons, du fait de la complexité du débat précédemment évoqué, tous les systèmes de transport guidé de surface. Toutefois, la nécessité de procéder à des comparaisons aussi objectives que possible nous a conduit à ne retenir que les systèmes déjà mis en service, ayant un retour d'expérience suffisant, et permettant de prendre en compte différents aspects mis en exergue par les acteurs et les experts concernés.

De plus, pour des raisons de disponibilité d'informations et de vérification des sources, nous avons principalement circonscrit notre recherche aux systèmes de transport urbain guidé de surface actuellement exploités en France pour lesquels nous avons pu obtenir des données. Cela concerne tout particulièrement 7 systèmes de transport utilisés pour les transports collectifs en site propre (TCSP) :

- Tramway sur rail (tramway moderne),
- Tramway sur pneu (Translohr),
- TVR (Transport sur Voie Réservée),

[3] Depuis 1975, date à laquelle le gouvernement français a lancé l'idée d'un « tramway français standard », un nombre croissant de villes s'est prononcé en faveur d' « une renaissance du tramway ».
[4] BHNS : Bus à Haut Niveau de Service.

- CIVIS,
- Phileas,
- Trolleybus,
- Autobus en site propre.

En ce qui concerne le Phileas, il ne fonctionne pas en mode 100 % automatique qui en ferait un vrai transport guidé de surface, car il n'a pas encore obtenu l'homologation française, actuellement sollicité par l'autorité organisatrice (AOT) de Douai[5]. C'est la raison pour laquelle, le Phileas fonctionne à ce jour comme un autobus articulé. Faute de disposer des informations sur l'exploitation en mode automatique, nous avons décidé de l'écarter de notre analyse comparative. Nous l'évoquerons toutefois au chapitre de la description des systèmes de transport pour compléter notre inventaire des systèmes de transport guidé de surface exploités en France à l'heure actuelle.

Notre objectif : aider à choisir le système mieux adapté

Selon Bernard Roy (1985, p.15), l'aide à la décision est : « l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités, mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, élément concourant à éclairer la décision et normalement, à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part. »

Notre but final est de mettre à disposition des décideurs un maximum d'éléments objectifs pour prendre leur décision lors d'un choix des systèmes de transport en commun en site propre[6] (TCSP).

Dans la première partie de notre travail, nous passons en revue tous les systèmes de transport guidé de surface, les « anciens » comme les nouveaux systèmes de transport exploités à l'heure actuelle en France. Ensuite, sur la base des connaissances obtenues, nous analysons et comparons plus finement les systèmes de transport guidé de surface en fonction de certains contextes vraisemblables mais différents, en vue d'aider au choix des systèmes de transport. La démarche et le résultat de notre recherche sont destinés à chaque ville ayant besoin de plus d'informations sur les systèmes de transport guidé de surface et ayant envie de réussir son projet de transport.

Notons que cette recherche n'a pas pour objet de prouver que l'investissement dans les transports en commun est efficace, ni que le service de transport avec un matériel roulant plus récent est nettement meilleur qu'avec un matériel plus ancien, mais plutôt de comparer entre eux les systèmes de transport guidé de surface et de préciser dans quel contexte ils pourraient être implantés correctement.

[5] à Douai, il s'appelle Évéole.

[6] Dans la suite, nous ne préciserons pas à chaque fois que nos travaux portent exclusivement sur les transports urbains guidés de surface.

Démarche méthodologique proposée

Cette thèse, vise d'abord à donner un panorama général des systèmes de transport guidé de surface dits « systèmes intermédiaires », c'est-à-dire des systèmes présentant en termes de capacité, de coûts d'investissement et d'exploitation, des options intermédiaires entre le tramway classique et le bus articulé.

Comme déjà noté, la première génération de ces systèmes a connu un certain nombre de difficultés de mise en œuvre et a donné lieu à polémiques tandis qu'une nouvelle génération de matériels est aujourd'hui en cours de déploiement sans trop de difficulté. Il sera procédé à un inventaire de ces matériels, à une description aussi complète que possible des systèmes utilisés avec une explication des parties innovantes et de leurs performances.

À partir de la connaissance des transports urbains guidés de surface, nous allons donc essayer de faire une analyse comparative sur 6 systèmes de transport urbain que nous avons délicatement choisi en appliquant une méthode d'analyse multicritère, plus précisément la méthode ELECTRE Comme nous l'exposerons, le choix de cette méthode vient d'une part qu'il n'existe pas ou rarement de solution optimale, qu'il faudra souvent faire un compromis sur ce que l'on peut faire et sur ce que l'on veut faire, et d'autre part parce qu'elle représente relativement bien la réalité pour aider le décideur. L'intérêt des méthodes multicritère d'aide à la décision tient aussi à ce qu'un projet de TCSP a un impact à long terme, qui peut mieux être pris en compte par ce type de méthode.

De plus, dans notre recherche, les systèmes de transport peuvent être, dans certains cas, difficiles à comparer en raison d'un manque d'informations nécessaires ou de grande différence sur certains critères. Parmi les méthodes multicritères, la méthode ELECTRE permet de prendre en compte cette incomparabilité sur certains critères et de procéder à une agrégation partielle sur différents critères pour trouver le ou les systèmes de transport guidé de surface le mieux adapté à un contexte d'exploitation donné.

Plus précisément, nous appliquerons la méthode multicritère ELECTRE III et proposerons des raisonnements argumentés pour le choix d'un système adapté à un contexte local. À partir de critères présélectionnés (critères liés aux performances/services rendus, coûts et environnements) et du retour d'expérience (notamment en ce qui concerne les coûts d'exploitation) des villes ayant adopté ce type de systèmes de transport guidés de surface, nous avons effectué notre recherche sur des cas, notamment les cas français, pour lesquels les données sont accessibles.

Enfin, les applications des scenarii compléteront notre recherche en faisant varier les critères afin de cibler le meilleur système de transport adapté à différents contextes actuellement vraisemblables.

Soulignons que cette démarche d'une part, prend en compte le point de vue technique et économique sans oublier les impacts en milieu urbain, et d'autre part qu'elle prend en compte un raisonnement pratique, fondée sur l'analyse de terrain. Cette dernière, même

si les éléments auxquels elle conduit ne sont pas toujours faciles à interpréter, nous paraît indispensable pour reconstituer un contexte d'exploitation.

Contenu et plan du mémoire

Le mémoire est organisé selon les étapes suivantes :

Le chapitre 1 porte sur les enjeux actuels du transport et les problèmes liés à son évaluation ; il rappelle quelques définitions et éléments de base.

Le chapitre 2 constitue une présentation générale des principales méthodes multicritères d'aide à la décision utilisées concerne une présentation des méthodologies d'aide à la décision. Il justifie et explicite les raisons du choix de la méthode ELECTRE III.

Le chapitre 3 est une synthèse de la description des différents systèmes de transport guidé de surface en catégorisant deux groupes : le groupe du tramway et le groupe du BHNS portant sur plusieurs aspects nécessaires à la recherche.

Le chapitre 4 est un élément essentiel de notre recherche qui analyse les différents systèmes de transport guidé de surface en appliquant la méthode ELECTRE III.

Ensuite, enfin, nous présentons les conclusions de cette recherche.

La liste bibliographique, le récapitulatif des systèmes étudiés et le calcul du coût d'exploitation sont joints en annexe.

PREMIER CHAPITRE

Chapitre I : Enjeux actuels du transport et les problèmes liés à son évaluation

Dans cette partie, nous allons d'abord voir les définitions des différents termes liés au transport et les enjeux actuels du transport en commun (développement durable et transport durable) ainsi que la difficulté[7] d'évaluation/choix au moment où l'on réalise un projet de transport en commun de surface en site propre.

1. Définition des termes du transport

Précisons les termes de transport que nous allons utiliser tout au long de notre recherche.

1.1. Histoire du transport en commun

Le début des transports public et de leur organisation se situe au XIXe siècle avec les omnibus, mais ils prennent une dimension nouvelle avec les premiers tramways qui procurent une grande facilité de roulement. Ceux-ci utilisent d'abord la traction animale puis la vapeur, l'air comprimé et enfin la traction électrique qui va assez vite se généraliser.

Avec cette dernière, les réseaux se complètent dans le premier quart du XXe siècle. Dans les grandes villes, notamment Paris et Londres, les tramways se développent en parallèle avec les premières lignes du métro. Ainsi, entre 1900 et 1930, la distance et la vitesse de déplacement augmentent rapidement.

À partir des années 30, le développement important de l'autobus et le développement progressif de l'automobile vont entraîner la suppression de tramway au prétexte que celui-ci gêne la circulation. La création de lignes urbaines d'autobus apparaît

[7] Cette difficulté est largement due à l'analyse coûts/avantages d'où l'intérêt d'employer l'analyse multicritère.

progressivement et, dans le même temps, les lignes de tramways se réduisent, particulièrement aux Etats-Unis et en France (pour la France, on pourra se reporter à l'intéressant ouvrage de D.Larroque, M.Margairaz et P.Zembri, Paris et ses transports, 19ème-20ème siècles, 2002).

La Seconde Guerre mondiale laisse les réseaux de tramway, notamment les matériels, hors d'usage et dans bien des cas, leur redémarrage s'effectue malheureusement avec des autobus, voire des trolleybus. Plus souples, plus modernes, ils chassent le tramway qui renvoie à une image de matériel ancien, d'un système du passé, sans qu'il soit tenu compte de ses possibilités de modernisation.

Le développement des autobus subit rapidement la concurrence de la voiture particulière dont l'utilisation explose dans les années 60. Progressivement, jusqu'au milieu des années 70, le transport en commun décline, son image se dégrade et les structures exploitantes obsolètes ne parviennent plus à trouver des financements et gèrent les réseaux avec un principe de « déficit minimum ».

À partir de la fin des années 70, la première crise pétrolière et la crainte d'une pénurie d'énergie, le désir d'une meilleure qualité de vie, la prise de conscience de la pollution, l'insécurité liée aux autres modes, notamment deux roues et véhicules particuliers, puis la mise en place d'institutions et de modes de financements cohérents commencent à renverser cette tendance et à redonner aux transports publics finalement une place plus conforme à leurs apports réels.

Depuis ce bouleversement, de nombreuses villes ont réalisé des projets de transport en commun qui sont devenus des outils utiles majeurs pour leur fonctionnement quotidien, corrigeant partiellement les évolutions connues dans les 40 ans qui avaient précédé.

1.2.Transports en commun en site propre (TCSP)

Le transport public est un moyen de transport qui assure les déplacements des gens de manière collective pour que chacun puisse réaliser ses objectifs en termes d'actions économique et sociale. Il est nécessaire d'avoir une organisation efficiente et efficace pour leur permettre de bien fonctionner.

Le Transport en Commun en Site Propre (TCSP) ont fait leur apparition avec le renouveau du tramway, à la fin des années soixante-dix. Ce terme désigne un système de transport qui utilise un site exclusivement réservé aux transports collectifs (bus, tramway, train, métro), qui les isole du reste de la circulation. Ce type de partage de la voirie constitue un moyen de lutte efficace contre la pollution et la congestion urbaine.

Le vocabulaire relatif à la désignation des TCSP n'est pas encore « officiel ». On utilise, en pratique, la nomenclature définie par le CERTU (Certu 2009):

- Métro : les métros sont en site propre intégral (pas de carrefour, plate-forme inaccessible) et généralement en souterrain ou en viaduc. Ils sont exploités à voie libre à l'aide d'un système de cantonnement et peuvent être automatiques.
- Tramway :

  - tramways « classique » ou « sur fer » : il est caractérisé par des véhicules ferroviaires (roulement fer sur fer) qui circulent majoritairement sur la voie urbaine et sont exploités en conduite à vue.
  - « tramway sur pneu » : le système guidé sur pneu qui présente la particularité d'avoir un guidage permanent et donc de se soustraire au code de la route, notamment en ce qui concerne la longueur des rames.

- BHNS : Les Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) se caractérisent par un matériel roulant sur pneu et « homologué bus » (limité à 24,5 m en longueur). Par une approche globale (matériel roulant, infrastructure, stations, condition d'exploitation), les BHNS assurent un niveau de service supérieur aux lignes de bus conventionnelles, en termes de fréquence, vitesse, régularité, confort, accessibilité, etc. et s'approchent des performances des tramways.

Le transport en commun en site propre (TCSP) est une sous-division du transport public, qui, tout en gardant les avantages du système de masse, offrent le niveau et la qualité de service[8] nettement meilleurs grâce à leur emprise spécifique par rapport aux modes routiers sans voies dédiées. Autrement dit, il s'agit d'un système de transport public de voyageurs, utilisant une voie ou un espace affecté à sa seule exploitation, bénéficiant généralement de priorités aux feux et fonctionnant avec des matériels allant des autobus aux métros, en passant par les tramways.

Selon la définition du Certu[9], le « transport collectif en site propre » (TCSP) est un système de transport public utilisant majoritairement des emprises affectées à son exploitation. Il repose sur 3 composantes et sur leur articulation :

- l'infrastructure (plate-forme, stations, etc.),
- le matériel roulant,
- le système d'exploitation (modalités de circulation, systèmes d'aide à l'exploitation, information voyageurs, etc.).

Un transport en commun en site propre (TCSP) est donc un système de transport qui emprunte une voie ou un espace qui lui est réservé. Plus précisément, c'est un ensemble de réseaux de transport ou un ensemble de lignes d'infrastructures reliant plusieurs points de la ville, des matériels roulants associés et des systèmes liés à la condition d'opération, notamment, l'aide à l'exploitation permettant d'informer les usagers et de faciliter la conduite. Lorsque ces opérations sont réalisées sur plusieurs kilomètres par des équipements complets, ils sont appelés Transport en Commun en Site Propre (TCSP). Un transport en commun n'est pas nécessairement en site propre sur toute la longueur de la ligne, mais peut l'être seulement sur des portions pour améliorer son fonctionnement.

L'objectif de la réalisation d'un projet de système de transport est normalement de répondre à la demande des usagers en établissant un réseau de transport en commun doté de lignes rapides, fréquentes (respect des horaires) et confortables. Pourtant la largeur de la voirie ne permet pas toujours la réalisation de couloirs réservés au

[8] Niveau de service : point de vue de l'offre. Qualité de service : point de vue de la demande.
[9] Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU)

transport en commun. De plus, ces couloirs sont peu respectés par les utilisateurs. La seule solution efficace est le site propre. Les transports en site propre se distinguent donc des aménagements ponctuels de carrefours ou de voirie destinés à apporter une amélioration locale avec un objectif principal, en général, d'accroître la vitesse commerciale. Les avantages (intérêts) du site propre sont nombreux :

- Visibilité du site propre, donc pas de conflits avec l'automobiliste,
- Fiabilité du système (régularité),
- Amélioration de la vitesse commerciale,
- Sécurité en zone piétonne.

D'ailleurs, le site propre est un instrument performant d'attractivité. La circulation des véhicules de transport collectif en site propre, qu'il s'agisse d'autobus ou de tramways, est un facteur puissant d'attractivité et un levier efficace pour capter de nouvelles clientèles, fidéliser durablement une part de la clientèle existante, redistribuer les déplacements au profit des transports collectifs.

L'association entre le tramway et le site propre s'est révélée efficace en terme d'attractivité des transports collectifs urbains dans des agglomérations de taille généralement moyenne. Mais cette association a toujours été enrichie de nombreuses dispositions concomitantes (information en temps réel, confort dans les stations, fréquences de passage, requalification de l'espace public), qui ont beaucoup contribué à l' « effet tramway ».

La mise en place d'une offre de transport en commun en site propre se traduit par plusieurs effets positifs, par exemple :

- Une hausse de la fréquentation des réseaux, le nombre de voyages par habitant s'accroît,
- Une croissance de la distance parcourue par les transports en commun,
- Une part moindre de la voiture dans le partage modal et une part plus importante des transports collectifs.

L'exemple de Montpellier illustre un effet tramway très marqué : la part de marché des transports collectifs dans les déplacements des habitants des quartiers de la ville de Montpellier desservis par le tramway est de 14 % contre 9 % pour les autres quartiers. La part de marché de la marche à pied est de 46 % dans les quartiers desservis par le tramway contre 31 % dans les autres quartiers de la commune. La part de marché du vélo est de 3,3 % dans les quartiers desservis par le tramway contre 2,1 % dans les autres quartiers. La place de la voiture particulière est donc réduite à 37 % dans les déplacements des habitants des quartiers desservis par le tramway contre 58 % dans les autres quartiers. L'effet tramway est important, même si les différences de mobilité en hyper centre ont d'autres causes que le seul tramway: des profils de population y sont différents (plus d'étudiants en centre-ville), les caractéristiques des voiries sont plus contraintes et les restrictions d'usage de la voiture plus fortes.

Malgré que cet effet structurant soit largement accepté et prouvé par plusieurs exemples, il n'est pas toujours évident (Offner 1993). Le mot « effet » doit être pris dans une acception systémique.

De plus, si le transport en site propre est un transport guidé, son intérêt est encore plus grand :

- L'emprise au sol est réduite,
- L'alignement au quai est plus sûr,
- L'accessibilité est accrue pour les utilisateurs,
- Le confort du roulement est accru.

En ce qui concerne l'intérêt de guidage, il y a une explication complète dans l'ouvrage de GART (GART 1996). Le guidage permet :

- Une trajectoire précise, confortable en courbe (par rapport au mode routier sans aménagement intérieur), prévisible, connue des autres usagers de la voirie dont les piétons,
- Une faible lacune pour le quai à niveau, indispensable pour les personnes à mobilité réduite (PMR),
- De réduire l'emprise du système,
- De libérer l'opérateur d'une tâche de conduite délicate avec les gros engins,
- De rendre possible la marche arrière de véhicules longs,
- De matérialiser une ligne, de la pérenniser, de la rendre plus lisible, plus fiable, plus structurante,
- De dissuader de la violation du site réservé,
- De faire accepter plus aisément par les autres usagers de la voirie le site protégé de surface,
- D'opter plus favorablement pour l'électrification, puisqu'elle est plus simple avec la captation par caténaire et le retour du courant par le rail de guidage.

Et sans l'objectif de bimodalité le guidage permet surtout d'exploiter les véhicules (ou rames) sans limite de longueur, plusieurs fois articulés, avec :

- Plus de surface utile et beaucoup de places assises,
- Des caisses plus étroites, à surface égale, pour réduire encore l'emprise du système et donc envisager encore plus facilement le site propre ou protégé avec en corollaire l'atteinte de gains substantiels en régularité et en vitesse commerciale,
- Le plancher encore plus surbaissé,
- L'absence économique de passage entre caisses,
- La marche en rame pour les heures de forte influence,

- Une possibilité de réversibilité (exploitation sans retournement),
- Les essieux faiblement chargés, en plus grand nombre, peu agressifs vis-à-vis des chaussées, même celles de structure ordinaire, avec pour conséquence les économies :
    - d'un renforcement de la chaussée de la ligne, au moins en interstation,
    - d'un accès à l'atelier, économies qui ne se font plus sur le guidage lui-même mais sur la piste de roulement et éventuellement la caténaire avec une source autonome et légère de faible puissance pour une marche à vide et à faible vitesse,
    - d'un remaniement des réseaux souterrains (avec la pose provisoire d'un rail de guidage amovible, la rame contourne les éventuels travaux sous une voie, ou avec l'étaiement possible d'une voie peu chargée, l'exploitation peut continuer).

La réduction de l'emprise est certainement la fonction la plus importante du guidage : le petit gabarit dynamique, l'inscription parfaite en courbe de très faible rayon, la précision des trajectoires sont des nécessités dans les villes européennes anciennes ou dans les villes denses. Si la réduction d'emprise n'est pas une nécessité, il reste pour justifier le guidage l'accessibilité et surtout la marche en rame aux heures de forte affluence.

Néanmoins, le site propre a un inconvénient essentiellement lié au financement : voie séparée avec déplacement des réseaux souterrains, ouvrage d'art, réaménagement urbain éventuel, nécessité d'un dépôt-atelier à proximité, peuvent engendrer des coûts importants pour la réalisation du TCSP.

2. L'émergence du concept de développement durable

À la fin des années soixante, nos sociétés ont commencé à prendre conscience de la fragilité de l'environnement due au développement des activités humaines. Les ressources naturelles doivent être préservées en raison de leur rareté, ou de la longueur et des risques de perturbation, voire de destruction irréversible des cycles qui permettent leur renouvellement. L'air et l'eau, mais aussi les matières premières, et parmi elles, les ressources en énergie fossile sont particulièrement concernées. Cette prise de conscience s'étend également à la question de l'usage des sols, via par exemple l'importante question des équilibres entre espaces urbanisés, espaces agricoles et espaces naturels. Au milieu des années quatre-vingt, le souci de prendre en compte les effets de moyen et de long terme des activités humaines prend un tour nouveau avec la mise en évidence d'effets des activités humaines sur le climat, via les émissions de Gaz à effet de serre (GES), dont le principal (CO_2) est directement lié à l'utilisation des sources d'énergie fossile. Cette forme de pollution, dont les effets ont été longtemps sous-estimés, voire niés, concerne tout particulièrement les transports, et notamment l'usage intensif de la voiture individuelle et du transport routier.

Dans ce contexte, les quarante dernières années ont été marquées par la mise en œuvre mondiale de mesures diverses pour encourager l'homme à sauvegarder l'environnement de la planète, sans remettre en cause le développement économique et social. Plusieurs Conférences internationales sur l'environnement (1972 : Conférence des Nations Unies sur l'Environnement Humain ; 1992 : Sommet de la Terre à Rio ; 2002 : Sommet Mondial sur le Développement Durable) ont posé des jalons pour une prise en compte des problématiques de protection de l'environnement (tels les Agendas 21 en 1992 et le protocole de Kyoto en 1997). En parallèle, des Commissions se multiplient dont la Commission Brundtland (1983). La France s'est associée à cette tendance internationale et des rapports liés à l'évaluation des politiques publiques, tels le « rapport Boiteux », reflètent cette préoccupation (Boiteux 2003).

Actuellement, le « développement durable » est devenu une référence incontournable dans nombre de décisions nationales et internationales. Cette expression a été employée pour la première fois en 1980 par l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature), ensuite reprise par de nombreuses personnes et instances, acteurs de l'environnement ou non.

Le rapport Brundtland rédigé par G.H. Brundtland en 1987, propose une définition du concept de développement durable à laquelle on se reporte couramment aujourd'hui : « Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » (Brundtland 1987). Le développement durable apparaît dès lors comme un compromis entre générations pour répondre aux besoins actuels mais aussi du futur, et en introduisant l'idée des équilibres à rechercher entre les dimensions sociales, économiques et environnementales du développement de nos sociétés humaines. Par la suite, plusieurs autres définitions ont été proposées qui complètent ou précisent la définition du rapport Brundtland. Citons par exemple une définition adoptée par la Commission des Communautés Européennes : le développement durable est « une politique et une stratégie visant à assurer la continuité dans le temps du développement économique et social, dans le respect de l'environnement, et sans compromettre les ressources naturelles indispensables à l'activité humaine » (Brodhag et al. 2004).

3. Enjeux actuel du transport : le transport « durable »

À la base, le développement durable reflète une préoccupation pour les impacts indirects et à long terme. La plupart des définitions d'aujourd'hui comprennent les trois catégories principales de préoccupation du développement durable: économique, sociale et environnementale (ou écologique), et certaines en assimilent d'autres telles que la gouvernance et la viabilité budgétaire (CST 2005; Litman 2009).

La durabilité/soutenabilité est un concept simple avec des implications complexes (Litman and Burwell 2006). Il reflète un changement de paradigme, un changement fondamental dans la façon dont on définit les problèmes et évalue des solutions. Il introduit une distinction entre la croissance (accroissement de la quantité) et le développement (amélioration de la qualité). Il met l'accent sur les résultats du bien-être social, comme la santé et la réussite de l'éducation, plutôt que sur la richesse matérielle

tels que le produit intérieur brut (PIB) qui mesure la quantité mais pas la qualité des activités de marché. Parce que la durabilité s'efforce de protéger les ressources naturelles et les systèmes écologiques, elle favorise aussi des politiques qui minimisent la consommation des ressources comme l'énergie, l'air, l'eau et la terre (Litman 2008).

La question importante de l'évaluation de la durabilité fait l'objet de nombreuses réflexions. A titre d'illustration, cette durabilité peut être évaluée en fonction d'une norme souple « soft standard », qui permet au capital naturel (Ressources naturelles de l'environnement et les systèmes écologiques) d'être remplacé par le capital humain (capacité de production industrielle), ou d'une norme dure « hard standard », qui rejette de telles substitutions. Par exemple, tandis que la durabilité « soft » accepte un épuisement des ressources naturelles si l'on peut produire la quantité équivalente de ce type de ressource, la durabilité « hard » n'accepte pas cette solution et n'admet que la conservation de toute sorte de ressource. Elle préfère la préservation écologique à la croissance industrielle.

Le développement durable traite des questions locales, régionales et mondiales et nécessite une coordination multi-juridictionnelle. Il n'existe actuellement pas d'objectif ou de cadre de durabilité universellement acceptés pour la répartition des responsabilités afin de parvenir à un tel objectif entre les différentes juridictions et secteurs. Toutefois, les accords internationaux tels que le Protocole de Montréal relatif aux gaz qui dégradent la couche d'ozone et le Protocole de Kyoto sur les émissions concernant le changement climatique, constituent des progrès vers une telle coordination.

Une norme de durabilité « soft » tolère une croissance des effets des transports sur l'environnement si ceux-ci sont nécessaires au développement économique, ou si des impacts négatifs peuvent être compensés par d'autres secteurs, telles que la réduction de la pollution par les industries lourdes. Une norme de durabilité « hard » met davantage l'accent sur la réduction d'impact environnemental du secteur de transport, et tout particulièrement sur la réduction des impacts des véhicules à moteur.

Les transports ont des impacts économiques, sociaux et environnementaux. Ils sont un des principaux postes d'émission des GES (le premier en France) et en outre, sont étroitement liés à la croissance économique, d'où la difficulté d'en maîtriser les évolutions tendancielles. Ils constituent de ce fait un élément majeur du débat sur la durabilité. La durabilité soutient un changement de paradigme se produisant dans la planification des transports. Tout d'abord, le transport a été évalué principalement en termes de déplacement (mouvement physique) ; il l'est aujourd'hui, de plus en plus, en termes de mobilité avec l'accessibilité (la capacité des gens à obtenir des biens et des services souhaités). De nombreux facteurs influent sur l'accessibilité, y compris le déplacement, l'utilisation des sols (la localisation des activités). La complémentarité possible entre services de mobilité et de télécommunication peut également être prise en compte. La planification basée sur la mobilité avec la notion d'accessibilité, élargit la gamme de solutions qui peuvent être appliquées aux problèmes de transport, par exemple, la congestion peut être réduite en améliorant l'accessibilité des terrains ou des télécommunications, en diminuant le trafic des véhicules (Litman 2008).

Plusieurs définitions du transport durable ont été proposées (CST 2005; Litman 2009) :

- Sustainable development "meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs." (WCED 1987)
- "Sustainability is equity and harmony extended into the future, a careful journey without an endpoint, a continuous striving for the harmonious co-evolution of environmental, economic and socio-cultural goals." (Mega and Pedersen 1998)
- "The common aim [of sustainable development] must be to expand resources and improve the quality of life for as many people as heedless population growth forces upon the Earth, and do it with minimal prosthetic dependence. (Wilson 1998)
- "…sustainability is not about threat analysis; sustainability is about systems analysis. Specifically, it is about how environmental, economic, and social systems interact to their mutual advantage or disadvantage at various space-based scales of operation." (TRB 1997)
- Sustainability is: "the capacity for continuance into the long term future. Anything that can go on being done on an indefinite basis is sustainable. Anything that cannot go on being done indefinitely is unsustainable." (Center for Sustainability 2004).
- Environmentally Sustainable Transportation (EST) is: Transportation that does not endanger public health or ecosystems and meets needs for access consistent with (a) use of renewable resources at below their rates of regeneration, and (b) use of non-renewable resources at below the rates of development of renewable substitutes. (OECD 1998)
- "The goal of sustainable transportation is to ensure that environment; social and economic considerations are factored into decisions affecting transportation activity." (MOST 1999)

Parmi elles, la définition suivante aura notre préférence, car elle est compréhensive et indique clairement que le transport durable doit équilibrer les objectifs économiques, sociaux et environnementaux suivants dits « triple bottom line ». En même temps, elle a une portée plus large et reconnaît la spécificité des problèmes de transport. Selon cette définition, un système de transport durable (ECMT 2004; CST 2005):

- Permet l'accès de base et les besoins de développement des individus, des entreprises et de satisfaire la société en toute sécurité et d'une manière compatible avec la santé de l'homme et de l'écosystème, et favorise l'équité des générations successives et entre les générations.
- Est abordable, fonctionne équitablement et efficacement, offre un choix des modes de transport et appuie une économie concurrentielle, ainsi que le développement régional équilibré,
- Limite les émissions et les déchets dans la mesure où la planète peut les absorber, utilise les ressources renouvelables au taux ou en dessous de leur taux de génération, et utilise les ressources non-renouvelables à un taux égal ou inférieur au taux du développement de substituts renouvelables, tout en minimisant l'impact sur l'utilisation des terrains et l'émission de bruit (Litman 2009).

En conclusion, le problème concernant le transport durable soulève un certain nombre de questions relatives à la définition de la durabilité et du transport durable, comment les buts et objectifs sont-ils définis et évalués, et quel type de processus de décision doit être utilisé.

Le développement durable tend intentionnellement à soutenir la planification des transports et des réformes du marché qui proposent les systèmes de transport les plus diversifiés et économiquement les plus efficaces, et surtout les plus adéquats pour que nous puissions effectuer nos activités sociales avec moins de dépendance à l'automobile. Ces « réformes progressives » aident à accroître l'efficacité économique, à réduire la consommation des ressources et des impacts néfastes sur l'environnement, et à améliorer la mobilité pour tous soit comme automobilistes soit comme non automobilistes.

Nous tenons compte dans notre recherche plus précisément du 2ième et du 3ième aspect de la notion du transport durable telle que nous venons de l'exposer: efficacité en termes d'offre de service de transport et moins d'impact sur l'environnement en termes d'efficacité énergétique et d'utilisation d'une énergie moins polluante.

4. Évaluation et choix des systèmes de transport

L'évaluation consiste à déterminer et à estimer l'importance et/ou la valeur d'un projet qui a pour but la construction d'un bien ou la mise en place d'un service. Sa finalité est de permettre de faire un choix entre plusieurs projets ou de décider de l'utilité ou non de réaliser un projet ou de le continuer.

En ce qui concerne l'évaluation, celle-ci se décompose en quatre catégories :

- Évaluation des impacts (ou opérationnelle) : une analyse de l'ensemble des impacts observés ou attendus par l'entremise du projet. Elle peut consister à mesurer les effets du projet sur la sécurité, sur l'environnement (pollution, bruit), sur le trafic (vitesse, gain de temps), sur le confort des usagers (fluidité de la circulation), etc.,
- Évaluation de l'acceptabilité par les utilisateurs : l'acceptabilité est la capacité d'un système à être admis dans un processus de travail ou dans un processus de prise de décision par les utilisateurs. Ici, l'évaluation de l'acceptabilité est celle qui teste la réaction d'un public cible face à la mise en place d'un nouveau projet de transport,
- Évaluation technique : l'évaluation technique porte sur la faisabilité et les performances techniques des systèmes. Cela signifie l'analyse des performances des différents composants comme la fiabilité des matériels, leur consommation d'énergie et d'une manière générale la disponibilité de fonctionnement des systèmes (taux de panne ou de défaillance),
- Évaluation socio-économique : l'évaluation socio-économique est la dernière catégorie d'évaluation, qui utilise les résultats les plus significatifs des évaluations techniques et d'impact en les transformant en données monétaires

selon un cadre qui lui est propre. Compte tenu des contraintes ou des objectifs poursuivis, l'évaluation socio-économique propose une solution qui est alors dite optimale ou un ensemble de solutions dites satisfaisantes parmi l'ensemble des variantes candidates.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'évaluation des systèmes de transport urbain qui généralement utilise une évaluation socio-économique. Pour celle-ci, est majoritairement utilisée une analyse de type coûts/avantages, laquelle pose de notre point de vue des difficultés et des insuffisances. Nous proposons donc une autre démarche qui repose sur une analyse multicritère.

Pourtant, avant de commencer, il est essentiel de regarder ce qui se passe aujourd'hui, lorsqu'en particulier on fait appel à une analyse coûts/avantages.

4.1. Analyse coûts/avantages

La méthode principalement utilisée en France pour attribuer des fonds publics pour un projet de transport par exemple, est d'effectuer une analyse coûts/avantages. Cette évaluation dresse un bilan socio-économique pour la collectivité et, par conséquence, son but est souvent d'alimenter le décideur en données monétarisées, qui apportent une dimension synthétique à l'ensemble des évaluations.

4.1.1. Principes de l'analyse coûts/avantages

L'analyse coûts/avantages se fonde sur la théorie du surplus de l'usager. Elle repose sur le principe selon lequel il est possible d'associer à un projet une valeur socio-économique qui peut être définie comme mesure de la résultante pour la collectivité des éléments favorables (avantages) et éléments défavorables (inconvénients) à la réalisation du projet (Debrincat et Meyère 1998).

Pour l'application, elle ne prend généralement en compte que l'intérêt de la collectivité dans son ensemble pour la réalisation d'un projet. On ne s'intéresse donc pas aux points de vue individuels des différents agents économiques (usagers, collectivités publiques, entreprises, ni aux transferts entre ces agents) mais seulement au bilan global du point de vue d'ensemble (par exemple, celui de l'État) de la création de richesse et des dépenses liées au projet.

De plus, il faut mesurer les coûts/avantages par une valeur « sûre », en principe la monnaie, ce qui oblige à donner toujours un équivalent monétaire à chaque coût/avantage, malgré les effets variés d'un projet, directs et/ou indirects, qui ne sont pas toujours monétaires.

Selon cette théorie, l'évaluation socio-économique d'un projet de transport doit donc être réalisée pour faire le bilan monétarisé des pertes et des gains qu'il implique pour la collectivité, en « calculant » la différence entre les avantages et les coûts de toutes natures, exprimés en monnaie constantes et actualisées, induits par le projet. Ces coûts et ces avantages sont calculés par rapport à une situation de référence, définie comme

étant la situation la plus probable optimisée en l'absence de réalisation d'un projet de transport.

Les principaux critères de choix d'investissement pour cette méthode d'évaluation socio-économique sont la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rentabilité interne (TRI).

La valeur actuelle nette (VAN) mesure la création de valeur engendrée par l'investissement. C'est par définition *« la différence entre les avantages et les coûts de toutes natures, eux-mêmes actualisés, induits par le projet »*. Elle est égale à la différence entre la somme actualisée des avantages nets et le coût économique d'investissement. Les coûts et les avantages actualisés sont calculés par rapport à une situation de référence. Le calcul est fait en monnaie constante :

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{A_{t_0+t}}{(i+1)^t}$$

En prenant les définitions ci-dessous :

I : coûts d'investissement,

A : avantages net de l'année $t_0 + t$,

i : taux d'actualisation.

Le taux de rentabilité interne (TRI) est le taux d'actualisation qui annule la VAN. Par exemple, si cette valeur est supérieure au taux d'actualisation, l'opération est intéressante pour la collectivité. Ce critère permet de mesurer le degré d'opportunité et le risque associé au projet mais ne permet pas de classer des projets indépendants.

$$VAN = 0 = -I + \sum_{t=1}^{\infty} \frac{A_{t_0+t}}{(i_{tri}+1)^t}$$

où :

i_{tri} : taux de rentabilité interne (TRI).

La décision d'investissement doit, donc, se baser uniquement sur les flux de trésorerie induits par l'investissement. Cependant, en pratique, il n'est pas facile de trouver un bon compromis reprenant tous les avantages et inconvénients sans oublier les coûts.

4.1.2. Critiques de l'analyse coûts/avantages

La situation actuelle du calcul socio-économique appliqué aux infrastructures de transport est insatisfaisante. Ces méthodes conduisent généralement à affecter les meilleures rentabilités socio-économiques aux investissements routiers compte tenu du poids prépondérant des gains de temps pour les voyageurs dans les bilans coûts/avantages tels qu'ils sont réalisés aujourd'hui. Le rapport Boiteux 2 en 2001 a encouragé à améliorer cette méthode en mettant en évidence les apports potentiels mais il n'est pas arrivé à éviter des limites à ces méthodes d'évaluation.

D'autant plus que dans l'analyse de décisions récentes, il est exigé que les choix politiques fondés sur des objectifs multiples tiennent compte, explicitement ou implicitement, des aspects quantitatifs mais aussi des mesures qualitatives telles que la protection de l'environnement et le développement durable (effets de long terme) qui prennent de plus en plus d'importance.

Selon l'article de Debrincat (Debrincat et Meyère 1998), bien que cette méthode de l'analyse coûts/avantages soit d'usage courant, son application n'est pas exempte de critiques, surtout en milieu urbain, puisqu'elle maîtrise mal tous les aspects liés aux problèmes urbains plus ou moins mesurables. Les principales critiques sont décrites ci-après :

- La décision non-cohérente : les décisions prises ne correspondent pas toujours aux conclusions des analyses de rentabilité socio-économique. Cela peut s'observer souvent dans la compétition entre investissements routiers et investissements de transports collectifs étant donné les taux de rentabilité plus élevés pour les projets autoroutiers.
- La compensation : La méthode utilisée est compensatoire. Un gain compense une perte même dans les domaines d'impacts. Ainsi les accidents (blessés, morts) peuvent être compensés par des gains de temps, ce qui n'est pas acceptable et ne doit pas être accepté. De plus, de nombreux petits gains de temps sont équivalents à des améliorations substantielles de la desserte pour un petit nombre de personnes, ce qui pose le problème de l'incompatibilité de l'échelle. Cette méthode conduit à masquer les effets négatifs puisqu'au final c'est un avantage global qui est présenté. En outre, d'un point de vue théorique, le postulat d'additivité des coûts est contestable : il conduit en particulier à ignorer les effets systémiques (Agenais et Laterrasse 2007).
- Peu transparent : Même si les grands postes qui composent le bilan coûts/avantages sont détaillés, ces résultats restent peu parlants pour les non-spécialistes des calculs de rentabilité socio-économique. Il est donc quasi impossible de discuter le résultat sauf à se plonger dans les détails de calcul.
- L'absence des certains aspects : de nombreux impacts sont absents de l'évaluation socio-économique. Lorsque les effets d'un projet ne sont pas monétarisables sur un marché ou qu'il s'agit d'impacts non quantifiables, on ne peut en tenir compte dans le bilan coûts/avantages. Ainsi, des thèmes comme les objectifs d'aménagement du territoire ou les effets sur l'aménagement urbain, le confort ou la régularité sont absents[10].
- La monétarisation : la monétarisation telle qu'elle est effectuée aujourd'hui conduit à donner un poids considérable pour la voiture particulière considérant que la capacité est suffisante. De plus, si les projets visent à améliorer l'aspect, dit qualitatif, cette méthode a du mal à les valoriser correctement. Ajoutons que les méthodes de monétarisation des coûts indirects (impacts de la pollution sur la santé par exemple) donnent lieu à de nombreuses controverses.

[10] Mais une présentation de ces impacts qui ne figurerait qu'à titre complémentaire de l'analyse socio-économique risquerait de faire apparaître ces éléments comme quantité négligeable face aux résultats socio-économiques qui sont eux chiffrés (Debrincat et Meyère, 1998).

- La monétarisation fait en outre appel à des valeurs tutélaires elles-mêmes contestables (il suffit de comparer les valeurs retenues pas les différents pays de l'union européenne pour la valeur du temps ou pour la valeur de la vie humaine pour s'en rendre compte).
- La méthode de calcul lié aux gains de transfert modal : Les évaluations reposent, pour une grande part, sur le transfert modal dont l'estimation reste sujette à caution. les gains liés au transfert modal de la route vers les transports collectifs peuvent représenter une part importante des avantages. Or, les méthodes de modélisation qui conduisent à l'estimation du choix modal diffèrent suivant les cas et les organismes, ce qui conduit à s'interroger sur la pertinence des diverses approches et les possibilités de comparaison entre des analyses économiques menées par des organismes différents. Il ne s'agit pas ici de mettre en cause la qualité des outils utilisés mais plutôt de montrer la fragilité des résultats.
- L'incertitude du résultat de calcul : Cette méthode fait une trop grande confiance aux résultats d'un calcul qui est fortement sujet à caution. De plus, elle ne donne pas toujours le résultat satisfaisant notamment pour les projets en milieu urbain car les hypothèses sous-jacentes de cette analyse ne sont pas suffisantes pour traiter le problème urbain complexe.

Au-delà de l'existence de problèmes auxquels l'opinion publique est mieux sensibilisée aujourd'hui (la sécurité, le développement durable et le changement climatique par exemple), - laquelle ne remet pas nécessairement en cause le principe de l'analyse coûts/avantages à condition que celle-ci puisse intégrer des mises à jour convaincantes des valeurs tutélaires correspondantes et surtout une prise en compte acceptable des effets de long terme, - force est de constater une défiance croissante des citoyens à l'égard des différentes catégories d'experts et de leurs méthodes. Cette défiance conduit à poser le problème de l'acceptabilité politique et sociale du calcul économique et met en lumière le besoin d'en modifier la pratique opérationnelle pour réduire l'écart entre les spécialistes et les décideurs (CGPC 2008).

Il apparaît donc nécessaire, soit de renforcer la pertinence du calcul économique tel qu'il est pratiqué pour l'évaluation des politiques et projets en matière de transport, soit d'adopter une nouvelle méthode d'évaluation qui semble traiter mieux les exigences d'aujourd'hui, par exemple, l'analyse multicritère.

4.2.Recommandation du Certu pour le choix du TCSP

Il existe, en théorie, deux méthodes différentes pour évaluer un projet de transport en site propre : l'évaluation socio-économique et l'analyse multicritère. Les deux approches sont parfois mises en opposition, l'une étant jugée trop subjective, l'autre trop agrégative. L'analyse multicritère est pertinente puisqu'elle correspond à une analyse par objectif et n'agrège pas. L'évaluation socio-économique et le bilan coûts/avantages inversement ont l'avantage d'être une approche que l'on peut plus facilement normaliser, et permettent de comparer des éléments *a priori* difficilement comparables (Certu 2002).

Dans cette section, nous allons regarder une étude du Certu concernant l'évaluation des projets de transport. L'étude du Certu, considérée comme le seul ouvrage national de référence a finalement choisi, comme l'évaluation générale des projets de transport, l'évaluation socio-économique pour le projet de TCSP. Malgré cela, il est à noter que l'évaluation socio-économique du projet n'est pas le seul élément qui concourt au choix des décideurs, mais est un outil au service du choix le plus judicieux possible

Cette étude établit une série de recommandations pour améliorer la rigueur des évaluations. Plus précisément, elle indique des analyses de cohérence entre politique de transport et projet, présente des analyses fines permettant d'identifier les gains et coûts supportés par les différents acteurs du projet, et réalise des analyses de risques et d'incertitudes pour mieux appréhender la sensibilité du projet à ce qui n'est pas maîtrisé. La figure suivante montre une grille de recommandation donnée par le Certu qui utilise essentiellement une analyse coûts/avantages relativement simple à appliquer.

	Coûts d'investissement	Coûts d'exploitation du réseau de transports publics	Recettes globales sur le réseau	Avantages		Coefficient d'actualisation à appliquer à chacun de ces coûts	Total actualisé
				Coût généralisé des déplacements des usagers des différents modes	Effets externes, impacts sur l'environnement		
Année enquête d'utilité publique						$\times 1/(1+a)^{-DUP}$	B_{-DUP}
.....						...	...
- 2 ans						$\times 1/(1+a)^{-2}$	B_{-2}
- 1 an						$\times 1/(1+a)^{-1}$	B_{-1}
Année avant la mise en service						Pas d'actualisation	B_0
1re année						$\times 1/(1+a)$	B_1
2e année						$\times 1/(1+a)^2$	B_2
...	...	...	...	...	...	...	...
ie année	...	...	...	...	...	$\times 1/(1+a)^i$	Temps de retour sur investissement égal à 0 tel que : $\sum_{i=-DUP}^{i=0} Bi = 0$
...	...	...	...	...	...	...	...
30e année						$\times 1/(1+a)^{30}$	B_{30}
Total actualisé							Bénéfice actualisé net du projet

Différence case à case entre le tableau Projet et le tableau scénario de référence

Figure 1: Exemple de recommandation du Certu pour le choix du TCSP
(source : Certu)

4.2.1. Problèmes liés à la recommandation du Certu

Cependant, cette recommandation du Certu n'est pas parfaite et a des limites, notamment, les limites de l'application du calcul économique en milieu urbain. Ces limites sont essentiellement liées à notre manque de connaissance des mécanismes de transformation du milieu urbain, et en particulier des interactions entre urbanisme et transports. En effet, la complexité des phénomènes en milieu urbain ne permet pas de tout prendre en compte par le seul calcul économique, selon le Certu (Certu 2002) :

- Les modèles actuellement disponibles pour planifier l'évolution des déplacements individuels et en transports publics, ne prennent pas en compte toute la complexité des phénomènes urbains.
- La modélisation du choix modal connaît des difficultés à représenter des éléments réputés importants dans le choix des usagers, par exemple, la prise en compte du stationnement, l'accès au réseau de transport collectif par rabattement VP ou à pied et les tarifications.
- Le système des transports urbains n'est pas isolé, il y a des interactions entre urbanisme, transport, habitat et activités économiques. Pour autant, les effets d'une infrastructure sur l'urbanisation ne sont pas mécaniques et se situent dans une échelle de temps différente des effets sur le trafic. Ces effets sur la structure urbaine, difficilement imputables au seul projet de TCSP, sont moins bien connus.
- Les projets de transport en milieu urbain ne sont pas indépendants les uns des autres, parce que le réseau de transport est très maillé et qu'en milieu urbain on a souvent plusieurs possibilités d'itinéraires.

Ainsi, l'évaluation économique telle qu'elle est appliquée aujourd'hui pour l'évaluation des projets de TCSP est très hétérogène, cela veut dire que le résultat peut varier selon les méthodes utilisées. Le Certu recommande donc de développer des observatoires qui permettent de préciser la modélisation du calcul économique et éventuellement d'améliorer l'évaluation d'un TCSP.

Cela signifie que les méthodes d'évaluation des projets de transport couramment utilisées actuellement ne sont ni Parfaites, ni même vraiment satisfaisantes. Nous allons donc les étudier plus profondément non seulement sur l'aspect « calcul économique » mais aussi sur notre connaissance des phénomènes urbains liés au transport urbain.

4.3. Démarche proposée

Notre démarche est maintenant devenue évidente. Nous avons déjà évoqué les problèmes et les limites liés à l'utilisation d'une méthode d'analyse coûts/avantages dont la recommandation du Certu.

À partir de la connaissance des transports urbains guidés de surface, nous allons donc essayer de faire une analyse comparative sur les 6 systèmes que nous avons choisis en appliquant une autre méthode que l'analyse coûts/avantages, c'est-à-dire l'analyse multicritère, plus précisément la méthode ELECTRE que nous avons retenue pour notre recherche. L'une des raisons de ce choix, que nous exposons au chapitre suivant, tient à ce que les projets de TCSP ont un impact à long-terme, qu'une méthode multicritère est mieux en capacité de prendre en compte.

Avant d'aborder le chapitre II, rappelons les conseils donnés par M. Émile Quinet, même s'il est favorable à l'analyse coûts/avantages, qui montrent des éléments importants dans les traitements à effectuer afin de mieux évaluer le projet de transport urbain (Quinet 1998) :

- Une meilleure connaissance des effets des transports sur l'urbanisme.
- Un perfectionnement des modèles de trafic.
- Éviter la manipulation des études économiques urbaines reposant sur des procédures de calcul complexes, faisant intervenir de nombreux paramètres mal connus. Puisqu'il est possible d'infléchir sa propre valeur pour orienter le résultat du calcul, on doit faire attention à cette possibilité de manipulation. Pour les éviter, nous devons surtout tenir compte des spécificités des processus de décision qui règnent en milieu urbain, de façon à:
    - Enserrer les calculs économiques dans des règles les plus strictes possibles réduisant les possibilités de manipulation.
    - Soumettre systématiquement ces études à des audits externes.

Dans le chapitre II, nous allons traiter des méthodes multicritère, et nous préciserons les raisons de notre choix méthodologiques pour une évaluation comparative des différents systèmes de transport guidé de surface.

DEUXIÈME CHAPITRE

Chapitre II : Méthodes d'Analyse Multicritère

Qu'est-ce que l'analyse multicritère ?

L'Analyse multicritère selon Frédéric Doyon est : « Une science technique vouée à l'éclaircissement de la compréhension d'un problème de décision et à sa résolution. Elle devient multicritère lorsque le problème comporte plusieurs objectifs conflictuels et multi-décideur, lorsque plusieurs parties prenantes ont des points de vue différents sur les objectifs considérés. » (Doyon 1994).

En prenante cette définition, nous présentons, dans ce chapitre, d'abord, un panorama des méthodes de sélection, y compris l'analyse multicritère, les plus utilisées pour la sélection d'une action ou d'une alternative dans un problème avec l'explicitation de leurs fondements. Ensuite nous justifierons notre choix pour la sélection d'une méthode multicritère ELECTRE.

Pour des raisons pratiques, nous classons les méthodes de sélection en trois catégories :

- Les méthodes basiques.
- Les méthodes d'optimisation mathématique.
- Les méthodes d'aide à la décision multicritère :
  - Méthode d'agrégation complète : approche du critère unique de synthèse
  - Méthode d'agrégation partielle : approche de surclassement de synthèse

1. Méthodes de choix

1.1. Méthodes basiques (élémentaires)

1.1.1. Méthode catégorique (Timmermans 1986)

La méthode catégorique consiste à faire une évaluation des performances de chaque action par rapport à chaque critère, et ce en affectant un « grade » : un terme catégorique simple, par exemple « bon », « insatisfaisant », « neutre ». On effectue dans une deuxième étape la somme des évaluations de chaque action pour obtenir un score global par action.

La méthode catégorique est l'une des méthodes les plus simples pour traiter un problème de sélection. Elle est facile à mettre en œuvre. Toutefois, elle fait appel à des jugements basés sur la mémoire et l'expérience du décideur. Par conséquent, les évaluations des actions par rapport aux critères ne sont pas précises.

La méthode catégorique permet la classification des actions les unes par rapport aux autres. La méthode catégorique utilise le même ordre d'importance pour tous les critères. La méthode catégorique est compensatoire.

1.1.2. Méthode de la somme pondérée (Timmermans 1986)

Cette méthode consiste à se fixer un ensemble de critères et à les classer en affectant à chacun d'eux un poids. La méthode de la somme pondérée se présente comme suit :

- Étape 1 : Identifier les critères pertinents à la problématique, C_i
- Étape 2 : Affecter des poids aux critères listés, traduisant l'importance relative des critères, P_i
- Étape 3 : Évaluer chaque action sur chacun des critères en se référant aux procédures développées à l'étape précédente.
- Étape 4 : Calculer le score global (weighted ratings) pour chaque action

	C_1	C_i	C_n	Somme pondérée	Score
	P_1	P_i	P_n		
Action A_1					
Action A_i					
Action A_n					

$$S(A_i) = \sum_{i=1}^{n} C_i \cdot P_i$$

La méthode de la somme pondérée est l'une de méthodes les plus utilisées. Elle a l'avantage d'être facile à comprendre et à mettre en œuvre. Toutefois, sa difficulté réside dans la définition de procédures de conversion des évaluations qualitatives en des évaluations quantitatives. La méthode de la somme pondérée est aussi compensatoire.

1.1.3. Méthode du « Maxmin » (Guitouni et Martel 1998)

La méthode « Maxmin » est utilisée pour choisir une action considérée comme la meilleure action parmi un ensemble d'actions.

Le terme « maxmin » indique que la procédure cherche à sélectionner le maximum (selon les actions) des évaluations minimums (selon les critères). Ainsi, la performance globale d'une action est déterminée par sa pire performance, « la force d'une chaîne correspond à celle de son maillon le plus faible ». Cette procédure est appropriée dans le cas où le décideur a une attitude pessimiste.

La procédure maxmin exige que les critères d'évaluation des actions soient commensurables. Une façon de faire est la normalisation. La méthode est facile à appliquer et est totalement non compensatoire.

1.2. Méthodes d'Optimisation mathématique multicritère

Les méthodes d'optimisation mathématique sont les plus utilisées, dans le domaine de la recherche scientifique, pour traiter le problème de sélection. Le problème est souvent formalisé sous la forme d'une ou de plusieurs fonctions objectifs et d'un ensemble de contraintes à respecter. Les modèles obtenus peuvent être linéaires ou non linéaires en fonction du problème à formaliser.

Les méthodes d'optimisation mathématique sont souvent exploitées en deux étapes.

- Étape de modélisation : elle consiste à formaliser le problème étudié en un modèle d'optimisation
- Étape de résolution : elle consiste à résoudre le modèle proposé.

Le problème de sélection est multicritère dans le sens où l'évaluation d'une action se fait souvent en considérant plusieurs critères à la fois. Dans cette section, on se limite à la présentation de méthodes d'optimisation mathématique permettant l'intégration de plusieurs critères. Cette intégration se fait de trois façons différentes :

- L'agrégation des critères en une seule fonction objective (Compromise Programming, Goal Programming, méthode du critère global ...).
- L'optimisation d'un critère dans la fonction objectif et l'intégration des autres critères dans les contraintes du modèle (ε-Constraint Method)
- La formulation du problème en un programme mathématique à objectifs multiples.

1.2.1. Goal programming

L'essence du goal programming (GP) réside dans le concept de satisfaction d'objectifs ; on se fixe un but à atteindre pour chacun des critères, et on résout ce problème selon les variantes choisies du GP[11] :

- Variante 1 (Standard Goal Programming): il s'agit de minimiser la somme des valeurs absolues des écarts par rapport aux buts (Charnes and Cooper 1961).
- Variante 2 (MinMax Goal Programming): il s'agit de minimiser l'écart maximum par rapport aux buts (Flavell 1976).
- Variante 3 (Lexicographic Goal Programming) : il s'agit de minimiser la somme des écarts par rapport aux buts d'une manière lexicographique (Ijiri 1965). Pour ce faire, on procède comme suit :
    - Étape 1 : Classer les critères par ordre d'importance.
    - Étape 2 : Sélectionner les actions qui minimisent l'écart par rapport au premier critère seulement, appelons ce sous-ensemble d'actions A_1.

[11] Pour toutes ces variantes du GP, il importe de procéder à une normalisation des évaluations pour éviter des biais dus à des échelles de mesure non commensurables. Plusieurs techniques de normalisation ainsi qu'un état de l'art du Goal Programming ont été présentés dans (Tamiz, Jones et al. 1998).

- Étape 3 : Parmi les actions de A_1, sélectionner celles qui minimisent la somme des écarts (ou bien la somme pondérée des écarts) par rapport aux 2 premiers critères (les 2 critères ayant la plus grande importance), le sous-ensemble obtenu est A_2.
- Étape 4 : Procéder de la même manière pour obtenir un sous-ensemble A_3 à partir des actions de A_2.
- Étape 5 : Continuer la procédure de proche en proche et arrêter lorsque la condition d'arrêt est satisfaite.

D'autres variantes du GP ont aussi vu le jour. On cite : le GP flou (Fuzzy GP), le GP non linéaire (Non linear GP), le GP stochastique (Stochastic GP).

Le Goal Programming a l'avantage d'aborder les problèmes sous l'angle de satisfaction d'objectif. Par ailleurs, le GP s'avère utile pour modéliser des problèmes qui n'ont pas de solution optimale, par exemple à cause de la non-satisfaction d'une contrainte. Pour ce faire, on demande au décideur d'expliciter ses souhaits, puis on propose un modèle GP qui permet de choisir l'action qui se rapproche le plus de ces souhaits.

La formulation d'un problème sous un modèle de GP n'a rien d'exceptionnel par rapport à un modèle mathématique. La différence entre les deux approches de modélisation est surtout philosophique : dans un modèle mathématique, on cherche une solution optimale (philosophie d'optimisation), alors que dans un modèle GP, on cherche à satisfaire des objectifs (philosophie de satisfaction).

Le GP dans sa forme standard peut générer des solutions non « performantes » dans le cas où les objectifs sur les critères sont fixés de façon pessimiste.

1.2.2. Méthode du critère global (Vincke 1989)

La méthode du critère global s'articule dans une optique de minimisation des écarts par rapport à la solution idéale sans procéder à une articulation a priori des préférences.

La méthode du critère global a l'avantage d'avoir une fonction objective facile à formuler. En outre, une normalisation des évaluations est faite implicitement par la définition même de la fonction objective. La méthode du critère global n'exige pas une articulation a priori des préférences. Comme pour le Compromise Programming, la méthode du critère global génère une solution médiocre si toutes les actions ne sont pas bonnes.

1.2.3. Méthode ε-Contrainte (Festa, Grandinetti et al. 2010)

La méthode du ε-Contrainte consiste à transformer un programme d'optimisation multi objectif en un problème d'optimisation mono objectif comportant des contraintes supplémentaires.

La méthode du ε-Contrainte est facile à mettre en place. Elle exige de fixer un seuil de performance sur n-1 critères. Le principal inconvénient de cette méthode est le fait qu'elle soit gourmande en temps de calcul s'il y a trop de contraintes. La méthode du ε-Contrainte est non compensatoire.

1.2.4. Programmation mathématique à objectifs multiples (Zopounidis et Pardalos 2010)

Un programme mathématique à objectifs multiples (PMOM) est un programme qui prend en compte plusieurs fonctions, chacune jouant le rôle d'un critère (on parle aussi de fonction critère). Chacune de ces fonctions possède un optimum, qui ne sera en général pas celui des autres fonctions. Ainsi, une solution optimale n'existe pas; car ce qui est optimal selon un critère ne l'est pas selon les autres critères. Il va donc falloir choisir une solution de compromis : solution jugée satisfaisante.

Dans un PMOM, on s'intéresse essentiellement à la détermination de l'ensemble des solutions efficaces.

La démarche classique pour résoudre un problème de PMOM suit les 2 étapes suivantes :

- Étape 1 : Appliquer le principe de dominance pour réduire l'ensemble A à l'ensemble des actions efficaces noté S.
- Étape 2 : Introduire les préférences du décideur pour réduire S à un ensemble plus restreint et, éventuellement, à une seule solution.

La programmation mathématique à objectifs multiples exige une articulation a posteriori des préférences. Dans une première étape, on détermine l'ensemble des solutions efficaces; dans une deuxième étape, on utilise les préférences du décideur pour explorer cet ensemble et déterminer la (les) meilleure(s) solution(s).

Comme il est énoncé, le traitement d'un programme mathématique à objectifs multiples peut, à tort, paraître aisé. En effet, l'étape 1 qui consiste à déterminer l'ensemble des solutions non dominées est très difficile à traiter car, hormis les cas où le modèle est linéaire (l'ensemble des solutions réalisables est convexe), peu de méthodes sont proposées pour déterminer les solutions optimales au sens de Pareto pour les cas où le modèle est linéaire mixte, ou non linéaire par exemple. C'est là un axe de recherche très porteur du domaine de la recherche opérationnelle et de l'analyse de la décision.

1.3. Méthode d'Analyse Multicritère : Les méthodes d'aide à la décision multicritère

Les méthodes de programmation mathématique permettent de traiter un problème de sélection avec contraintes, en d'autres termes, un problème de sélection où les solutions ne sont pas connues a priori. En revanche, les méthodes d'aide à la décision multicritère que nous présentons dans cette section supposent que les solutions sont connues a priori. La méthode de choix de la meilleure solution est conditionnée par la façon avec laquelle le décideur exprime ses préférences : par exemple, le décideur peut être indifférent vis à vis de deux solutions si la différence de leur coût est faible (une solution qui coûte 1 500 € et une solution qui coûte 1 480 €). Dans la théorie de la décision, cette étape du traitement du problème est appelée étape de modélisation des préférences. Nous la considérons comme un des points clés qui distingue les méthodes d'agrégation élémentaires et d'optimisation mathématique multi objectif des méthodes d'aide à la décision multicritère.

Nous présentons dans cette section les concepts fondamentaux liés à la théorie de la décision multicritère afin d'expliciter sa pertinence pour le traitement d'un problème de transport. Ensuite, nous étudions les méthodes d'agrégation multicritère les plus usitées. Enfin, nous expliquons notre choix d'une méthode d'aide à la décision multicritère, ici ELECTRE III et IV.

1.3.1. Rappels

Le processus d'aide multicritère à la décision peut généralement être vu comme un processus récursif (itératif), non linéaire, composé de 4 étapes principales (Guitouni 1998) :

- La définition des problématiques et la structuration de la situation (problème) de décision.
- L'articulation et la modélisation des préférences au niveau de chaque point de vue (modélisation des préférences locales).
- L'agrégation de ces préférences locales en vue d'établir un ou plusieurs systèmes relationnels de préférences globaux.
- La recommandation après avoir exploité l'agrégation.

Comme précisé auparavant, nous supposons que face à une situation décisionnelle, le décideur (la personne ayant connaissance des actions, des critères, ...) sera aidé par un homme d'étude (expert, personne sensée maîtriser le processus d'aide à la décision). Nous détaillons ci-dessous, chacune des étapes du processus d'aide à la décision multicritère.

La définition des problématiques et la structuration de la situation consiste à :

- Déterminer le type de problématique à résoudre : problématique de choix, problématique de tri, problématique de rangement ou problématique de description.
- Déterminer l'ensemble des actions à étudier.
- Recenser les critères selon lesquels les actions seront évaluées.
- Déterminer les évaluations de chacune des actions sur chacun des critères.

L'articulation et la modélisation des préférences consiste à :

- Définir les types de critères : vrai critère, pseudo critère, quasi critère, critère gaussien, etc. Ce travail de définition peut être élargi aux acteurs impliqués dans le projet à différents titre (y compris aux usagers i=ou aux riverains, s'il s'agit d'un projet d'infrastructures).
- Définir l'ordre d'importance des critères ainsi que leur poids si besoin est.
- Définir, et ce selon la méthode d'agrégation retenue, les fonctions d'utilité partielle, les fonctions de valeur, les comparaisons par paires d'actions.

L'agrégation des préférences locales consiste à exploiter les évaluations partielles des actions sur les différents critères afin de générer une évaluation globale.

L'exploitation consiste à exploiter les résultats obtenus à l'étape d'agrégation des préférences locales pour choisir, ranger ou trier les actions.

Selon Roy (Roy 1985), dans certains contextes décisionnels, une modélisation élaborée des préférences du décideur est requise. Selon la manière d'agrégation des préférences du décideur, il est possible de distinguer différentes approches :

- l'approche du critère unique de synthèse évacuant l'incomparabilité. Ces approches sont exploitées dans le cas où le décideur est capable de juger toute paire d'actions (*a*, *b*) et cela selon un des cas suivant : soit *a* est préférée à *b*, soit *b* est préférée à *a*, soit le choix est indifférent entre *a* et *b*. Il n'y a donc pas d'incomparabilité entre deux actions.
- l'approche du surclassement de synthèse. Ces approches permettent l'incomparabilité entre actions. Certaines sont caractérisées par des structures de préférence forte, faible, d'indifférence, ou d'incomparabilité.
- l'approche du jugement local interactif. Ces approches sont caractérisées par une interaction continue entre l'homme d'étude et le décideur tout au long du processus d'aide à la décision.

1.3.2. Méthode d'agrégation complète : approche du critère unique de synthèse

1.3.2.1. TOPSIS : Technique for Order by Similarity to Ideal Solution (Hwang et Yoon 1981)

L'idée fondamentale de cette méthode consiste à choisir une solution qui se rapproche le plus de la solution idéale (meilleure sur tous les critères) et de s'éloigner le plus possible de la pire solution (qui dégrade tous les critères).

- Étape 1 : Normaliser les performances selon une formule prédéfinie (E')
- Étape 2 : Calculer le produit des performances normalisées par les coefficients d'importance relative des attributs (e''_{ij})
- Étape 3 : Déterminer les profils idéal (a^*) et anti-idéal (a_*)
- Étape 4 : Calculer la distance euclidienne par rapport aux profils a^* et a_* (D_i^* et D_{i*})
- Étape 5 : Calculer un coefficient de mesure du rapprochement au profil idéal (C_i^*)
- Étape 6 : Ranger les actions en fonction des valeurs décroissantes de C_i^*

La méthode TOPSIS permet d'ordonner les actions. Son grand apport est l'introduction des notions d'idéal et d'anti-idéal. Elle est facile à appliquer. En outre, elle est sensible à la volonté du décideur. Toutefois, certaines limites caractérisent cette méthode : les attributs doivent être de nature cardinale, les préférences sont fixées a priori. Par ailleurs, si toutes les actions sont mauvaises, la méthode propose la meilleure action parmi les mauvaises. La méthode TOPSIS est partiellement compensatoire.

1.3.2.2. SMART : Simple Multi-Attribute Rating technique (Edwards 1971)

La méthode SMART consiste à utiliser la forme additive pour l'agrégation des évaluations sur les différents critères. Cette approche a été justifiée par le fait que dans certains cas (peu ou pas d'interactions entre les actions envisagées) on obtient d'aussi bonnes approximations avec la forme additive qu'avec d'autres formes non linéaires qui sont beaucoup plus complexes.

La méthode SMART se présente comme suit :

- Étape 1 : Mettre les critères selon l'ordre décroissant d'importance.
- Étape 2 : Déterminer le poids de chaque critère.
- Étape 3 : Normaliser les coefficients d'importance relative entre 0 et 1 : faire la somme des coefficients d'importance et diviser chaque poids par cette somme.
- Étape 4 : Mesurer la localisation de chaque action sur chaque critère ($u_j(a_i)$). Les évaluations des actions se font sur une échelle variant de 0 (minimum plausible) à 100 (maximum plausible).
- Étape 5 : Déterminer la valeur de chaque action selon la somme pondérée suivante :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^{n} \pi_j u_j(a_i), \quad i=1, 2, \ldots\ldots, m.$$

- Étape 6 : Classer les actions selon l'ordre décroissant de $U(a_i)$.

La méthode SMART est facile à exploiter. Elle exige une articulation *a priori* des préférences, et une évaluation des actions sur une échelle unique (échelle cardinale). La méthode SMART utilise la forme additive, elle est ainsi compensatoire.

1.3.2.3. MAVT : Multiple Attribute Value Theory (Keeney et Raifa 1976)

La méthode MAVT repose sur l'idée fondamentale suivante : tout décideur essaie inconsciemment (ou implicitement) de maximiser une fonction $V = V\ [g_1, \ldots, g_n]$ qui agrège tous les attributs. La particularité de la méthode MAVT réside dans l'idée de construction d'une fonction de valeur partielle pour chaque attribut. La meilleure action sur un attribut aura une valeur partielle (par rapport à l'attribut étudié) égale à 1 et la pire des actions aura une valeur partielle égale 0. En posant des questions au décideur, nous construisons les fonctions de valeur partielle. Nous construisons ensuite, et ce en fonction des caractéristiques des préférences du décideur, la fonction de valeur V. La méthode MAVT s'applique dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite, une articulation a priori des préférences et un univers déterministe (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont certaines).

La méthode MAVT s'applique comme suit :

- Étape 1 : Évaluer chacune des actions selon chaque critère (construire la matrice de décision : tableau multicritère).

	g_1		g_j		g_n
a_1	..	..	..	..	..
	..	..	..	..	..
a_j	..	..	g_{ij}	..	..
	..	..	..	..	..
a_m	..	..	..	..	..
	$v_1(g_1)$	..	$v_j(g_j)$	..	$v_n(g_n)$

- Étape 2 : Construire des fonctions de valeur partielle pour chaque critère (traduire le tableau multicritère en utilisant les valeurs). Une synthèse de plusieurs méthodes de construction des fonctions de valeur partielle a été présentée dans [Farquhar 1984].

	$v_1(g_1)$	..	$v_j(g_j)$	..	$v_n(g_n)$
a_1	..	..	..	..	..
	..	..	..	..	..
a_j	..	..	$v_j(g_j(a_1))$	..	..
	..	..	..	..	..
a_m	..	..	..	..	..

- Étape 3 : Établir les poids des critères.
- Étape 4 : Calculer l'évaluation globale pour chaque action en utilisant une forme d'agrégation appropriée.

$$V[g_1(a_i),....., g_n(a_i)]=f(v_1[g_1(a_i)],....., v_n[g_n(a_i)])$$

- Étape 5 : Déterminer la meilleure action (l'action qui maximise la valeur *V* : celle qui a le plus grand score).
- Étape 6 : Faire des analyses de sensibilité.

Cette méthode est d'inspiration anglo-saxonne et est notamment utilisée aux États-Unis dans des problèmes d'aide à la décision, des problèmes d'économie, de finance et d'actuariat [Vincke 1989]. La méthode MAVT est une procédure très exigeante du point de vue informationnel. Par ailleurs, la construction des fonctions de valeur n'est pas toujours une tâche évidente. La méthode MAVT exige une articulation a priori des préférences, et une évaluation des actions sur des échelles cardinales (on utilise les loteries pour déterminer les fonctions de valeur). La construction de la fonction analytique V est une tâche ardue. L'exploitation de la forme additive n'est possible que sous des hypothèses très restrictives du point de vue théorique ([Pomerol et Romero, 1993], [Keeney et Raifa, 1976]). La structure de préférence utilisée dans la méthode MAVT est du type (P, I). La méthode MAVT est partiellement compensatoire.

1.3.2.4. MAUT : Multiple Attribute Utility Theory (Keeney et Raifa 1976)

La méthode MAUT repose sur la même idée que la méthode MAVT. En revanche, elle s'applique dans le cas où les évaluations des actions par rapport aux attributs sont imprégnées d'incertitude (aléatoire). A ce moment, on parle de fonction d'utilité et non plus de fonction de valeur. La méthode MAUT s'applique alors dans un contexte caractérisé par un ensemble d'actions explicite (fini), une articulation a priori des

préférences, et un univers incertain (les évaluations des actions par rapport à chaque attribut sont incertaines). La méthode MAUT exige les mêmes étapes que la méthode MAVT.

Comme la méthode MAVT, la méthode MAUT est très exigeante d'un point de vue informationnel. Les fonctions d'utilité sont difficiles à concevoir. En outre, MAUT exige plusieurs vérifications telles que l'indépendance mutuelle au sens de l'utilité.

La méthode MAUT exige une articulation a priori des préférences, et une évaluation des actions sur des échelles cardinales (on utilise les loteries pour déterminer les fonctions de valeur). La structure de préférence est du type (P, I). La méthode MAUT est partiellement compensatoire.

1.3.2.5. UTA : Utility Theory Additive (Jacquet-Lagreze, Meziani et al. 1987)

La méthode UTA se base sur l'idée suivante : nous supposons que le décideur connaît bien un sous ensemble d'actions A'(A'$\subset$ A). Nous cherchons à estimer la fonction d'utilité (ayant une forme additive) en s'approchant le plus possible des jugements portés par le décideur sur le sous-ensemble A'. Pour ce faire, on sélectionne un sous-ensemble A'(A'$\subset$ A) d'actions que le décideur connaît bien et on demande ensuite au décideur de :

- Classer les actions de A'.
- Donner les critères significatifs 1, 2, ..., j, …, n.
- Donner les évaluations des actions de A' par rapport aux critères 1, 2, …, j, …n (matrice des jugements).

On procède après à un ajustement appelé « régression ordinale » : cette étape consiste à déterminer la fonction d'utilité totale qui colle le mieux avec les données (classement des actions et la matrice des jugements). La fonction d'utilité obtenue peut être considérée comme une estimation, à un terme d'erreur près, de la vraie fonction d'utilité :

$$U(a_i) = \sum_{j=1}^{n} u'_j(e_{ij}) + \sigma(a_i)$$

où : $u'_j(e_{ij})$ désigne l'utilité de l'action a_i sur le critère j et $\sigma(a_i)$ désigne l'erreur associée à l'estimation de $u_j(a_i)$.

La méthode UTA s'applique en procédant comme suit :

- Étape 1 : Déterminer les évaluations extrêmes e^*_j et e_{j*} et écrire les valeurs des actions de A' selon l'expression avant.
- Étape 2 : Écrire la contrainte de normalisation des poids des critères :

$$\sum_{j=1}^{n} u'_j(e^*_j) = 1$$

- Étape 3 : Diviser, pour chaque critère j, l'intervalle $[e^*_j\ ,\ e_{j*}]$ en α_j intervalles notés $[e_j^l\ ,\ e_j^{l+1}]$, avec

$$e_j^l = e_{j*} + \frac{l-1}{\alpha_j}(e^*_j - e_{j*}), \qquad l=1, 2, \ldots\ldots, \alpha_j$$

- Étape 4 : Appliquer la transformation ci-après :

$u'_j(e_j^{l+1}) - u'_j(e_j^l) > 0, \forall j, l$ *où* $[e_j^l\ ,\ e_j^{l+1}]$ *est un intervalle de valeurs de* g_j

Ce qui revient à dire que les fonctions d'utilité partielle sont monotones.

- Étape 5 : Déterminer les valeurs $u'_j(e_j^l)$. Dans la méthode UTA, on détermine les $u'_j(e_j^l)$ et effectue des interpolations linéaires entre ces points. En d'autres termes,

Si $z_j \in \left[e_j^l, e_j^{l+1}\right]$, on aura $u'_j(z_j) = u'_j(e_j^l) + \dfrac{z_j - e_j^l}{e_j^{l+1} - e_j^l}(u'_j(e_j^{l+1}) - u'_j(e_j^l))$

- Étape 6 : Formuler le problème sous la forme d'un programme linéaire en se basant sur l'ensemble A'.

$$Min \sum_{a_i \in A'} \sigma(a_i)$$

sous les contraintes suivantes :

$$\sum u'_j(e^*_j) = 1$$

$$u'_j(e_j^{l+1}) - u'_j(e_j^l) > 0, \forall j, l$$

$$\sum_{j=1}^{n}\left[u'_j(e_{ij}) - u'_j(e_{kj}) + \sigma(a_i) - \sigma(a_k)\right] > 0 \text{, si } a_i P a_k,\ (a_i, a_k) \in A' \times A'$$

$u'_j(e_{j*}) = 0, \forall j$, avec e_{j*} *est la pire valeur sur le critère j*

$u'_j(e_j^l) \geq 0, \sigma(a_i) \geq 0, \forall j, l$, i=1, 2, 3, …, m

- Étape 7 : Résoudre le programme linéaire et appliquer la fonction d'utilité obtenue à l'ensemble des actions de A.

La méthode UTA utilise la même base axiomatique que la méthode MAUT. Toutefois, elle ne cherche pas à fixer directement les fonctions d'utilité partielles comme dans MAUT. Dans UTA, les fonctions d'utilité partielles découlent toutes à la fois de la préférence globale exprimée par le décideur. On assiste donc à une sorte de désagrégation de la fonction d'utilité totale en des utilités partielles. La méthode UTA exige des données cardinales, une articulation a priori des préférences, une famille de vrais critères. Par ailleurs, UTA exige l'indépendance au sens des préférences. UTA est une méthode compensatoire.

1.3.2.6. AHP : Analytic Hierarchy Process (Saaty 1980)

La méthode AHP inventée et développée par Saaty (1980) a pour objet d'aider des acteurs intervenant dans le processus de prise de décision à résoudre des problèmes complexes en organisant et en hiérarchisant les informations et les appréciations. Cette méthode est une des méthodes multi-critères d'aide à la décision les plus utilisées dans plusieurs domaines, plus particulièrement, le choix de planification, d'allocation de ressources et de résolution d'un conflit (Vaidya 2006).

Les fondements de cette méthode reposent sur deux approches simultanées que sont la pensée systémique et la pensée causale. La première intervient au moment de la simplification du problème qui structure des composantes hiérarchiquement. La seconde pensée, basée sur les opinions et les sentiments des acteurs, intervient dans l'évaluation par comparaison binaire de l'impact d'une variable sur une autre.

D'une manière simple, on peut dire que cette méthode consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions. La démarche pour l'utilisation de l'AHP est la suivante :

- Étape 1 : Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés. Au sommet de la hiérarchie, on trouve l'objectif, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des actions.
- Étape 2 : Procéder à des comparaisons par paires des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (Échelle de comparaisons binaires), tout en respectant le principe de réciprocité :

$$P_c(E_A, E_B) = \frac{1}{P_c(E_B, E_A)}$$

- Étape 3 : Déterminer l'importance relative des éléments en calculant les vecteurs propres correspondants aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.
- Étape 4 : Vérifier la cohérence des jugements.
  - On calcule d'abord, l'indice de cohérence *IC*.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

    Où : λ_{max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et n est le nombre d'éléments comparés.
  - On calcule le ratio de cohérence (RC) définit par :

$$RC = 100\frac{IC}{ACI}$$

Où *ACI* est l'indice de cohérence moyen obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille. Une valeur de *RC* inférieure à 10% est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences.

- Étape 5 : Établir la performance relative de chacune des actions.

$$P_k(e_i^k) = \sum_{i=1}^{n_{k-1}} P_{k-1}(e_i^{k-1}) P_k(\frac{e_i^k}{e_i^{k-1}}) \text{, avec } \sum_{i=1}^{n_k} P_k(e_i^k) = 1$$

Où n_{k-1} est le nombre d'éléments du niveau hiérarchique *k-1*, et $P_k(e_i^k)$ est la priorité accordée à l'élément e_i au niveau hiérarchique *k*.

Les points forts de la méthode AHP sont la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique et l'utilisation d'une échelle sémantique pour exprimer les préférences du décideur. Bien qu'elle soit très populaire, la méthode AHP a fait l'objet de plusieurs critiques :

- Un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires.
- Le problème de renversement de rang (deux actions peuvent voir leur ordre de priorité s'inverser suite à une modification (ajout ou suppression d'une ou de plusieurs actions) de l'ensemble des actions.
- L'association d'une échelle numérique à l'échelle sémantique est restrictive et introduit des biais.

1.3.3. Méthode d'agrégation partielle: approche de surclassement de synthèse

1.3.3.1. PROMETHEE (Brans, Vincke et al. 1986)

Les méthodes PROMETHEE se basent sur une extension de la notion de critère par l'introduction d'une fonction exprimant la préférence du décideur pour une action a_i par rapport à une autre action a_k. Pour chaque critère, le décideur est appelé à choisir une des six formes de courbes représentées ci-dessous. Les paramètres relatifs à chaque courbe représentent des seuils d'indifférence et/ou de préférence.

- Type 1 : *Vrai-critère*
- Type 2 : *Quasi-critère*
- Type 3 : *Pré-critère*
- Type 4 : *Pseudo-critère 1*
- Type 5 : *Pseudo-critère 2*
- Type 6 : *Critère gaussien 1*

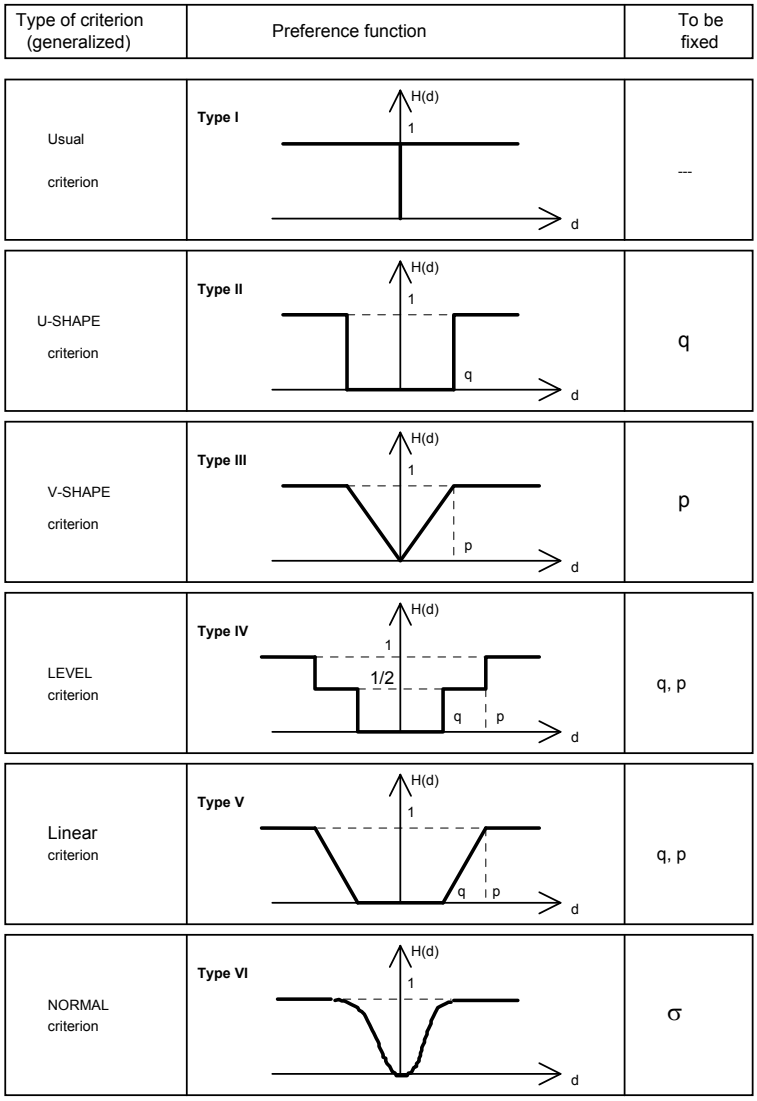


Figure 2: Types de critères et fonctions de préférence pour PROMETHEE
(source : Brans et Vincke)

Les Méthodes PROMETHEE I et II se présentent comme suit :

- Étape 1 : On fixe pour chaque critère, une des six formes de courbes proposées dans PROMETHEE ainsi que les paramètres qui lui sont associés.
- Étape 2 : Pour chaque couple d'actions (a_i, a_k); on calcule la préférence globale (degré de surclassement) de la manière suivante :

$$P(a_i, a_k) = \sum_{j=1}^{n} \pi_j F_j(a_i, a_k)$$

- Étape 3 : On calcule les flux entrant et sortant pour chaque action a_i.

$$\Phi^{+} = \sum_{a_k \in A, a_k \neq a_i} P(a_i, a_k)$$: *flux positif qui exprime la force de a_i (flux sortant)*

$$\Phi^{-} = \sum_{a_k \in A, a_k \neq a_i} P(a_k, a_i)$$: *flux négatif qui exprime la faiblesse de a_i (flux entrant)*

- Étape 4 : Déterminer les 2 pré-ordres totaux et procéder au rangement des actions :
  - Le premier pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre décroissant des Φ^{+}.
  - Le second pré-ordre total consiste à ranger les actions dans l'ordre croissant des Φ^{-}.
  - L'intersection des 2 pré-ordres totaux fournit le pré-ordre partiel de la méthode PROMETHEE I.
  - PROMETHEE II consiste à ranger les actions selon l'ordre décroissant des scores $\Phi(a_i)$ définis comme suit : $\Phi(a_i) = \Phi^{+}(a_i) - \Phi^{-}(a_i)$ Ainsi, PROMETHEE II fournit un pré-ordre total.

1.3.3.2. ELECTRE (Roy 1985)

La méthode ELECTRE a été générée par M. Roy pour traiter quatre problématiques décisionnelles de référence :

Problématique	Objectif	Résultat	Procédure
α	Choix d'un sous-ensemble contenant les actions « les meilleures » ou, à défaut, « satisfaisantes »	Choix	Sélection
β	Tri par affectation des actions à des catégories prédéfinies	Tri	Affectation
γ	Rangement de classes d'équivalence, composées d'actions, ces classes étant ordonnées de façon complète ou partielle	Rangement	Classement
δ	Description, dans un langage approprié, des actions et de leurs conséquences	Description	Cognition

Tableau 1: Types de problématique

Cette méthode a connu plusieurs développements successifs.

ELECTRE I : problématique de sélection

La méthode Electre I relève de la problématique de choix (Pα). Sa manière d'établir le surclassement d'une action par rapport à une autre repose sur :

- une condition de concordance : condition imposant qu'une majorité des critères se dégagent en faveur de l'action surclassante.
- une condition de discordance : condition imposant qu'il n'existe pas une trop forte pression, dans un des critères de la minorité, en faveur du surclassement inverse. [Schärlig 1985].

La méthode Electre I vise à obtenir une partition de A en deux sous-ensembles N et A\N[12]. N est appelé le noyau du graphe de surclassement qui est l'ensemble des actions sélectionnées. La méthode Electre I se présente comme suit :

- Étape 1 : Calcul des indices de concordance pour chaque couple d'actions (a_i, a_k). On associe l'indice de concordance de la manière suivante :

  $A = \{a_1, a_2, ..., a_i, ..., a_n\}$: désigne l'ensemble des actions potentielles,
  $F = \{1, 2, ..., j, ..., m\}$: la famille cohérente des critères,
  $g_i(a_i)$: l'évaluation de l'action a_i par rapport au critère j,
  P_j : le poids du critère j.

$$C_{ik} = \frac{P^+(a_i, a_k) + P^=(a_i, a_k)}{P}$$

où :

$J^+(a_i, a_k) = \{j \in F | g_j(a_i) > g_j(a_k)\}$: désigne l'ensemble des critères pour lesquels l'action a_i est préférée à l'action a_k.

$J^=(a_i, a_k) = \{j \in F | g_j(a_i) = g_j(a_k)\}$: l'ensemble des critères pour lesquels l'action a_i est équivalente à l'action a_k.

$J^-(a_i, a_k) = \{j \in F | g_j(a_i) < g_j(a_k)\}$: l'ensemble des critères pour lesquels l'action a_k est préférée à l'action a_i.

$P^+(a_i, a_k) = \sum P_j$, $j \in J^+(a_i, a_k)$: la somme des poids des critères appartenant à l'ensemble $J^+(a_i, a_k)$.

$P^=(a_i, a_k) = \sum P_j$, $j \in J^=(a_i, a_k)$: la somme des poids des critères appartenant à l'ensemble $J^=(a_i, a_k)$.

$P^-(a_i, a_k) = \sum P_j$, $j \in J^-(a_i, a_k)$: la somme des poids des critères appartenant à l'ensemble $J^-(a_i, a_k)$.

$P = P^+(a_i, a_k) + P^=(a_i, a_k) + P^-(a_i, a_k)$.

- Étape 2 : Calcul des indices de discordance pour chaque couple d'actions (a_i, a_k). On associe l'indice de discordance de la manière suivante :

$$D_{ik} = \begin{cases} 0, \ si \ J^-(a_i, a_k) = \varnothing \\ \frac{1}{\delta_j} Max \{g_j(a_k) - g_j(a_i)\}, \ j \in J^-(a_i, a_k) \end{cases}$$

où :

δ_j est l'amplitude de l'échelle la plus grande associée à l'un des critères j.

[12] A\N : ensemble A moins ensemble N.

- Étape 3 : Construction des relations de surclassement. On accepte l'hypothèse que « a_i surclasse a_k » si un test de concordance et un test de non-discordance sont satisfaits :

$$\left.\begin{array}{l} C_{ik} \geq c \\ D_{ik} \leq d \end{array}\right\} \Leftrightarrow a_i S a_k$$

où :

c : seuil de condordance ($0,5 \leq d \leq 1$),
d : seuil de discordance ($0 \leq d \leq 1$), mais relativement petit.

Sinon (si l'un ou l'autre des tests ou les deux ne sont pas satisfaits), on se trouve dans une situation d'incomparabilité : $a_i R a_k$.

- Étape 4 : Exploitation des relations de surclassement pour déterminer la décision.

La méthode Electre I a l'avantage d'introduire la notion de noyau qui permet de restreindre le domaine de l'étude pour s'intéresser uniquement aux « meilleures » actions. Toutefois, la méthode Electre I exige de traduire les performances des actions en notes, ce qui suscite une gêne chez certains utilisateurs qui y voient une perte de maîtrise de leurs données. La méthode Electre I a fait l'objet de nouvelles extensions : il s'agit des variantes Electre Iv (v pour veto) et Electre Is (s pour seuil).

Dans Electre Iv, on abandonne les jugements en notes au profit des vraies valeurs, mais au prix de l'introduction d'un seuil de veto.

Dans Electre Is [Roy et Skalka, 1985], on introduit des seuils sur les critères ce qui permet de corriger une autre gêne dans Electre I qui est la brutalité des concordances. La méthode Electre Is est par ailleurs très similaire à la méthode Electre I sauf qu'elle s'applique dans le cas où le problème porte sur des pseudo-critères. L'exploitation de la méthode se présente comme suit :

- Étape 1 : Calcul des indices de concordance
- Étape 2 : Calcul des indices de discordance par critère (idem que Electre I)
- Étape 3 : Construction des relations de surclassement
- Étape 4 : Exploitation des relations de surclassement : Cette étape consiste à déterminer le noyau du graphe de surclassement.

La méthode Electre Is a les mêmes avantages et limites que la méthode Electre I.

ELECTRE II : problématique de classement

La méthode Electre II relève de la problématique de rangement (Pγ) : elle vise à classer les actions potentielles, depuis les « meilleures » jusqu'aux « moins bonnes ». La méthode Electre II utilise le même indice de concordance que Electre I. La méthode Electre II introduit une nouveauté fondamentale : elle permet de distinguer des surclassements forts et des surclassements faibles.

La méthode Electre II se présente ci-après :

- Étape 1 : Calcul des indices de concordance (Idem que Electre I).

$$C_{ik} = \frac{P^{+}(a_i, a_k) + P^{=}(a_i, a_k)}{P}$$

- Étape 2 : Calcul des indices de discordance (par critère) pour chaque couple d'actions (a_i, a_k).

$$D_{ik} = \begin{cases} g_j(a_k) - g_j(a_i), \ si \ j \in J^{-}(a_i, a_k) \\ 0, \ si \ j \notin J^{-}(a_i, a_k) \end{cases}$$

- Étape 3 : Construction des relations de surclassement :
  - On conclut au surclassement fort de a_i par a_k ($a_i S_F a_k$) si un test de concordance et un test de non discordance sont satisfaits :

$$\left.\begin{array}{c} C_{ik} \geq c^{+} \quad et \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_{1(j)} \forall j \in F \quad et \\ \dfrac{P^{+}(a_i, a_k)}{P^{-}(a_i, a_k)} \geq 1 \end{array}\right\} \text{et/ou} \left\{\begin{array}{c} C_{ik} \geq c^{0} \quad et \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_{2(j)} \forall j \in F \quad et \\ \dfrac{P^{+}(a_i, a_k)}{P^{-}(a_i, a_k)} \geq 1 \end{array}\right.$$

où :

$c^{+} \geq c^{0} \geq c^{-}$,
$D_1, D_2 (D_2 \leq D_1)$: 2 seuils de discordance

  - On conclut au surclassement faible de a_i par a_k ($a_i S_f a_k$) si les tests de concordance et de non discordance suivants sont satisfaits.

$$\begin{cases} C_{ik} \geq c^{-} \\ g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq D_{1(j)} \forall j \in F \\ \dfrac{P^{+}(a_i, a_k)}{P^{-}(a_i, a_k)} \geq 1 \end{cases}$$

où :

$c^{+} \geq c^{0} \geq c^{-}$,
$D_1, D_2 (D_2 \leq D_1)$: 2 seuils de discordance

  - Si aucun des deux tests précédents n'est satisfait, alors on conclut à l'incomparabilité des actions a_i et a_k ($a_i R a_k$).

- Étape 4 : Exploiter les relations de surclassement : On établit deux pré-ordres totaux V_1 et V_2, ainsi qu'un pré-ordre partiel $\overline{V}$.
  - Le premier pré-ordre total V_1 est obtenu par « classement direct » en utilisant uniquement les surclassements forts.

- Le second pré-ordre V_2 est obtenu par « classement inverse» : on classe cette fois les actions en fonction de la longueur des chemins - toujours en surclassement fort - qui en sont issus. On utilise ensuite les surclassements faibles pour départager les actions à l'intérieur des classes.
- Le pré-ordre $\overline{V}$ est l'intersection de V_1 et V_2.

La méthode Electre II demeure parmi les plus connues et les plus utilisées des méthodes Electre au sens pratique. Toutefois, dans certains cas, il s'avère difficile de déterminer le pré-ordre partiel P car les rangs des actions bougent beaucoup entre le classement direct et le classement inverse. Dans ces circonstances, il vaut mieux revoir les seuils.

La méthode Electre II exige des évaluations cardinales et une articulation *a priori* des préférences. Electre II est une méthode partiellement compensatoire.

ELECTRE III : problématique de classement (Roy 1985; Maystre, Pictet et al. 1994)

La méthode Electre III relève de la problématique de rangement (Pγ). Son originalité réside dans le caractère flou de la relation de surclassement (pseudo-critères) : il n'est plus nécessaire de classer les couples d'actions en une des trois catégories (surclassement fort, surclassement faible, pas de surclassement du tout), car toutes les positions intermédiaires entre extrêmes sont possible. De plus, la réflexion ne porte pas sur l'acceptation ou le rejet en bloc de l'hypothèse de surclassement, mais sur la crédibilité à accorder à cette hypothèse. Ce degré est compris entre 0 et 1 et il est d'autant plus grand que la solidité du surclassement de a_i sur a_k est importante.

Une autre innovation d'ELECTRE III est l'utilisation de 3 seuils, le seuil de préférence stricte et le seuil d'indifférence pour tenir compte directement de l'incertitude, le seuil de veto pour concrétiser la notion de discordance. L'introduction de 2 premiers seuils permet de faire apparaître une nouvelle notion, dite préférence faible ($a_i Q a_k$ ou $a_k Q a_i$). En conséquence, on peut se trouver dans plusieurs situations possibles lors de la comparaison des écarts de préférence de deux actions selon un critère: une situation d'indifférence, de préférence faible ou de préférence stricte par rapport au modèle classique.

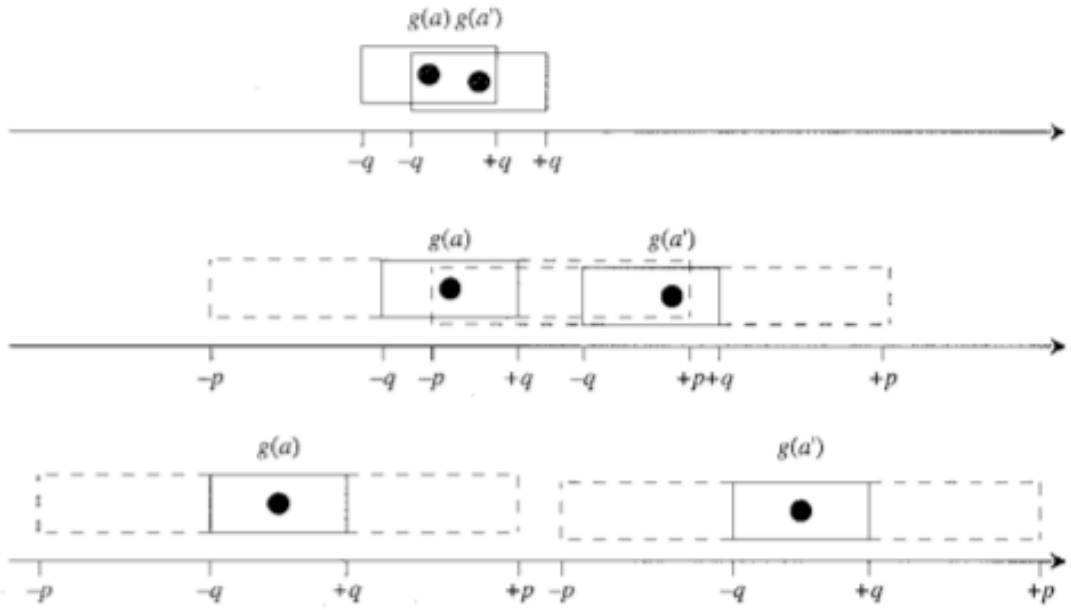


Figure 3: Zones de préférence et indifférence
(source : Maystre, Pictet et al 1994)

Comme évoqué ci-dessus, la prise en compte de la zone de la préférence faible constitue l'originalité de Electre III. Cette méthode se présente comme suit :

- Étape 1 : Calcul des indices de concordance globale

$$C_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^{m} P_j \cdot c_j(a_i, a_k)}{\sum_{j=1}^{m} P_j}$$

avec :

C_{ik} : indice de concordance globale,

P_j : poids des critères,

c_j : indice de concordance,

p_j : seuil de préférence stricte,

q_j : seuil d'indifférence.

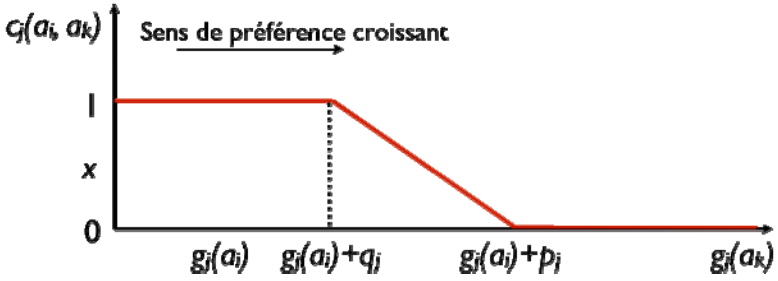
$$c_j(a_i, a_k) = \frac{g_j(a_i) + p_j - g_j(a_k)}{p_j - q_j} \text{ (Interpolation linéaire)}$$

soit :

$$c_j(a_i, a_k) = 0 \Leftrightarrow p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i)$$

$$0 < c_j(a_i, a_k) < 1 \Leftrightarrow q_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

$$c_j(a_i, a_k) = 1 \Leftrightarrow g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq q_j$$



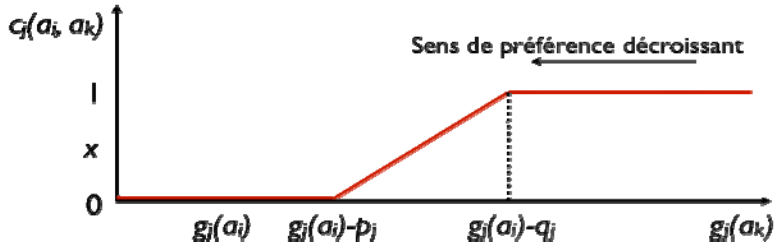


Figure 4: Détermination d'un indice de concordance
(source : auteur)

- Étape 2 : Calcul des indices de discordance (par critère)

v_j : seuil de véto ($q_j < p_j < v_j$)

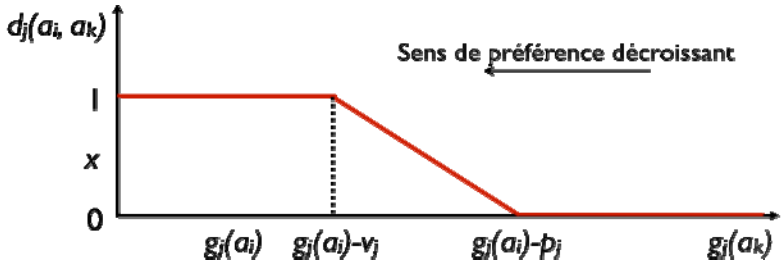
$$d_j(a_i, a_k) = \frac{g_j(a_k) - g_j(a_i) + p_j}{v_j - p_j}$$

soit :

$$d_j(a_i, a_k) = 1 \Leftrightarrow v_j < g_j(a_k) - g_j(a_i)$$

$$0 < d_j(a_i, a_k) < 1 \Leftrightarrow p_j < g_j(a_k) - g_j(a_i) \leq p_j$$

$$d_j(a_i, a_k) = 0 \Leftrightarrow g_j(a_k) - g_j(a_i) < p_j$$



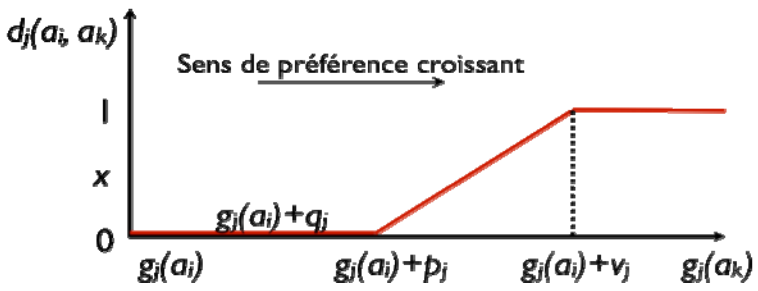


Figure 5: Détermination d'un indice de discordance
(source : auteur)

- Étape 3 : Déterminer les degrés de crédibilité des surclassements :

$$\delta_{ik} = \begin{cases} C_{ik} & si \quad d_j(a_i, a_k) \leq C_{ik} \\ C_{ik} \prod_{j \in \overline{F}} \dfrac{1 - d_j(a_i, a_k)}{1 - C_{ik}} & si \quad non \end{cases}$$

où :

$$\overline{F} = \left\{ j \middle| j \in F, \ d_j(a_i, a_k) > C_{ik} \right\} et \quad F \supset \overline{F}$$

- Étape 4 : Exploitation des relations de surclassement : Cette étape consiste à déterminer un rangement des actions. Pour ce faire, on joue sur le niveau de signification du degré de crédibilité (seuil de discrimination, $s(\lambda)$) et on procède à des distillations successives descendantes et ascendantes qui aboutissent à deux rangements (pré-ordre complet). L'intersection de ces deux rangements conduit à un rangement final (généralement partiel).
  - $s(\lambda)$: c'est un seuil de discrimination. Il est une fonction décroissante (par exemple, $s(\lambda) = 0,2 - 0,15\lambda$), définie pour toute valeur de $\lambda \in [0,1]$, qui vérifie : si $\delta_{ik} = \kappa$ $(\kappa = \lambda)$ et $\delta_{em} = \lambda - \eta$, avec $\eta > s(\lambda)$, alors le surclassement $a_i S a_k$ est strictement plus crédible que le surclassement $a_e S a_m$.

La méthode Electre III est beaucoup plus sophistiquée que Electre II : elle exige un grand nombre de paramètres difficiles à traiter, plutôt « techniques ». Néanmoins, Electre III a le mérite d'intégrer des pseudo-critères, ce qui est plus proche du raisonnement humain. Cette manière de modéliser les préférences a exigé d'utiliser des notions de logique floue.

ELECTRE IV : problématique de classement (Roy 1985; Maystre, Pictet et al. 1994)

La méthode Electre IV relève de la problématique de rangement (Pγ). Electre IV se caractérise par l'abandon des pondérations (on n'a pas besoin d'introduire des pondérations pour les critères). Elle se base sur une famille de pseudo-critères comme ELECTRE III; ainsi, elle introduit des seuils et des surclassements flous. Donc, pour chaque critère j, on définit le seuil d'indifférence q_j, le seuil de préférence p_j et le seuil

de véto v_j. Dans Electre IV, on évalue chaque paire d'actions selon chaque critère sans avoir à déterminer un indice de concordance ou un indice de discordance.

La méthode Electre IV se présente comme suit :

- Étape 1 : Évaluation de toute paire d'actions selon chaque critère. Pour chaque paire d'actions qui confronte un jugement d'un critère, on se demande simplement laquelle des deux actions est préférée à l'autre selon ce critère. Il n'est plus nécessaire de parler de « couple d'actions (a_i, a_k) », mais il suffit de considérer la paire des actions a_i et a_k.

  $m_p(a_i, a_k)$: nombre de critères pour lesquels a_i est strictement préférée à a_k

  $m_q(a_i, a_k)$: nombre de critères pour lesquels a_i est faiblement préférée à a_k

  $m_{in}(a_i, a_k)$: nombre de critères pour lesquels a_i et a_k sont considérées comme indifférentes, malgré le fait que a_i a une meilleure évaluation que a_k

  $m_o(a_i, a_k)$: nombre de critères pour lesquels a_i et a_k ont la même évaluation.

$$m = m_p(a_i, a_k) + m_q(a_i, a_k) + m_{in}(a_i, a_k) + m_o(a_i, a_k) + m_{in}(a_k, a_i) + m_p(a_k, a_i) + m_q(a_k, a_i)$$

- Étape 2 : Détermination des relations de surclassement de toute paire d'actions. À partir du dénombrement des préférences locales par critère, ELECTRE IV cherche à distinguer quatre niveaux de crédibilité de la relation de surclassement. Ainsi, il sera possible de reprendre le surclassement flou d'ELECTRE III, mais cette fois avec des valeurs discrètes. Il est à noter que chaque relation est contenue dans la précédente ($S_v \supset S_p \supset S_c \supset S_q$) :

  - Quasi-dominance :

$$a_i S_q a_k \Leftrightarrow \begin{cases} m_p(a_k, a_i) + m_q(a_k, a_i) = 0 \quad et \\ m_{in}(a_k, a_i) \leq 1 + m_{in}(a_i, a_k) + m_q(a_i, a_k) + m_p(a_i, a_k) \end{cases}$$

  - Dominance canonique :

$$a_i S_c a_k \Leftrightarrow \begin{cases} m_p(a_k, a_i) = 0 \quad et \quad m_q(a_k, a_i) \leq m_p(a_i, a_k) \quad et \\ m_q(a_k, a_i) + m_{in}(a_k, a_i) \leq 1 + m_{in}(a_i, a_k) + m_q(a_i, a_k) + m_p(a_i, a_k) \end{cases}$$

  - Pseudo-dominance :

$$a_i S_p a_k \Leftrightarrow \begin{cases} m_p(a_k, a_i) = 0 \quad et \\ m_q(a_k, a_i) \leq m_q(a_i, a_k) + m_p(a_i, a_k) \end{cases}$$

  - Veto-dominance :

$$a_i S_v a_k \Leftrightarrow \begin{cases} soit \quad m_p(a_k, a_i) = 0 \\ soit \quad m_q(a_k, a_i) = 1, \quad et \quad non \quad a_k P_{v_j} a_j, \quad \forall j \quad et \\ m_p(a_i, a_k) \geq \dfrac{m}{2} \end{cases}$$

- Étape 3 : Exploitation des relations de surclassement : L'étape 2 nous permet de construire un graphe avec des arcs de surclassement fort et des arcs de surclassement faible. Il ne reste plus qu'à chercher deux classements antagonistes, ce qui s'appelle la distillation comme dans Electre III.

Dans certains problèmes de décision, il s'avère très difficile de déterminer des poids pour les critères. La méthode Electre IV a l'avantage d'éviter ce type de problème. Ainsi, la méthode Electre IV traite des pseudo-critères ce qui peut permettre de mieux décrire la réalité que Electre III. La méthode Electre IV est facile à exploiter, toutefois, elle exige un grand nombre de paramètres techniques.

2. Choix d'une méthode ELECTRE

Nous avons fait le choix d'utiliser les méthodes multicritères plutôt que les méthodes d'optimisation traditionnelles, et plus particulièrement, les méthodes ELECTRE III et IV.

2.1. Comment effectuer un choix ?

D'après l'étude des méthodes d'analyse multicritère ou d'aide à la décision multicritère, nous constatons que ces méthodes multicritères se différencient par la façon de modéliser les préférences du décideur, la décision de pondérer ou non les critères ainsi que les attentes du décideur relatives aux résultats obtenus et à la manière de les présenter dans une problématique d'aide à la décision, telle que : rangement, possibilité de traiter l'incomparabilité, etc.

De manière générale, il n'y a pas de procédure unique de choix d'une méthode. Chaque utilisateur choisit telle ou telle méthode en fonction d'une problématique en portant un jugement plus ou moins personnel.

2.2. Limite d'une approche traditionnelle pour le choix du transport guidé de surface

L'approche traditionnelle a ses limites et n'est pas forcément bien adaptée dans notre cadre de travail. Étant donné que le contexte du transport urbain possède manifestement plusieurs critères complexes, la notion classique, au sens uni-critère, de l'optimum n'existe que dans de très rares cas, voire n'existe pas. De fait, la notion d'optimum repose sur les trois contraintes : globalité, stabilité et complète comparabilité transitive. Dans la réalité, on remarquera qu'il est difficile de les respecter toutes les trois en même temps.

En ce qui concerne le choix du TCSP qui est complexe et a des effets à long-terme, une méthode traditionnelle ne garantit aucun compromis et donc, fréquemment, le choix tombe aux mains de l'homme politique ou du décideur qui choisit tout seul selon son opinion ou son sentiment. Et ce phénomène provoque la contestation permanente et, de temps en temps, le conflit politico-social.

2.3. Avantages des méthodes multicritères

L'aide à la décision multicritère se présente comme une alternative aux méthodes d'optimisation classiques basées sur la définition d'une fonction unique, souvent exprimée en terme économique[13] (monétaire). Elle reflète la prise en compte de

[13] Nous avons évoqué des problèmes liés à l'application d'une méthode d'analyse coûts/avantages au chapitre précédent.

plusieurs critères, souvent incommensurables. L'intérêt des méthodes multicritères est de considérer un ensemble de critères de différentes natures (exprimés en unités différentes), sans nécessairement les transformer en critères économiques, ni en une fonction unique. Il ne s'agit pas de rechercher un optimum, mais une solution de compromis qui peut prendre diverses formes: choix, affectation (rangement) ou classement.

2.4.Méthode retenue : ELECTRE

Plusieurs méthodes existent dans la littérature, mais, dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi une méthode ELECTRE, parce que précisément elle nous semble bien adaptée au choix de « bons » compromis sur ce que l'on peut faire et sur ce que l'on veut faire, et d'autre part parce qu'elle représente relativement bien la réalité pour aider le décideur. Par le choix judicieux de critères, elle permet en outre de prendre en compte les effets de long-terme.

De plus, dans notre recherche, les systèmes de transport peuvent être, de temps en temps, jugé difficiles à comparer du fait du manque des informations nécessaires et/ou à cause des différences présentées sur certains critères (qui peuvent par exemple renvoyer à la différence des concepts de base), d'où l'intérêt de la possibilité de prendre en compte l'incomparabilité par rapport à ces critères. Parmi les méthodes multicritères, la méthode ELECTRE est bien adaptée à ce type de situation.

Plus précisément, notre problématique, - rangement pour le choix des différents systèmes de transport guidé de surface -, correspond à l'agrégation partielle que la méthode ELECTRE (surclassement de synthèse) propose. La méthode ELECTRE utilise des procédures d'agrégation multicritères fondées sur la construction puis l'agrégation de relations floues (Bouyssou, Dubois et al. 2006) qui a généralement plusieurs avantages :

- La valeur ne change pas au fil de la procédure, la méthode ELECTRE garde la valeur des données de départ jusqu'au bout sans modification.
- Elle accepte l'insuffisance des informations.
- Le biais humain peut être évité.

En parallèle, la méthode ELECTRE permet d'effectuer une comparaison d'alternatives, dont la détermination des poids des critères (coefficient de pondération) n'est qu'une étape. D'une manière générale, après avoir décidé les poids de chaque critère, la méthode ELECTRE exécute la comparaison par paire, autrement dit une comparaison par différence : action a_i est mieux de combien de points que l'action a_k sur un critère.

A contrario, il existe des inconvénients, c'est-à-dire que nous devons déterminer des critères, certains étant plus prépondérants que d'autres et cette détermination dépend beaucoup des préférences du décideur. De plus, les bases de données obtenues ou à obtenir ne sont pas toujours disponibles ni exactes. Ce manque d'information et de certitude peut influencer le résultat d'une décision, à ceci près toutefois que le choix des critères est explicite et donc a priori transparent.

La méthode ELECTRE III, grâce à l'introduction d'une notion de flou (pseudo-critère), permet en outre de gérer le problème de l'incertitude des informations. De même, la méthode ELECTRE IV peut permettre de s'affranchir de la difficulté de la pondération des critères.

Les méthodes prenant en compte la présence de critères multiples sont particulièrement adaptées pour aider un décideur dans ses choix. C'est la raison pour laquelle on a décidé de les utiliser. Notons toutefois que, quelle que soit la méthode d'évaluation choisie en fonction des domaines et des besoins, il est souvent nécessaire, et en tout cas utile, de faire appel au jugement d'experts, lesquels se forment notamment grâce aux retours d'expériences. C'est ce que nous ferons chaque fois que possible, notamment pour pallier à l'insuffisance des sources d'information.

	Avantages	Inconvénients	Remarques
TOPSIS	Facile à appliquer	Volonté du décideur	Nature cardinale
SMART	Facile à appliquer	Une articulation des préférences *a priori*	Echelle cardinale Forme additive
MAVT	Une fonction de valeur partielle (0-1) pour chaque attribut	Construction des fonctions de valeurs n'est pas toujours évidente et difficile	Maximiser une fonction de valeur Forme additive est assez difficile
MAUT	MAVT aléatoire Fonction d'utilité	Vérification de l'interdépendance mutuelle	Echelle cardinale
UTA	Une forme additive Comme MAVT mais Désagrégation de la fonction d'utilité totale	Données cardinales	Méthode compensatoire
AHP	La pensée systémique (simplification du problème, hiérarchisation) et la pensée causale (sentiments des acteurs)	Nombre de comparaisons par paires est grand Renversement du rang Echelle numérique avec l'échelle sémantique introduit des biais	Très populaire
PROMETHEE	Fonction de la préférence du décideur	6 types de fonction	Relativement facile p/r à ELECTRE
ELECTRE	Représentation de la réalité La notion d'incomparabilité Seuil de veto Notion de flou (pseudo-critère) Valeur ne change pas au fil de la procédure Accepte l'insuffisance des informations	ELECTRE III est difficile à appliquer	Prendre en compte les effets de long-terme Eviter le biais humain

Tableau 2: Récapitulatif des méthodes multicritères présentées

TROISIÈME CHAPITRE

Chapitre III : Description des systèmes de TCSP étudiés

Dans cette partie, nous présentons les 6 systèmes de TCSP[14] à comparer, qui sera la base pour la suite de notre recherche en tant qu'« actions » pour la méthode ELECTRE.

1. Petite histoire des transports urbains

Nous rappelons dans cette partie la longue histoire des transports urbains en France et surtout à Paris qui reste toujours le lieu précurseur des systèmes de transport adoptés en Province, pour montrer que les différents systèmes ont évolué en adoptant de nouvelles innovations technologiques. Au fil des ans, ils se sont adaptés à l'environnement et aux circonstances, sont devenus plus durables, ont disparu et ont réapparu sous d'autres formes. Les principaux systèmes de surface sont décrits ci-après, ce sont le tramway, l'autobus et le trolleybus.

Nous présentons néanmoins en préliminaire une synthèse de l'évolution des systèmes de transports urbains de surface depuis Pascal, fondateur de la première entreprise de carrosses publics, jusqu'aux premiers tramways électriques remplacés par les autobus qui dès l'origine circulaient sur les chaussées au milieu de la circulation générale.

Le premier système de transport public à Paris

En 1662, Louis XIV autorise Blaise Pascal à fonder une entreprise de carrosses publics pour exploiter 5 lignes dont une circulaire dans Paris. Pascal vient d'inventer les transports publics dont les principales caractéristiques telles que les itinéraires et horaires fixes, un tarif modique survivent encore de nos jours. Les Carrosses à cinq sols connaissent tout d'abord un franc succès mais en interdisant leur accès à une partie de la

[14] D'une manière générale, les transports en commun en site propre peuvent être classés selon 3 critères : le matériel roulant, l'infrastructure et les conditions d'exploitation (Certu 1999).

population une part importante de clientèle fait défaut. Ainsi l'entreprise se trouve en difficulté et disparaît en 1677. Les transports en commun ne réapparaîtront à Paris qu'un siècle et demi plus tard[15].

Vers le système de tramway

En 1825, Stanislas Baudry met en service une navette avec une voiture à cheval entre un faubourg de Nantes et le centre. Le succès de ce système de transport est immédiat, Baudry crée alors le réseau d'omnibus de Nantes.

En 1828, la Ville de Paris accorde une première concession pour faire circuler des voitures à itinéraires fixes. C'est ainsi que Baudry crée à Paris l'Entreprise générale des Omnibus qui exploite bientôt un réseau de 10 lignes et qui en moins de 6 mois transporte 2,5 millions de passagers. L'entreprise a un tel succès qu'elle éveille une vive concurrence. En 1836, on dénombre à Paris 17 compagnies et 378 voitures.

Au Second Empire, la situation devient ingérable ; le Baron Haussmann, Préfet du département de la Seine, décide de la fusion des entreprises qui est effective en 1855. Le monopole des transports par omnibus dans Paris intra-muros est confié à la Compagnie Générale des Omnibus (CGO) pour une durée de trente ans. Ce monopole permet enfin une organisation rationnelle sur la base d'un cahier des charges établi par la ville. En 1856, la CGO organise un réseau cohérent de 25 lignes. Elle exploite 503 omnibus et de 6700 chevaux en 1860 (Ruhlmann 1936, Larroque et al. 2002).

Les omnibus hippomobiles

Les omnibus sont des véhicules à traction hippomobile inspirés des diligences et circulant à des horaires déterminés sur des lignes fixes. Compte tenu de l'état des chaussées de l'époque, ces transports sont lents, peu confortables et de capacité limitée. On a donc pensé à réduire le frottement des roues sur le sol en utilisant des rails comme dans les mines. Ainsi D. Kinnear Clark : « Néanmoins, l'établissement du tramway eut pour conséquence une amélioration marquée dans le rendement en travail des chevaux de trait. Sur une route ordinaire, la charge ordinaire de charbon pour un cheval était d'environ 860 kilogrammes, tandis que, sur le tramway, un cheval pouvait mener régulièrement 2.130 kilogrammes de charbon. » (Kinnear Clark 1880)

Les premiers omnibus ou « Streetcar » circulant sur des rails alors en saillie, sont apparus dès 1830 à Baltimore et en 1832 à New York. L'amélioration est notable et d'autres réseaux sont construits aux États-Unis. Mais le profil du rail en saillie gêne la circulation générale.

En 1852, Alphonse Loubat, un ingénieur français établi aux États-Unis, met au point un rail à gorge ne dépassant pas le niveau de la chaussée, et réhabilite le tramway de Broadway qui connaît alors un grand succès.

[15] http://www.amtuir.org

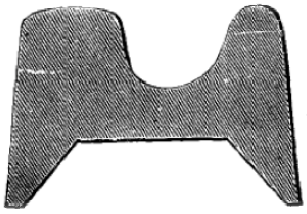


Figure 6 : Section du Rail Loubat 19 kg/ml ech.1/2
(source : Clark.D.K. « Street-railroads », 1878, not_in_copyright)

Rentré en France, il dépose un brevet sur un rail en « U » et fait valoir les avantages de ce mode de roulement, qui nécessite un effort moindre de traction et en conséquence une vitesse et un confort accrus avec une cavalerie plus réduite.

En 1853, il est autorisé à construire une première ligne d'essai de deux kilomètres à Paris sur le Cours la Reine. L'essai étant concluant, Loubat obtient la concession d'une ligne à construire entre Sèvres et le Louvre. Mais les voies ne sont posées que jusqu'à la Concorde en raison de l'opposition de la Ville de Paris. Les premiers services de « l'Américain » sont inaugurés en septembre 1855 : le premier tramway du continent européen est né. Il rétrocède ensuite sa concession à la Compagnie Générale des Omnibus qui regroupe ainsi tous les transports en commun de Paris[16].

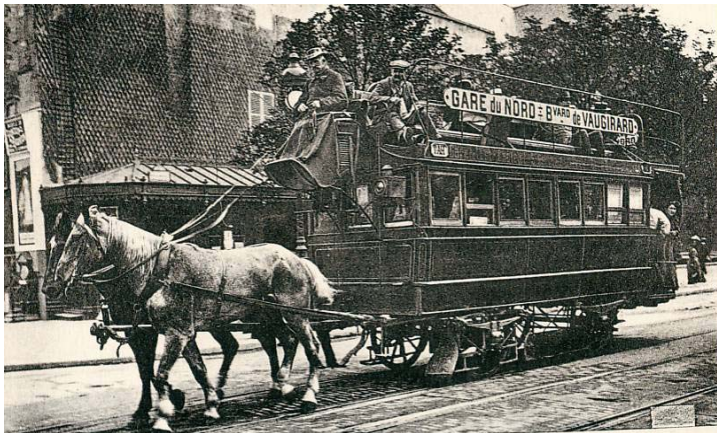


Figure 7 : Un tramway hippomobile de la CGO
(source : http://amtuir.org/)

La Ville de Paris s'opposant au développement des tramways, la CGO exploitera longtemps des omnibus hippomobiles, malgré leur faible productivité et les coûts d'entretien de la cavalerie. La CGO met en service en 1878 de lourdes voitures de 40 places à trois chevaux, puis en 1889 un type de voiture moins lourd, offrant 30 places et tirée par deux chevaux. Les voies sont à écartement normal de 1,44 mètre, à double voie dans Paris et à voie unique hors de la ville. Il n'y a pas d'arrêts fixes : la montée et la descente s'effectuent à la demande, voire en marche vu la faible vitesse.

[16] http://www.amtuir.org

La CGO entretient jusqu'à 16 500 chevaux. Les problèmes d'intendance constituent un frein au développement de la traction hippomobile et poussent à mettre au point des techniques de traction mécanique, à l'exemple des chemins de fer secondaires (Ruhlmann 1936).

Les premières tentatives de mécanisation et l'apparition du funiculaire

Avant 1870, seule la traction hippomobile est utilisée pour les tramways et omnibus mais des services de bateaux à vapeur apparaissent aux environs de 1825 sur la Seine et à Lyon à partir de 1863. L'utilisation de la traction à vapeur sur les bateaux peut sans doute être adaptée aux tramways, des essais se déroulent aux États-Unis dès 1859. En France, l'ingénieur Larmenjat construit un train routier guidé par un rail central entre Le Raincy et Montfermeil : une locomotive tracte à partir d'une chaudière à vapeur une ou deux voitures reposant sur deux roues axiales guidées par le rail et deux roues latérales reposant sur la chaussée. À Lyon, afin de relier la partie basse de la ville à la Croix-Rousse, le premier funiculaire du monde est mis en service le 3 juin 1862[17].

Les premiers tramways à vapeur

L'importance croissante des tramways dans le monde a incité les exploitants à optimiser ces systèmes en remplaçant la traction animale par la traction à vapeur.

À Londres, commence la construction des premiers tramways à vapeur avec les premiers essais d'une automotrice, en novembre 1873. À Paris, une première ligne régulière est exploitée par les « Tramways Sud » dès août 1876 avec des machines Merryweather construite en Angleterre. Mais le coût de la vapeur est encore élevé et l'exploitant revend les machines Merryweather à Rouen. Le 15 novembre 1876, la CGO expérimente une automotrice à vapeur entre La Villette et la Place du Trône, mais elle est revenue aussitôt à la traction hippomobile.

Le développement de la traction mécanique est influencé par l'évolution des chemins de fer secondaires.

En 1881, Valenciennes et Saint-Etienne ouvrent les premiers réseaux de tramways à voie métrique. Les deux villes se tournent d'emblée vers la traction vapeur à l'aide de machines bicabines. Le succès des nouvelles exploitations aura des répercussions importantes en France pour l'exploitation des lignes rurales.

[17] http://www.amtuir.org

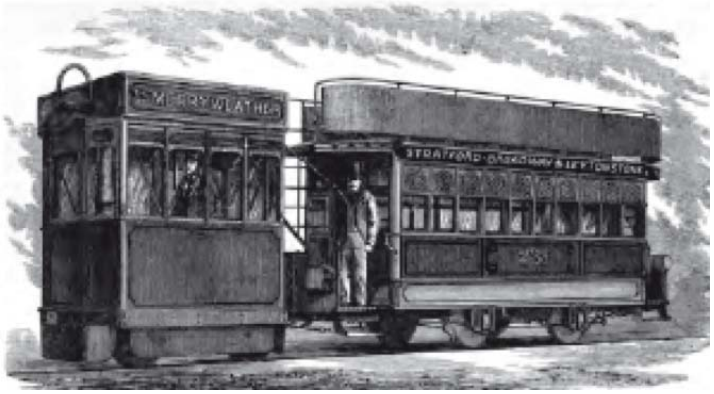


Figure 8 : Une machine Merryweather
(source : Clark.D.K. « Street-railroads », 1878, not_in_copyright)

Les machines sans foyer de type Francq

Le développement de la vapeur sur les grands réseaux urbains est freiné d'une part par l'encombrement des trains et, d'autre part, par les dégagements de fumée. Après les essais de 1872, aux États-Unis, un ingénieur français, Francq, perfectionne le système Lamm. Les nouvelles locomotives comportent un vaste réservoir calorifugé rempli d'eau chaude en équilibre avec sa vapeur saturante. La mise en communication du réservoir avec les cylindres provoque une dépression qui fait bouillir l'eau et régénère la vapeur. Le réservoir est rempli d'eau chaude au dépôt.

Un premier essai avec des locomotives Francq a lieu en avril 1878 entre Rueil et Port-Marly. Le système est ensuite développé à Lille dès 1881, puis à Lyon, en 1888 et à Marseille en 1893.

Les tramways à air comprimé

L'ingénieur Louis Mékarski invente le tramway à traction à air comprimé qui est fourni à partir d'une usine en différents points du réseau. Ce système propre, a remporté un certain succès. En 1879, à Paris, les « Tramway Nord » remplacent les tramways à chevaux par des locomotives Mékarski sur la ligne Saint-Denis - Porte de Clichy. Mais divers incidents provoquent la suspension des services.

Figure 9 : Tramway Mékarski 1900 de la CGO entre Louvres et St Cloud
(Source : Les tramways Wikipedia, copyright expiré)

L'appareillage des locomotives étant peu volumineux, il apparait possible de loger dans un même véhicule le moteur et les voyageurs. Une exploitation régulière apparait à Nantes, le 13 février 1879.

À Paris, La CGO acquiert bientôt un important parc de motrice Mékarski à impériale.

Les automotrices à vapeur Rowan

Le développement de l'air comprimé n'a pas condamné la traction à vapeur car les investissements lourds pour l'installation des canalisations d'air comprimé arrêtent certaines compagnies qui se tournent vers des automotrices à vapeur.

En 1876, Copenhague expérimente des automotrices Rowan. La caisse repose sur un bogie à l'avant et un essieu à l'arrière. Le bogie supporte une chaudière verticale. Des voitures identiques apparaissent à Stockholm en 1887 et à Berlin en 1888.

À Paris, la CGO utilise ses premières Rowan lors de l'Exposition de 1889. Bien que ces véhicules soient bruyants et peu appréciés des voyageurs ces automotrices resteront pourtant en service plus de vingt ans.

Tramway de la traction à câble

En août 1873 à San Francisco qui comporte de fortes déclivités, un système de tramways à câble est mis en service. Les véhicules sont tractés par une petite voiture comportant un grip qui s'accroche ou se décroche d'un câble continu situé sous la chaussée. Le mouvement du câble est permanent, mû par une machinerie à vapeur située dans le dépôt.

Ce système connaît un développement extraordinaire aux États-Unis, à Washington, à New York qui ira jusqu'à construire des lignes de métro à câble et en Australie à Melbourne.

En Europe, Londres aura quelques lignes à câble, une ligne à câble sera installée à Paris en 1891 entre la République et l'Église de Belleville.

La traction à câble a le mérite de ne pas dégager de fumée le long du parcours mais son rendement reste faible. Les performances limitées par la vitesse constante du câble ne permettent pas des services rapides et l'usure du câble représente un problème permanent pour les exploitants.

Les premiers tramways électriques

Lors de l'Exposition Industrielle de Berlin en mai 1879, Siemens expérimente un premier tramway électrique.

En mai 1881, Siemens et Halske mettent en service le premier tramway électrique au monde à Gross Lichterfelde, près de Berlin sur une voie métrique de 2,5 km de longueur. Elle est exploitée par de petites motrices à plates-formes ouvertes de 26 places sous une tension de 1000 volts alimentées par les 2 rails, les roues de voitures étant isolées de l'essieu. Le moteur placé sous la caisse, actionne les essieux par des câbles. La vitesse atteinte est de 40 km/h.

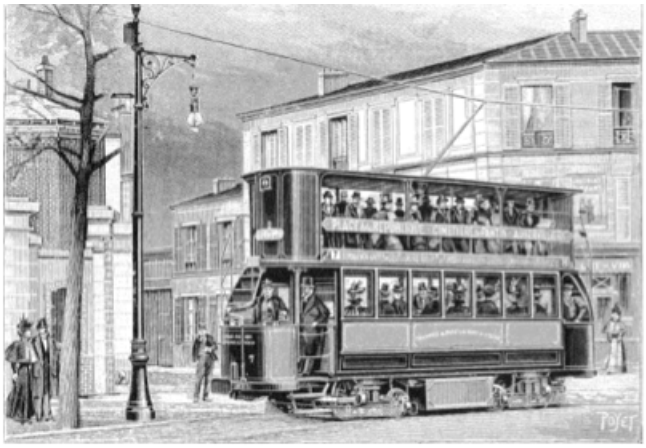


Figure 10 : La CGO exploite des tramways électriques alimentés par accumulateurs en ville et par trolleys aériens extra muros (1898)
(source : http//:www.seaus.free.fr)

En même temps, un tramway électrique à accumulateurs est testé à Paris entre Montreuil et la Place de la Nation. Au printemps de la même année, lors de l'Exposition d'électricité à Paris, Siemens et Halske expérimentent leur premier tramway électrique à prise de courant aérienne sur une ligne d'environ 500 mètres reliant la place de la Concorde au Palais de l'Industrie qui occupe alors l'emplacement du Grand Palais. La voiture à impériale peut transporter 50 voyageurs et prend le courant sous une double ligne aérienne constituée par deux tubes de laiton fendus à la partie inférieure : dans ces tubes glisse des « navettes », sorte de tiges reliées à la voiture par des conducteurs souples.

À partir de 1883, les premiers tramways électriques apparaissent en service régulier à Vienne, Francfort-sur-le-Main et Offenbach.

En Amérique commence les essais de tramway électrique : dès 1883, Edison et Field exposent à Chicago une petite locomotive électrique. Différents systèmes de prise de courant sont utilisés, les constructeurs n'ayant pas encore trouvé le meilleur système.

En 1884, le premier tramway électrique circule à Cleveland avec une prise de courant à partir d'un caniveau. En 1885, à Kansas City on exploite des tramways électriques équipés des premières perches de prise de courant. À Baltimore, la prise de courant s'effectue sur un rail latéral remplacé aux carrefours par une ligne aérienne.

En septembre 1885, en Grande Bretagne, le tramway électrique à prise de courant par caniveau est mis en service à Blackpool.

En février 1888, l'installation concluante des tramways électriques à prise de courant par perche à Richmond (Virginie), fixera le choix des exploitants sur une prise de courant à partir de fils aériens. Dès lors, le tramway électrique va se développer rapidement aux États-Unis. Les extensions sont poussées par de puissantes entreprises telles que Westinghouse, Edison et Thomson-Houston (future Général Electric Co).

En 1888, 33 nouvelles lignes s'étendent sur 210 km, exploitées par 265 voitures. À la fin de 1896, les États-Unis exploitent 23.000 km de lignes électriques de tramways et 40.000 motrices.

La fin des années 1880 en Europe n'est pas encore décisive pour les tramways électriques. Après la création de quelques lignes en Allemagne, Autriche et Grande Bretagne, la Suisse construit une première ligne entre Vevey et Montreux, en 1888. Enfin, en 1889, le premier tramway électrique apparaît à Budapest. La France reste fidèle à la traction animale ou mécanique et s'intéresse fort peu aux expériences de ses voisins. Seuls les Tramways Nord se bornent à essayer, à partir de septembre 1888, une voiture à accumulateurs. En 1898, la CGO exploite des tramways électriques alimentés par accumulateurs en ville et par trolleys aériens extra muros.

Les tramways électriques

Le transport urbain est le premier champ d'expérience de la traction électrique, qui sans bruit ni fumée à proximité des véhicules, est appelée à remplacer en ville les autres modes de traction des tramways.

Après 1888, des véhicules sont construits aux États-Unis et certains équipements vont apparaître dans le monde entier pendant une cinquantaine d'années. Ainsi les moteurs de traction directe à courant continu et leur dispositif de commande et de réglage. Le problème qui demeure est celui de l'alimentation en énergie avec la production et le transport du courant électrique.

Figure 11 : Une rame électrique et sa remorque
(source : AMTUIR)

Production, transport et alimentation électrique :
Alimentation autonome, tramways à accumulateurs

Les accumulateurs électriques vont se substituer partiellement à la traction mécanique jusqu'à la fin du siècle. En 1888, à Paris, on effectue un premier essai d'équipement d'un véhicule avec une batterie d'accumulateurs Phillipart. En 1892, une des compagnies parisiennes, la TPDS met en service des tramways équipés de batteries à charge lente mais comme aujourd'hui les batteries ont un poids mort important, une autonomie limitée et une durée de vie relativement faible.

Production et distribution de l'énergie

De nombreuses compagnies de tramways construisent leurs propres centrales puis de grandes centrales électriques sont créées pour alimenter les villes dont les compagnies de tramways. Le courant continu produit est directement utilisable par les automotrices à partir des fils conducteurs.

Captage de l'énergie

Trois dispositifs de captage sont utilisés au moyen d'une prise unipolaire : la ligne aérienne, le caniveau souterrain et les plots superficiels, le retour de courant se faisant par les rails après les essais concluants de 1888 aux USA c'est la ligne aérienne d'alimentation qui sera adoptée.

Développement, survie et résurrection des tramways électriques

De 1888 à 1902 plusieurs lignes de tramways électriques sont mises en service en France : à Clermont-Ferrand, Paris[18], Lyon, Lille et Marseille.

En 1900, il y a près de 800 réseaux urbains ou interurbains aux États-Unis, tous électrifiés. En 1914, les réseaux français sont presque tous équipés de véhicules dérivés des modèles apparus aux États-Unis dès 1888. Parallèlement, les omnibus à traction hippomobile sont remplacés par des omnibus à moteur thermique : les autobus.

Le renforcement des trains est assuré par des remorques à essieux ou à bogies. La prise de courant est, en général, assurée par perche, ou par archet, mais, en raison de contraintes administratives, certains véhicules doivent pouvoir être alimentés par plots superficiels ou caniveaux souterrains dans le centre des villes : cette contrainte réapparaît de nos jours dans les centres historiques de nos villes.

Évolution du matériel roulant du tramway

En France, la technologie évolue peu en dehors d'une recherche d'allègement des véhicules. En 1935, apparaît la motrice électrique SATRAMO[19]. En parallèle, les États-Unis conçoivent vers 1920 les motrices Peter Witt, tramways à grande capacité, remarquables pour l'époque dont 300 véhicules modernisés ont longtemps roulé à Milan.

Mais dès 1932, on décide de supprimer les tramways à Paris et dans les villes de Province. Elle sera effective à Paris en 1937 et en Province entre 1938 et 1960. C'est la guerre mondiale qui suspendra momentanément les suppressions car les moyens de locomotion individuels font alors défaut.

Seules trois villes, Lille-Roubaix-Tourcoing (une ligne intégrée dans un Grand Boulevard de plus de 50 mètres de large), Marseille (une ligne en partie en tunnel arrivant directement dans une gare commune avec le métro à Noailles terminus actuel du tramway de la ligne T1) et Saint-Etienne dans la Grand Rue centrale et rectiligne) conservent quelques lignes de tramways car elles ne gênent pas la circulation automobile.

En 1930 aux USA, le syndicat des exploitants de transports urbains (Electric Railways Presidents Conference Committee) lance un appel d'offre en vue de la réalisation d'un tramway de grande capacité exploitée avec une seule personne, le conducteur, offrant des performances d'accélération, de freinage, de vitesse, de confort et de silence, supportant la comparaison avec celles de l'automobile : un modèle de tramway « PCC » va sortir de la collaboration de l'industrie avec les exploitants et les chercheurs. Ce modèle va être construit en 5 000 exemplaires aux États-Unis jusqu'en 1951 et sous licence dans les pays de l'Est et en Belgique avec La Brugeoise et Nivelles et les ACEC de Charleroi.

[18] En 1902, la CGO exploite 42 lignes d'omnibus à chevaux, soit environ 280 km. Le parc est de 684 voitures et 11 572 chevaux, le nombre de dépôts est de 25. La fréquentation est de 130 millions de voyageurs à comparer avec celle des tramways qui s'élève à 600 millions de voyageurs.

[19] SATRAMO : Société anonyme pour le tramway moderne.

Figure 12 : Rames PCC
(source : P. Malterre)

En France, les lignes conservées de Marseille et Saint-Etienne s'équipent également de PCC. C'est dans les pays de l'est de l'Europe que les tramways de type PCC, construits par TATRA en Tchéquie, se sont le plus répandus, quelques 20 000 rames PCC seront produites.

Après la suppression des réseaux de tramways aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France, il faudra attendre le début des années 1980 pour voir renaître timidement dans ces pays quelques lignes de tramways modernes[20] : le tramway moderne des années 90 doit tout à ceux qui ont conçu le tramway PCC, un véhicule révolutionnaire (Malterre 1982).

Du tramway au métro léger

Environ 320 réseaux de tramways sont en fonctionnement dans le monde en 1981. Il n'est plus question de suppressions même dans de petites villes où la pure rationalité économique amènerait à préférer l'autobus. De nombreux réseaux sont alors en extension, c'est le cas :

- à Amsterdam où les investissements prévus pour le métro se sont reportés sur la transformation de lignes d'autobus en ligne de tramway.

[20] Au début des années 1970 en France, avec le premier choc pétrolier de 1973, les problèmes croissants de congestion urbaine aux heures de pointe, les politiques se tournent de nouveau vers les transports publics de masse. Pour financer la mise en site propre des réseaux, les nouveaux matériels, de tramway, d'autobus et de métro, une nouvelle taxe a été instituée d'abord en région parisienne, le versement transport VT qui est progressivement étendu aux AOTU de province de plus de 300 000 habitants en 1973, 100 000 habitants en 1974, 30 000 habitants en 1982, 20 000 habitants en 1992 (Loi ATR) et 10 000 habitants en 1999 (Loi Chevènement). Entre 1975 et 1982, le seuil de perception du versement transport fixé à 100 000 habitants joue un rôle décisif dans la création d'autorités organisatrices intercommunales et dans l'augmentation des périmètres de transport urbain PTU.

Le renouveau du tram en France est amorcé dès 1975 par le concours lancé par le secrétaire d'État Marcel Cavaillé. Ce concours visait à définir le futur tramway standard qui deviendra le TFS devant équiper huit villes : Bordeaux, Grenoble, Nancy, Nice, Rouen, Strasbourg, Toulon et Toulouse. Ainsi, tramways et autobus ont été en partie remplacés par des systèmes circulant en site propre : les tramways modernes et les autobus.

Nantes, qui possède aujourd'hui le premier réseau de tram en France, fut la première ville française à se doter d'un tramway moderne en 1985. Le tram de Grenoble inauguré en 1988 comporte une innovation majeure, un plancher bas rendant ce moyen de transport accessible aux personnes à mobilité réduite : ce véhicule deviendra le tramway français standard TFS.

- à La Haye où un axe lourd exploité avec des autobus est transformé pour recevoir le tramway.
- à Zürich où l'on reprend les extensions interrompues en 1954.

Tous les réseaux évoluent dans le sens du métro léger, en site propre, une trentaine de réseaux d'Europe ont leurs voies de tramway en site protégé sur plus de 60% de leur linéaire.

Au début des années 1980, 4 réseaux sont mis en service à Edmonton, Calgary, San Diego, et Newcastle. Neuf réseaux sont en construction à Gênes, Utrecht, Nantes, Buffalo, Manille, Tunis, Sacramento, Rio de Janeiro, une première ligne est décidée à Grenoble et en banlieue de Hong Kong. Des projets de métro léger sont à l'étude dans une vingtaine d'agglomérations, la plupart sont aux USA.

Les points essentiels de l'évolution technique observée au début des années 1980 sont rappelés ci-après :

- Pour l'exploitation, c'est l'adoption du suivi des rames à partir d'un PCC par une régulation couplée au radio-téléphone avec transmission de données et en liaison avec les feux de carrefours de façon à accorder la priorité de passage aux tramways :
    - On note la faible ampleur des perturbations et les possibilités d'accélération ou de ralentissement par rapport à la marche type sur les sites propres, ce qui est favorable à la ponctualité et donc à la qualité de service offerte aux passagers.
- Pour le matériel roulant, on constate une meilleure accessibilité avec une adaptabilité aux différentes hauteurs de quais, une meilleure insonorisation grâce à l'étanchéité des portes et des soufflets d'articulation, l'adoption des équipements électroniques de puissance (hacheurs ou onduleurs) qui offrent un meilleur confort des réductions de coût de maintenance et des économies d'énergie :
    - Tous ces perfectionnements sont incorporés sur le nouveau tramway français standard TFS, qui fera ses premiers tours de roues à Nantes en 1984 et à Grenoble en 1987.
- Pour les infrastructures, on constate que la mise en souterrain disparaît des projets par souci d'économie et d'adaptation aux besoins réels. Les urbanistes et les responsables de transport public apprécient le succès des « rues piétonnes avec tramways » dans les centres historiques des villes, ces réalisations fonctionnent à la satisfaction générale et peuvent être considérées comme des solutions à caractère définitif à l'exemple de la Fußganger zone ou zone piétonne de la Hauptbahnhof strasse à Zürich, l'une des rues les plus prestigieuses au monde notamment par son coût du foncier :
    - On note la réussite des « voies vertes » en particulier sur le plan de l'esthétique et du silence de marche, c'est à dire les voies engazonnées développées en particulier à Zürich et à Linz.

Toutes ces réalisations intégrant mieux le tramway à la ville, tout en réduisant la nécessité d'ouvrages coûteux, sont favorables au développement du tramway moderne et au métro léger (P. Malterre 1981).

En 2010, on note 136 réseaux de tramways modernes ou métros légers en exploitation de plus depuis le début des années 1980, soit plus de 450 réseaux exploités et 50 réseaux en cours de construction et près de 150 projets de métros légers. Ce sont ainsi très prochainement 500 réseaux de tramways modernes qui seront exploités à travers le Monde. S'ajoutent une cinquantaine de lignes de tramway historique qui contribue à maintenir une certaine nostalgie ou affection du public à l'égard de ces systèmes.

Le nombre de métros à travers le Monde est de 162 exploités et 56 en projet, ce qui représente environ un tiers du nombre de tramways exploités actuellement.

En termes de nombre, c'est la France et les USA qui ouvrent la voie avec 20 systèmes exploités et plus à venir dans chaque pays (il y a plus de 80 projets à des niveaux différents aux USA) : quel contraste avec les 8 projets en exploitation de la Grande Bretagne dont un seul à venir à Edimbourg et la Turquie qui a 10 projets en exploitation et deux à venir (Taplin 2010).

Un des atouts du tramway moderne est de pouvoir circuler sur les voies de chemin de fer sous-utilisées, et ainsi d'aller desservir des banlieues et de redonner un dynamisme aux quartiers ou aux petites villes situées aux différents arrêts de l'ancien train mais du nouveau tram-train.

L'idée du tram-train n'est pas nouvelle, certains grands systèmes interurbains américains l'ont utilisée avant la Grande Guerre. Ce concept tomba lorsqu'on a voulu améliorer la sécurité des chemins de fer, en interdisant le mélange des circulations des véhicules légers ou tramways et des trains lourds. Ce concept permet à moindre coût d'étendre la desserte urbaine à la banlieue ou même de relier une autre ville en réutilisant les infrastructures existantes telles que les voies et les passages à niveau du chemin de fer, les lignes urbaines de chacune des deux villes et le matériel roulant des exploitants des tramways urbains. Cologne et Bonn éloignées de 60 km où deux anciennes lignes de chemin de fer de marchandises dont l'une le long du Rhin sont utilisées par les tramways de Bonn (SWB) et les tramways de Cologne (KVB) : les différentes stations éloignées de 1500 à 3000 mètres sont devenues des zones résidentielles pour les habitants ou employés de Bonn et de Cologne.

Le réseau de Karlsruhe a été pionnier dans la renaissance de ce concept : des tramways du système métro léger circulent en ville et partagent l'infrastructure des chemins de fer avec des trains « lourds ». Ce concept ayant eu un grand succès, il s'est appliqué à Saarbrück et dans d'autres villes allemandes. Le tram-train contribue réellement à l'attraction des automobilistes nombreux dans ces banlieues vers les transports urbains.

L'apparition des autobus

En 1902, la CGO exploite 42 lignes d'omnibus à chevaux, soit environ 280 km. Le parc est de 684 voitures et 11572 chevaux, le nombre de dépôts est de 25. La fréquentation est de 130 millions de voyageurs à comparer avec celle des tramways qui s'élève à 600 millions de voyageurs.

Le salon de l'automobile de Paris présente en 1905 un nouveau véhicule pour le transport public : l'autobus (Tricoire 2007).

Figure 13 : Autobus Brillié-Schneider
(source : http://www.amtuir.org)

La CGO lance un concours pour la construction de nouveaux véhicules, c'est le modèle Brillé-Schneider à impériale qui est retenu. Ce bus de 6,24 mètres de long, de 4,25 mètres de haut, peut accueillir 32 personnes. Il dispose d'une impériale qui par la suite est recouverte d'un toit pour protéger les passagers. Ces bus à essence remplacent ainsi les omnibus hippomobiles, leur vitesse atteint 20 km/h. En Juin 1906, une première ligne est ouverte avec des « omnibus automobiles » : c'est un succès.

Figure 14 : Bus prototype Schneider sur la ligne H
(Source : http://www.amtuir.org)

Figure 15 : Un bus ligne J à la Place Saint Michel et à l'arrière, un tramway de la CGO
(Source : http://www.amtuir.org)

À Paris, la fréquentation du réseau TC est passée de 243 millions de voyageurs en 1888 à 548 millions en 1909, dont près de 300 millions transportés par le métropolitain en 1909. En 1910, la CGO obtient la concession des lignes d'autobus et du réseau municipal des tramways. Six grandes compagnies exploitent les réseaux de banlieue. En janvier 1913, le dernier omnibus à cheval circule sur la ligne L entre La Villette et Saint-Sulpice. En trois ans, le trafic dans Paris augmente de 50 % et les recettes progressent de 18 %. En 1914, le réseau de la CGO comporte 923 kilomètres de lignes de tramway et 245 kilomètres de lignes d'autobus.

En août 1914, la guerre éclate alors que la mobilité parisienne est en plein essor. Le réseau d'omnibus vient d'achever sa motorisation et propose une offre de transport bien meilleure qu'avant 1900, année de la mise en service du métro. L'autorité militaire réquisitionne la totalité des autobus. Ces autobus participent aux Batailles de la Marne, de la Somme et de Verdun. Les transports à Paris deviennent particulièrement difficiles, plusieurs quartiers n'étant plus du tout desservis. Les lignes les plus indispensables sont remises en exploitation.

La situation financière des compagnies de transport se dégrade, le régime de la concession est de plus en plus contesté, l'unification de tous les réseaux de surface apparaît comme la seule solution, le Département de la Seine est désigné comme l'autorité de tutelle des réseaux de transport : une convention prévoit le rachat de la concession de la CGO et de toutes les autres compagnies par le Département de la Seine et l'institution d'une Régie intéressée.

Cette régie est confiée à une société unique la STCRP[21] qui exploite un réseau de tramways de 112 lignes sur 960 km et un réseau d'autobus de 41 lignes sur 258 km. La capacité des autobus est amenée à 38 places puis un nouveau matériel de plus grande capacité est acheté et en 1929 tous les autobus sont équipés de pneumatiques. La STRCP développe son réseau vers la banlieue et absorbe toutes les compagnies en 1925 soit 122 lignes de tramway et 72 lignes d'autobus.

[21] STCRP : La Société des transports en commun de la région parisienne.

Figure 16 : L'autobus type TN 6 du réseau de la STCRP puis de la RATP
(Source : http://www.planeterenault.com/histoire2-28-Le+Bus+TN6.html)

Suppression du tramway et l'institution de la CMP[22] comme compagnie unique de transport parisien

En 1930, on constate un parc de 3 100 tramways et de 1 700 autobus ; en 1934, la suppression rapide des tramways (Larroque et al. 2002, op.cité) fait que ce rapport s'inverse à 1 600 tramways contre 2 900 autobus, en 1936 le nombre des tramways n'est plus que de 348 tramways contre 3 600 autobus. Les dépôts de tramways sont progressivement transformés pour les autobus ; la Société Renault va livrer de nouveaux modèles, les TN4 et TN 6 dont les dimensions sont de 9,5 m de longueur, 2,41 m de large et 2,97 m de haut ; ils offrent 50 places dont 33 assises. En 1937, circule le dernier tramway parisien, puis le tramway disparaît en banlieue dès 1938, à l'exception du réseau Versaillais qui subsistera jusqu'en 1957 (Tricoire 2007).

En juin 1940 à l'approche des allemands de Paris, tous les autobus sont réquisitionnés. Les autobus vont réapparaître progressivement alimentés à l'alcool, au gaz de ville, au gaz de charbon de bois ou « gazogènes ». En 1942, le Gouvernement de Vichy impose la fusion du réseau de surface et du réseau métropolitain, la CMP exploite le métro et les autobus à partir du 1er janvier 1942. La pénurie des différents carburants entraine l'apparition du trolleybus Vetra qui est exploité sur deux lignes. À la Libération de Paris le trafic est totalement interrompu, il reprend avec un parc de 500 autobus à comparer au 4 000 autobus exploités en 1939.

[22] CMP : Compagnie du Métropolitain de Paris.

La renaissance du réseau routier

À la fin de 1948, l'exploitation s'effectue avec 2 000 autobus pour 38 lignes à Paris et 75 en banlieue, constituant un réseau de 964 kilomètres. De 1950 à 1962, la RATP met en service 1700 véhicules neufs. Malgré la modernisation, la fréquentation du réseau passe de 852 millions de voyageurs en 1960 à 501 millions en 1973 en raison de la croissance de la circulation automobile qui ralentit la vitesse commerciale des autobus.

Figure 17 : Le Somua OP5, le bus de l'après-guerre mondial
(Source : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Somua_OP5.jpg)

Une nouvelle organisation est mise en place, avec la définition de deux périmètres distincts : un pour la Ville de Paris et un pour la Banlieue. Dans la ville, les lignes complètent la desserte du métro et assurent les liaisons dans les quartiers mal irrigués par le métro. En banlieue, les lignes radiales constituent le prolongement des lignes de métro. En grande banlieue, les lignes d'autobus assurent un rabattement vers les gares ferroviaires.

Grâce à ces différentes mesures, le trafic passe de 600 millions de voyageurs en 1946 à 900 millions en 1948. De 1950 à 1962, 1700 véhicules neufs Somua, Chausson ou Berliet sont commandés par la RATP nouvellement créée afin de renouveler le parc. En 1965, le bus standard devient le modèle emblématique du réseau. En septembre 1959, une nouvelle autorité organisatrice des transports de la région est créée : le syndicat des transports parisiens.

À partir de 1965, le SC10 est mis en service : il deviendra le matériel roulant caractéristique du réseau de bus RATP. Le trafic connaît un déclin progressif consécutif au développement des transports individuels. De 1960 à 1973, le trafic chute de 852 millions à 501 millions de voyageurs annuels. La congestion due à l'automobile devient chronique et fait baisser la vitesse commerciale de 20 % : elle tombe à 14 km/h à Paris et 10 km/h en banlieue. L'attractivité du réseau continue à diminuer.

Figure 18 : Le SC10 construit à grande échelle de 1965 à 1988
(Source : AMTUIR[23])

La RATP essaie de résoudre les différentes causes de cette baisse de fréquentation. Les premiers couloirs bus sont aménagés et ouverts en 1964, en 1968 et en 1971 : ils totalisent alors plus de 34 km. 8 lignes d'autobus sont restructurées devenues lignes pilotes pour emprunter ces couloirs sur la plus grande partie de leur itinéraire, leur trafic augmente de 20% en deux ans avec une régularité accrue.

L'exploitation adopte la radiotéléphonie entre bus et les commandes centralisées des départs installées progressivement dans les terminus. En 1979 tous les bus en sont ainsi équipés. La fréquentation augmente entre 1973 et 1974 de plus de 5% après des années de chute.

À partir de 1975, la création de la carte orange entraîne une hausse spectaculaire de la fréquentation. Ainsi, en 1976, le trafic augmente de 31 %, atteignant près de 680 millions de voyageurs. Pourtant en 1980 le trafic réamorce une rechute.

Figure 19 : L'autobus R312
(Source : RATP)

À partir de 1982, le RER entraîne une nouvelle hausse de fréquentation du réseau de transport dont le bus qui voit sa fréquentation en banlieue augmenter à nouveau : la RATP retire le bus SC10 progressivement pour le remplacer par un matériel de plus grande capacité le Renault R312 et l'autobus articulé Renault PR180. Ces derniers

[23] AMTUIR : Musée des Transports Urbains Interurbains et Ruraux

matériels sont exploités sur le réseau parisien en 1983. Leur arrivée permet désormais de faire face à l'importante fréquentation de certaines lignes. Disposant de près de 150 places (6p/m^2), ils sont très bien adaptés aux lignes à fort trafic : le libre-service d'accès à ces bus est instauré.

En octobre 1988 est lancée l'opération « Autrement bus » effectuée pour améliorer l'attractivité des autobus en créant de nouvelles lignes, en simplifiant des itinéraires, en modifiant la numérotation des lignes, en harmonisant les horaires, en organisant les correspondances aux gares d'échange.

Le R312, nouveau véhicule à plancher surbaissé mis au point par la RATP avec Renault, est mis en service en juin 1988. Différent du SC10, il a un moteur disposé à l'arrière permettant de maintenir un plancher plan sur toute sa longueur du véhicule.

Le site réservé aux autobus se développe notamment à partir des années 1980 avec la mise en site propre d'une partie des lignes 178 (La Défense - Gare Saint-Denis) et 183 (Porte de Choisy - Orly), et surtout à partir de la fin de l'année 1993, avec la mise en service du Trans Val de Marne (TVM). Cette première ligne en site propre, entre Saint-Maur et Rungis, permet une augmentation significative de la vitesse commerciale des autobus articulés. Le trafic de cette ligne augmente à son tour très fortement, à tel point que les autobus sont parfois complets.

Au milieu des années 1990, le réseau bus commence à bénéficier de la localisation des véhicules par satellites grâce au GPS et au système Altaïr pour la régulation et l'information voyageur. Le système Aigle permet la surveillance des usagers par les agents de sécurité.

Avec le projet « Bus 2000 », la RATP et la Ville de Paris collaborent pour une plus grande priorité à la circulation des autobus dans la capitale.

En 1996, Renault met en construction un nouvel autobus à plancher surbaissé, permettant de supprimer l'emmarchement intermédiaire, facilitant ainsi l'accès au véhicule des personnes âgées et handicapées : l'Agora. Cet autobus est construit à grande échelle de 1996 à 2006. Il est livré en version standard à partir de 1997 ; son nombre atteint près de 2 000 véhicules en février 2002 ; il est également produit en version articulée, sous le nom Agora L.

Figure 20 : L'autobus Renault Agora à plancher surbaissé
(Source : RATP)

Ces Agora L permettent dans un premier temps, le remplacement des plus anciens PR180 : 200 Heuliez Bus GX 317 dit Citybus, complètent la flotte des Agora. En mars 2002, les derniers SC10 sont retirés définitivement du service. Suite à ce retrait, la RATP poursuit alors la modernisation du parc avec la livraison des autobus Agora Line complétés par quelques MAN de type NL 223 et des Mercedes O530 alias Citaro.

À la fin 2006, l'Agora est remplacé par le Citelis Line d'Iveco. À partir de 2007, les SCANIA Omnicity sont livrés. Ces livraisons entraînent la réforme progressive des R312.

En 1999, c'est autour de la ligne PC avec la création du PC1, puis du PC2 et du PC3. En décembre 2006 c'est la mise en service de la ligne de tramway T3 qui remplace la majorité du parcours du PC1. Après que le bus ait remplacé le tramway (1937), c'est le tramway qui remplace le bus PC avec la mise en service de T3 (2006). En effet, depuis cette date, une ligne de tramway intra-muros a remplacé le PC1 entre le Pont du Garigliano et la Porte d'Ivry.

Afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre, les nouveaux véhicules sont désormais respectueux de l'environnement. Certains sont dotés de filtres à particules qui réduisent les rejets de carbone et d'hydrocarbure dans l'atmosphère. Des véhicules sont équipés en Gaz Naturel de Ville ou au Gaz de Pétrole Liquide. Pour favoriser le développement durable, les autorités décident de favoriser le développement des transports urbains afin de réduire d'une façon importante l'usage de l'automobile. Ainsi à Paris, la nouvelle municipalité, mise en place depuis 2001, aménage des protections des couloirs pour autobus, rendant l'intrusion des automobilistes dans les couloirs plus difficiles, situation qui améliore nettement la fluidité de circulation des autobus.

Ensuite, en collaboration avec le STIF, la RATP et la Ville de Paris Ville améliorent progressivement les fréquences sur les lignes les plus importantes à travers le projet Mobilien. De plus, il est décidé de renforcer fortement les fréquences les dimanches et jours fériés où le réseau était devenu très insuffisant.

En janvier 2010, le STIF, la Région Île-de-France, la RATP et la ville de Paris ont inauguré la mise en accessibilité de la soixantaine de lignes de bus de Paris intra-muros aux usagers en fauteuil roulant, première étape avant la mise en accessibilité de toutes les lignes de bus d'Île-de-France exploitées par la RATP (Tricoire 2007).

L'autobus s'est donc adapté depuis 1900 à l'attente des clients :

- Dans le domaine du matériel roulant, en mettant en service des véhicules accessibles à tous, plus économes en énergie, plus confortables, avec l'objectif de développer le BHNS,
- Dans le domaine du service, en offrant des prestations plus proches des citadins, en renforçant l'offre notamment en soirée.

Un des facteurs essentiels de la qualité de service est de mieux vivre ensemble le temps partagé à bord d'un bus ; c'est la Bus Attitude lancée en 2003 par la RATP : les résultats enregistrés depuis le début de cette démarche est une baisse de la fraude de

16% à 10,2% et une amélioration sensible de l'image du bus, ce qui incite à poursuivre et à amplifier la Bus Attitude.

Le projet Mobilien consiste à créer un réseau de surface dense, rapide, fiable, et à haute qualité de service afin de participer à la baisse de 3% du trafic automobile programmé par le PDU en Île de France. Un réseau de radiales et de rocades offrant un accès rapide aux axes lourds doit être réalisé, pour rendre les autobus plus rapides, plus réguliers et plus fréquents, offrir un meilleur confort et une meilleure information en temps réel aux stations et dans le bus. L'intermodalité sera mieux assurée par une amélioration physique des principaux pôles : ce projet intéresse à terme 70 lignes et 80 pôles d'échanges.

Les dernières évolutions de l'autobus : l'autobus en site propre

L'autobus dont le trafic et le niveau de service diminuaient constamment et qui semblait jouer un rôle secondaire par rapport aux systèmes sur rails, a vu sa situation se redresser grâce notamment au développement de couloirs réservés, d'expériences de promotion comme les lignes pilotes décrites ci-dessus en région parisienne et ailleurs.

On a aussi constaté que l'autobus, lorsqu'on peut lui assurer une circulation régulière, a des atouts pour le passager par rapport au métro ou au chemin de fer de banlieue, tels qu'un caractère plus humain, une intégration plus grande à la ville, le bénéfice du spectacle de la rue, une accessibilité plus commode, etc.

Pour l'exploitant, c'est la flexibilité de l'autobus qui permet de s'adapter au développement de la ville, la souplesse de l'exploitation qui permet de modifier facilement les itinéraires pour réduire les trajets terminaux et les ruptures de charge.

En réservant une emprise pour la circulation et les stations séparées physiquement de la circulation générale aux autobus, on leur assure les conditions de vitesse et de régularité comparables à celles des systèmes sur rail. Au début des années 1980, il existe déjà ce type de site propre pour les autobus dans des villes nouvelles comme Evry et St Quentin en Yvelines, Runcorn et Redditch en Angleterre. Dans des corridors routiers ou ferrés, on trouve ces sites à Dallas (North South central Expressway), Pittsburgh (East ans South Pathways), Milwaukee (East West Transitway) et Dayton (Penn Central Busway). Il y a des sites propres permanents combinés à des voies rapides à Washington (Shirley Highway Busway), Los Angeles (San Bernardino Freeway Busway) et Chicago (Crosstown Busway). On trouve aussi ces autobus sur des voies réservées à contresens sur des voies rapides comme à New York (I-495, Long Island Expressway), à San Francisco (U.S.101). Enfin on trouve des sites propres combinés à la voirie ordinaire comme à Liège (Bld d'Avroy, Quai St Léonard), à Curitiba, des couloirs sur des axes fortement urbanisés, à Paris (RN 305). (Midgley 1977)

Le nombre de lignes ou de réseaux d'autobus en site propre à travers le monde a sensiblement augmenté pour être de l'ordre de 150 réseaux et de plus de 50 lignes.

2. Tramway[24]

2.1. Tramway sur fer « moderne »

2.1.1. Explication générale

Comme nous l'avons évoqué ci avant, l'origine du tramway se situe aux États-Unis vers 1830 dans les villes en pleine expansion. Il occupait une place importante dans le développement des transports collectifs et de l'urbanisation au début du XXe siècle, mais cette place est bientôt prise par l'automobile qui pousse de plus en plus à la disparition des tramways et au déclin des transports en commun.

Cette tendance s'est également déroulée dans presque toutes les villes françaises sauf dans certaines villes: Lille, Marseille et Saint-Etienne, pour une longueur de voies de l'ordre de 30 km, et aussi en Grande-Bretagne, dans l'Europe du Sud et en Amérique du Nord sauf dans les villes d'Europe du Nord. Le recul du tramway a été moindre dans les villes d'Europe du Nord sans parler de l'Europe de l'Est où la situation n'est pas comparable.

Les villes d'Europe du Nord - de la Suède à la Suisse en passant par les Pays-Bas, la Belgique, l'Allemagne, l'Autriche - ont, pour la plupart conservé et développé après la Seconde Guerre mondiale leurs réseaux de tramways de même que les grandes villes italiennes. Ainsi les infrastructures ont été rénovées et de nouveaux véhicules ont fait leur apparition.

Dans ces pays très souvent, le plan de développement des transports collectifs s'est accompagné, dès les années 50-60, de plans d'organisation générale des déplacements rationnels visant à limiter l'usage de l'automobile dans le centre des villes. Cette politique n'a pas pour autant empêché une très forte progression de la motorisation et a probablement induit le phénomène très poussé de « centre tertiaire vidé de ses habitants », caractéristique des pays concernés.

En France, comme aux États-Unis et en Grande-Bretagne, le développement des transports en commun admis comme nécessaire seulement à la fin des années 60, a été d'abord conçu autour de la création de modes nouveaux basées sur l'utilisation de petits véhicules sans conducteur gérés automatiquement dont les projets ont alors fleuri: Urba, Télérail, Poma 2000, Aramis, PRT, TTI-OTIS. Malgré de longues années de développement, ces systèmes n'ont pu donner satisfaction et ont été abandonnés. Au-delà des problèmes de mise au point de leur fiabilité ou de leur sécurité, leur échec est dû essentiellement, à leur non-adaptabilité à la ville. Seul le métro automatique léger de Lille, le VAL a connu une descendance, utilisé aujourd'hui par plusieurs réseaux (Lille, Rennes, Toulouse, CDG-Roissy, Orly Val, Turin, Chicago airport).

La technologie simple et éprouvée du tramway, modernisée progressivement, ne pouvait donc manquer de se rappeler au souvenir des responsables des collectivités confrontés au problème du nécessaire développement du transport collectif, et qui pouvaient admirer et envier des réseaux de qualité dans les pays voisins.

[24] Le tramway : « chemin de fer (urbain) circulant sur rails plats ou à gorge établis sans saillie à la surface des rue des villes », définition du dictionnaire Quillet.

Depuis l'année 1985 avec la ville de Nantes, la France a connu une véritable révolution par la réintroduction du tramway « moderne » dans ses rues. À l'heure actuelle en 2010, il y a environ 450 km de ligne de tramway et 300 km en projet. Entre l'autobus et le métro, le tramway moderne tend désormais à occuper de nouveau la place perdue. Si le tramway n'avait pas fait l'effort de modifier sa performance depuis son déclin dans certains pays, personne ne parlerait aujourd'hui de sa renaissance. Il s'adapte en effet parfaitement à une demande de transport comprise entre 2000 et 7000 voyageurs par heure et par sens, demande que l'on observe dans les villes à partir de 200 000 habitants et jusqu'à plus d'un million d'habitants. Les développements remarquables de nouveaux réseaux de tramways en France de Nantes à Paris, en Amérique du Nord et ailleurs dans le monde confirment « cette renaissance du tramway ».

Si pour les grandes agglomérations, le métro se justifie pleinement sur les axes principaux, le créneau de capacité du tramway en fait un complément intéressant en évitant un développement systématique de l'infrastructure lourde. D'ailleurs, dans des villes moyennes ou petites, le tramway peut parfaitement occuper sa place pour les axes principaux avec des lignes de bus supplémentaires. Ceci est possible parce que les atouts du tramway sont en effet nombreux :

- Une capacité bien adaptée,
- Une bonne vitesse commerciale grâce au site propre et à la priorité aux feux,
- Une qualité de transport très élevée,
- Un confort du voyageur.

En ce qui concerne la vitesse commerciale, elle se situe, suivant les cas, entre 18 et 22 km/h soit environ 50 à 100 % d'amélioration par rapport à la vitesse moyenne des autobus. Elle reste inférieure aux vitesses observées dans un métro qui emprunte le site propre intégral soit dans des tunnels soit sur viaducs, mais offre une moindre distance entre stations, facteur très important dans une agglomération moyenne ou petite. Elle peut être aussi améliorée de façon très significative grâce à la priorité accordée au tramway par rapport au trafic individuel, notamment dans le franchissement des carrefours à feux. Le gain de temps pour le tramway, à ces carrefours est en effet très important pour une pénalisation minime, voire nulle, des automobilistes. Cette solution évite le recours à des ouvrages souterrains coûteux, dont la nécessité est discutable.

Pour ce qui est du confort du voyageur, il est donné couramment par:

- Le transport à l'air libre avec le spectacle de la rue et le sentiment de sécurité qui s'y rattache,
- La qualité du roulement ferroviaire,
- La capacité et l'aménagement du véhicule,
- La fréquence importante de passage,
- Une accessibilité exceptionnelle.

Les développements du plancher bas permettent de disposer de véhicules avec un plancher à hauteur d'un trottoir, qui facilite les échanges aux arrêts et en même temps permet une meilleure accessibilité pour tous ceux qui utilisent le tramway.

Par ailleurs, du fait de coûts d'investissement et d'exploitation limités, le tramway devient un des modes de transport intéressant étant économique et efficace en terme de coûts et aussi de l'énergie. Ramené en coût d'investissement au kilomètre, un tramway moderne circulant entièrement en site propre au sol revient, toutes opérations annexes incluses, en moyenne entre 15 et 30 M€/km (valeur 2007) selon les difficultés d'insertion rencontrées et la prise en compte plus ou moins grande d'opérations urbaines annexes, par exemple l'aménagement urbain, qui vont avec.

En matière d'exploitation, le coût au kilomètre que l'on utilise souvent n'est pas toujours homogène selon les villes dont les contextes sont différents et les méthodes de calcul différentes. A titre d'exemple, le coût au kilomètre moyen est entre 5 et 7 €/km. Si nous le ramenons à la PKO (place x km offerts sur la base de 4 personnes debout/m^2), comme le tramway offre plus de capacité, la PKO est généralement supérieure à celle de l'autobus. Le réseau de Nantes enregistrait, pour 1986, un coût au véhicule par kilomètre de 22,70 F pour le tramway contre 15 F pour l'autobus, ce qui ramené à la PKO donne un coût plus grand pour la PKO de l'autobus. Ces chiffres globalement cohérents montrent bien l'économie que peut apporter un tel système dans la mesure où, évidemment, les trafics observés ou à assurer sont relativement grands et en pleine adéquation avec les capacités offertes.

En général, dans les agglomérations moyennes, la qualité du site propre et de l'insertion urbaine est primordiale ou déterminante pour le bon fonctionnement du tramway. Le site propre doit:

Marquer la place du tramway moderne dans les rues ou espaces empruntés,

- Permettre, par une protection maximale, une vitesse commerciale la plus élevée possible,
- Maintenir, voire faciliter, les conditions de desserte des immeubles et commerces riverains,
- Améliorer le paysage urbain par un traitement de qualité appropriée de nature à compléter son insertion, un tramway moderne ne devant pas être une greffe, mais un embellissement.

Au-delà, le tramway peut être conçu comme un outil d'aménagement de la ville que l'on utilise souvent de nos jours et un moyen de la remodeler, et de la revitaliser en engendrant des opérations urbaines de grande ampleur. Autrement dit, la construction d'une ligne de tramway est généralement l'occasion d'une restructuration et d'une requalification urbaine permettant la recomposition des usages de l'espace public et la prise en compte des différents modes de déplacements urbains (Certu 2004).

Selon des experts, la construction d'un tramway offre de nombreux avantages :

- Dans une perspective de compatibilité des moyens de transport et de développement du réseau à long terme, construire un tramway permet une meilleure intégration dans le réseau,
- Du point de vue financier, cela a aussi pour avantage de réduire les coûts de matériel et d'entretien à l'égard des autres systèmes lourds,
- Du point de vue des usagers, la liaison rapide et sûre entre le centre-ville et les nœuds de transport est réalisée grâce à l'utilisation du site propre[25],
- Une connexion, s'il y a un autre projet de transport ou non, serait à terme possible avec l'autre moyen de transport sans trop de difficulté et sans complication au moindre coût,
- Un réaménagement de l'espace public :
    - La création d'une ligne de tramway implique en effet de prendre de l'espace au trafic individuel, notamment le véhicule privé et de faciliter un réel transfert modal de la route vers les transports publics[26],
    - Accompagnée d'aménagements favorisant les piétons et les cyclistes, la construction d'une ligne de tramway est de nature à améliorer significativement la qualité de vie sur les axes desservis. Le tram offre une desserte des quartiers beaucoup plus fine que les autres systèmes lourds et permet ainsi de mieux répondre aux besoins des habitants.

À titre d'exemple, le tableau suivant donne des informations sur les changements intervenus pour le tramway au cours des trente dernières années dans tous les azimuts : le mode d'implantation, l'insertion urbaine, les infrastructures, l'alimentation en énergie, les conditions l'accès pour les usagers, les conditions d'opération, le matériel roulant et les coûts (Bergeron 2003).

	Tramway des années 1950	Tramway moderne
Mode d'implantation	Partage de la voirie avec les autres, Nuisance pour le véhicule routier	Site propre (intégral), Priorité par rapport aux véhicules routiers
Insertion urbaine	Aucune disposition particulière	Outil de réaménagement de l'espace public
Infrastructure au sol	Faible technicité : simple pose des voies sans rails soudés Problème du bruit et de vibration	Haute technicité : dalle flottante, rails soudés, Silence et moins de vibration
Alimentation électrique	Par caténaires et LAC (Ligne Aérienne de Contact)	Par caténaires et LAC, Alimentation sans fils : APS (Alimentation par le Sol), batterie, supercapacité
Confort et sécurité d'accès	Accès depuis la voirie, Plancher haut	Accès depuis le quai de station, Plancher bas
Condition d'exploitation	Aléas de la circulation, Sans régularité	Indépendant de la circulation, Régularité
Matériel roulant	Véhicules rustiques, Capacité limitée, Aucun design pour le confort	Rames de 30 à 45 m, Capacité quasi-illimitée, Norme pour le confort, Silence de roulement, Absence de mouvements latéraux
Coûts	Quelques millions d'euros au km	15 à 30 millions d'euro au km

Tableau 3: Évolution du tramway
(Source : Bergeron 2003)

[25] En général, le premier projet de tramway permet de construire l'axe structurant de transport entre le centre-ville et les autres pour une ville moyenne.
[26] Ceci doit être vérifié après la réalisation et ce n'est pas toujours évident.

Toute cette évolution intervenue depuis les années 50 ne doit pas conduire à minimiser l'évolution considérable intervenue entre les premiers tramways du début du 20ième siècle et les tramways des années 1950 : le remarquable PCC aux États Unis qui s'est développé pour atteindre plusieurs dizaines de milliers de tramway dans le monde, les tramways allemands à grande capacité, etc.

2.1.2. Aspect technique

Le tramway, contrairement aux véhicules routiers, exige une infrastructure spécifique, qui assure des fonctions diverses. Dans cette partie, nous allons aborder cette spécificité d'infrastructure du tramway.

2.1.2.1. Les voies d'un tramway moderne

La fonction essentielle de la voie est d'assurer la continuité mécanique du chemin de roulement qui supporte le matériel roulant et en assure le guidage dans les conditions de sécurité maximale, de confort satisfaisant et de durée optimale. En outre, elle doit assurer le retour de courant et donc présenter une bonne isolation par rapport à la terre (Godon and Crespolini 1995). On identifie la voie par son système de pose. Le choix du type de pose de voie ferrée auquel on associe un type de revêtement de plate-forme est fondamental sur la tenue des revêtements et sur le coût de la maintenance ultérieure (Certu 2004).

Il existe en gros deux types de voie : la voie sur ballast (classique) et la voie sur béton.

La voie sur ballast est très facile à poser et moins coûteuse, mais elle nécessite des réglages géométriques réguliers et présente des contraintes en milieu urbain dense, notamment dans le centre-ville.

La voie sur béton est le type de pose le plus utilisé sur les réseaux de tramway. Elle nécessite de lourds travaux de bétonnage pour sa réalisation, mais en contrepartie ne subit quasiment aucune déformation au cours du temps et nécessite peu d'entretien (Godon and Crespolini 1995).

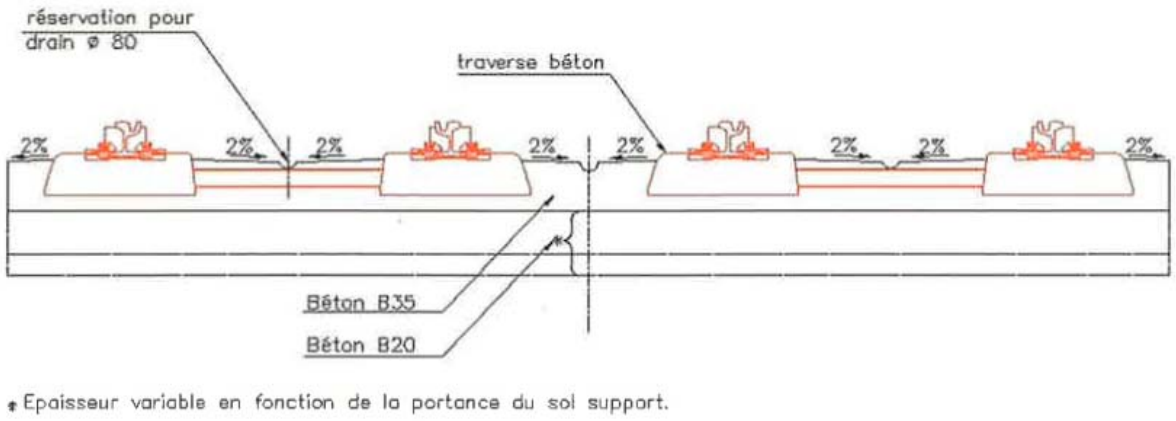


Figure 21: Schéma de principe d'une voie sur béton
(Source : Godon et Crespolini 1995)

Pour la voie sur béton, plusieurs types de pose de la voie existent :

- Pose sur plate-forme à un étage élastique,
- Pose sur plate-forme à deux étages élastiques,
- Pose sur dalle flottante en plate-forme (pose sur blochets),
- Pose sur selle (APPITRAK d'Alstom).

Pose à un étage élastique

Cette pose généralement utilisée sur de nombreux réseaux, assure une bonne isolation de la voie en évitant ainsi la transmission des vibrations de hautes fréquences.

Le rôle amortisseur est assuré par une semelle en caoutchouc de 9 mm, placée entre la table d'appui et le patin de rail, les attaches étant également élastiques. Le calage des traverses est assuré par un béton de remplissage reposant sur un béton de forme, dont l'épaisseur varie entre 20 et 30 cm.

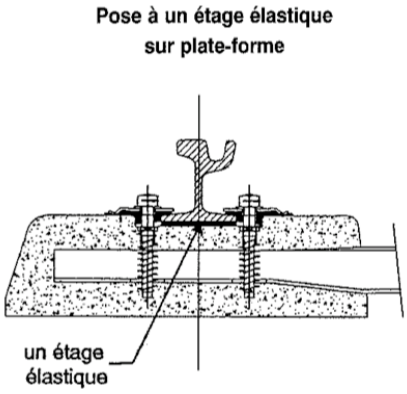


Figure 22: Pose à un étage élastique sur plate-forme
(Source : Godon et Crespolini 1995)

Pose sur dalle flottante

On utilise cette pose de la voie principalement pour les zones difficilement traversables sans amortissements importants des bruits et des vibrations tel les hôpitaux et les immeubles d'habitation. Ce système renforce l'isolation assurée par la pose à un étage élastique grâce à la mise en œuvre d'une dalle disposée sur un matériau résilient.

Le premier étage assure le filtrage des hautes fréquences, tandis que la masse de la dalle flottante et le matériau résilient assurent une absorption très efficace des vibrations de basse fréquence.

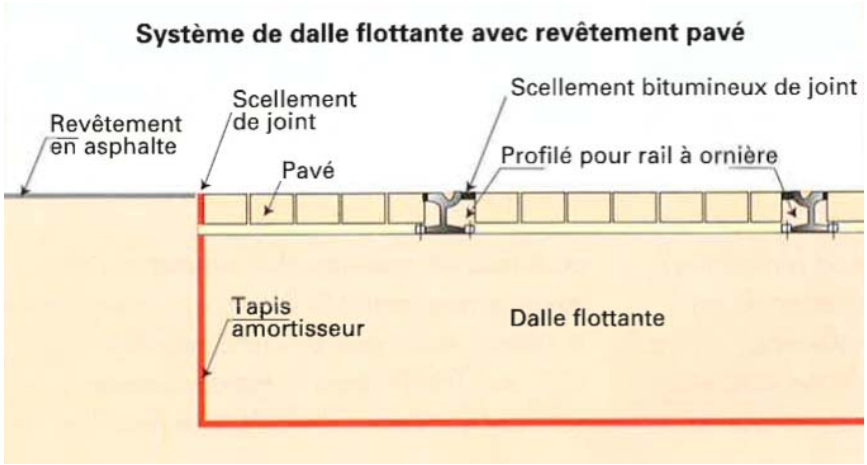


Figure 23: Schéma de dalle flottante
(source : M. Gayda)

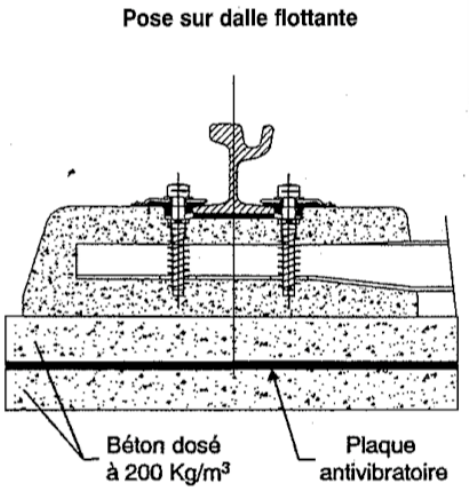


Figure 24: Pose sur dalle flottante
(Source : Godon et Crespolini 1995)

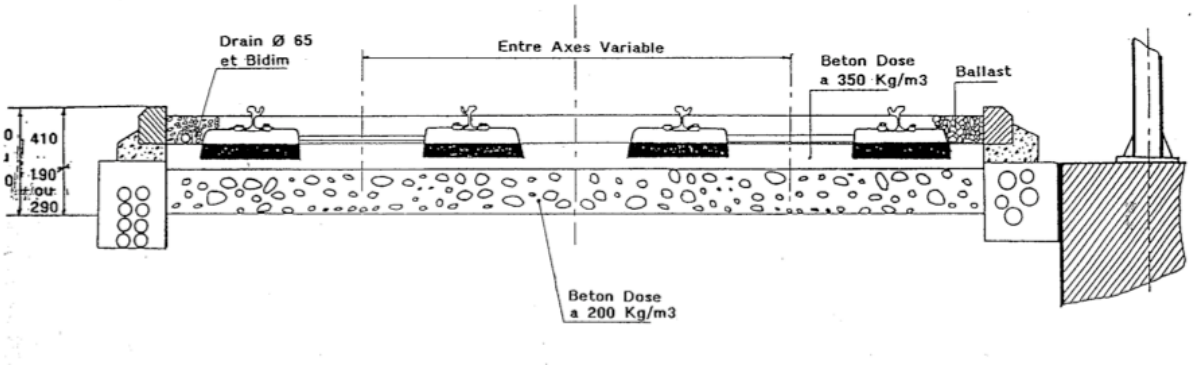


Figure 25: Coupe transversale de la voie sur dalle flottante
(Source : Egis Rail)

Pose sur selle (APPITRACK™)[27]

C'est une pose récemment développée par Alstom pour réduire les temps de pose et donc les coûts de main d'œuvre de pose de la voie ainsi que les embarras du chantier d'un projet de tramway sur la circulation urbaine. Elle est ainsi une nouvelle méthode de construction accélérée et automatisée des voies de tramway et de métro conçue pour réduire les nuisances liées aux chantiers d'infrastructures. Ce nouveau système de pose appliqué sur la première ligne du tramway de Jérusalem permet de réduire la profondeur d'excavation, le temps de pose des voies et de réduire d'autant les coûts du projet.

APPITRACK utilise deux machines en tandem. La première machine (coffrage glissant), habituellement utilisée pour la construction des autoroutes ou des pistes d'aéroports, coule une dalle de béton continue suivant un alignement de voie prédéfini. La seconde intervient quelques mètres derrière, pose les systèmes de fixation des rails dans le béton frais au millimètre près en 3D et assure ainsi une tolérance de pose parfaite des rails.

L'entraxe de selles est en moyenne comme pour les traverses de 0,75 m en alignement et de 0,60 m en courbe lorsque le rayon de courbure est inférieur à 80 m (Certu 2004).

Par ailleurs, il y a eu une pose sur dalles de béton préfabriquées qui apparaissait innovante pour les tramways de Budapest et qui répondait aux mêmes objectifs qu'APPITRACK. Cependant la couche de fondation sous les dalles préfabriquées laissait apparaître des vides qui après quelques années d'exploitation a entraîné la fissuration prématurée des dalles qui n'assuraient plus leur rôle de support des rails au passage des tramways.

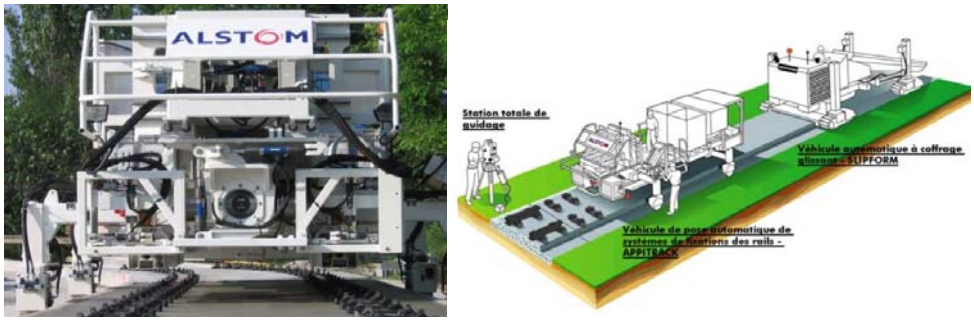


Figure 26: APPITRACK d'Alstom
(Source : Alstom)

2.1.2.2. Revêtement

Lorsque le tramway dessert le centre de la ville, il doit satisfaire à de nombreux critères parmi lesquels l'insertion dans les sites traversés et la qualité architecturale de l'environnement qui prennent une importance particulière. Il n'est donc pas étonnant que pour l'aménagement des espaces où le caractère urbain se doit d'être très marqué, tels que les quartiers historiques et les quartiers à forte densité, les concepteurs prescrivent des revêtements de sol qui renforcent le traitement qualitatif de la plate-forme (Certu 2004).

[27] Automatic Plate and Pin Inserter for Trackwork.

Il y a de nombreux revêtements utilisés en France. Par exemple à Montpellier nous trouvons plusieurs types de revêtement :

- recouvert de grave et de plantes grasses,
- recouvert par du bois ou du gazon. Ce dernier nécessite un entretien régulier tels que l'arrosage et la tonte,
- En sites propres, des éléments modulaires, comme des pavés autobloquants et des pierres scellées. Pour le premier revêtement, il n'y a pas eu de dégradations, en général, alors que pour les pierres scellées, des affaissements de matériaux souvent sont constatés,
- En zones de carrefours, des revêtements du type béton bitumineux et béton. Mais on constate souvent des dégradations localisées, le long des rails.

Figure 27: Exemples des revêtements utilisés en France
(Source: RATP)

2.1.2.3. Matériels roulants

Ce système de transport étant utilisé depuis plus d'un siècle, il existe plusieurs types de tramways dont la capacité offerte est aussi très variée. Si l'on regarde simplement le réseau de tramway classique à voie standard (écartement 1,435 m), seuls deux constructeurs sont actuellement présents dans les villes Françaises : Alstom et Bombardier, on trouve néanmoins le constructeur Breda sur le réseau de Lille - Roubaix -Tourcoing à voie métrique.

Alstom, le leader en territoire français, fabrique deux modèles[28] :

- Le TFS, qui est à l'origine du renouveau du tramway en France est présent dans 4 villes,
- Le Citadis, disponible sous plusieurs versions, qui est présent dans 15 villes.

Le constructeur Bombardier est présent dans trois villes françaises grâce notamment au rachat du constructeur Adtranz en 2001 :

- Incentro à Nantes (modèle produit par le constructeur Adtranz).

[28] 2010

- Eurotram à Strasbourg (modèle du constructeur ABB devenu Adtranz par la suite).
- Flexity Outlook-Série C à Marseille.

Il est intéressant de noter que Bombardier a renommé sa gamme de tramways sous le nom de Flexity Outlook :

- Flexity Outlook-Série E qui est le nouveau nom de l'Eurotram,
- Flexity Outlook-Série C qui est le nouveau nom de l'ancienne gamme Cityrunner.

L'Incentro d'Adtranz n'est plus dans le catalogue des matériels proposés par Bombardier. Il est donc peu probable de retrouver ce type de tramway dans d'autres villes que celles où il est exploité actuellement, en l'occurrence à Nantes. Seule la ville de Strasbourg utilise un Flexity Outlook – Série E (ex Eurotram).

Le Citadis d'Alstom

Depuis le retour du tramway moderne, Alstom a obtenu presque toutes les commandes de tramways en France en raison de son statut de constructeur national. L'instauration du marché unique et la suppression des préférences nationales ont permis aux villes de choisir d'autres constructeurs. Cette arrivée de la concurrence avec des tramways à plancher bas intégral a rendu le TFS (Tramway Français Standard) dépassé puisque sa conception ancienne rendait toute évolution difficile.

Alstom a alors redéfini entièrement sa gamme de produit sur une base modulaire permettant une possibilité d'adaptation sans précédent, elle s'appelle Citadis. La gamme Citadis propose des rames de tramway allant de 20 à 40 m de long dans des largeurs de 2,20 à 2,65 m, en plancher mixte (70 %) ou en plancher bas intégral.

Deux éléments de « châssis type » permettent de composer des tramways (ces deux éléments pouvant être mixés) :

- Un élément à plancher bas partiel (héritage du TFS),
- Un autre élément à plancher bas intégral.

Les différentes combinaisons de caisses et de nacelles envisageables permettent à Alstom de proposer des rames :

- de 20, 30 ou 40 m de long,
- d'une largeur comprise entre 2.3 et 2.65 m,
- et d'une capacité de 145 à 302 passagers.

De plus, Citadis est conçu sur des bases modulaires qui rendent possible le design adapté à chaque demande tel que l'aspect extérieur, les équipements (commerciaux) intérieurs, et surtout le bout avant ou nez du tramway. Cependant, cette modularité et la

possibilité d'avoir son propre design engendrent un coût supplémentaire pour l'acheteur.

Figure 28: Citadis 402 à Paris
(Source : auteur)

En ce qui concerne l'amélioration de l'accessibilité, le plancher bas intégral consiste en l'utilisation des bogies de type Arpège sur l'ensemble de la gamme Citadis. Les bogies de type Arpège sont des bogies à pseudo essieu. En effet, des axes latéraux comprenant une roue et les éléments de freinage auquel s'ajoutent des équipements de traction sur les bogies moteurs viennent remplacer les essieux traditionnels.

Flexity de Bombardier

Bombardier offre aussi une gamme complète de tramways comme Alstom. Relativement fort en termes de fabrication, Bombardier vend des bogies qui s'appellent Flexx Bogies. Pour le tramway, il propose des bogies Flexx Urban conçus pour être faciles d'accès et offrir des déplacements confortables en milieu urbain, ils sont donc compatibles avec les véhicules à plancher bas.

Figure 29: Flexity à Bruxelles
(Source : Bombardier)

Figure 30: Flexx Bogie de Bombardier
(Source : Bombardier)

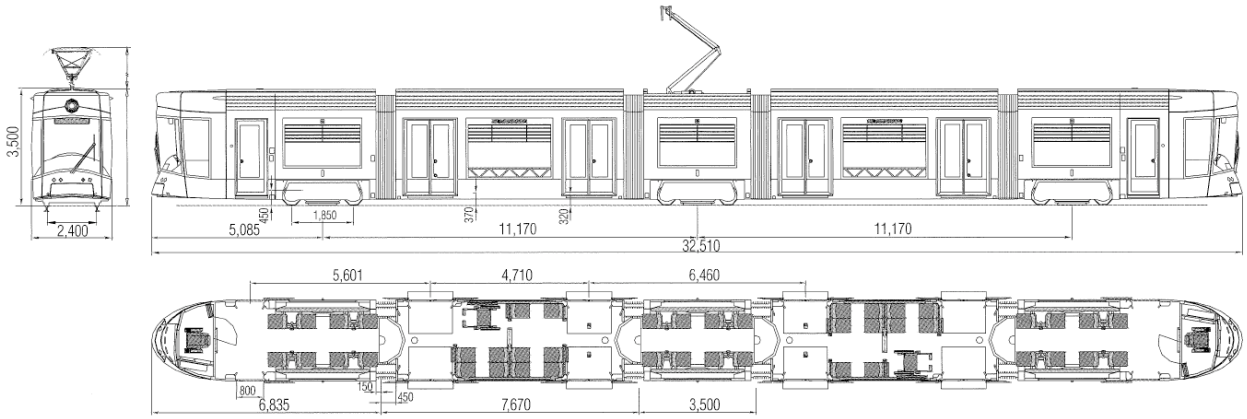


Figure 31: Diagramme du Flexity de Bombardier à Marseille
(Source : Bombardier)

Les caractéristiques principales des tramways largement utilisés de nos jours sont détaillées dans le tableau suivant :

Fabricants	Alstom				Bombardier		
Modèle	TFS classique/moderne	Citadis 301	Citadis 302	Citadis 402	Eurotram	Incentro	Flexity Outlook
Longueur	29,400 m	29,866 m	32,416-32,850 m	43,730 m	33,1-43,0 m	36,422 m	32,500 m
Largeur	2,300 m	2,320 m	2,400 m	2,650 m	2,400 m	2,400 m	2,400 m
Hauteur de plancher (mm)	Extrème:875 centre:345	Centre:350 bogie moteur: 600 mm	350 mm	350 mm	350 mm	350 mm	320 mm
Nombre de bogies moteur	2	2	2	3	3/4	2	
Nombre de bogies porteur	1	1	1	1	1	1	
Portes	2 modules (chacun pour la moitié du véhicule + 1 cabine conduite)	8 portes pour 2 caisses & 4 portes pour 1 caisse	8 portes pour 2 caisses & 4 portes pour 1 caisse	16	12/16	12	
Capacité	Places assises:54+4	Places assises:40	Places assises:48/64	Places assises:56/90	Places assises:66/92	Places assises:72	places assises:44

	Total: 174(4p/m^2), 252(6p/m^2)	Total: 176(4p/m^2), 261(6p/m^2)	Total: 170/200(4p/m^2), 255/272(6p/m^2)	Total: 288/300(4p/m^2), 380/400(6p/m^2)	Total: 230/256(4p/m^2), 275/370(6p/m^2)	Total: 239(4p/m^2), 394(6p/m^2)	Total: 160(4p/m^2)
Traction	D.C. avec excitation 2 x 275 kW	courant triphasé asynchrone, auto-ventilé 2 x 170 kW	courant triphasé asynchrone, refroidissement par l'eau 2 x 175 kW	courant triphasé asynchrone, refroidissement par l'eau 3 x 175 kW	courant triphasé asynchrone 4 x 26.5 kW	courant triphasé asynchrone, refroidissement par l'eau 4 x 45 kW	refroidissement par l'air 4 x 115 kW

Tableau 4: Caractéristiques principales des tramways en France
(Source : constructeurs)

2.1.2.4. Alimentation électrique

Le tramway est alimenté généralement en courant continu, sous une tension de 750 V pour les matériels modernes (600 V pour les réseaux anciens). En général, sauf l'APS[29] et l'utilisation de batterie, l'alimentation se fait par une ligne aérienne constituée de fils de cuivre de section suffisante (120 mm^2 environ) pour permettre des appels de puissance importants. La structure de la ligne est renforcée par un feeder souterrain mis en parallèle avec la ligne aérienne et raccordé à celle-ci au niveau de chaque station. La captation du courant sur la ligne aérienne est assurée par un pantographe à commande électrique avec des semelles d'archet en carbone. Chaque rame est équipée de bogies moteurs d'une puissance totale généralement comprise entre 200 et 300 kW.

Le dimensionnement général du réseau d'alimentation est calculé dans la perspective d'une exploitation en unités multiples. D'ailleurs, le dimensionnement des sous-stations du réseau de distribution doit être fait de façon à ce que la défaillance d'un poste n'altère pas la marche des tramways. Une fiabilité maximale peut être apportée au réseau d'alimentation haute tension des sous-stations à partir du doublement des postes source. L'énergie est gérée à partir du poste de commande centralisée, ce qui permet une action rapide sur tout événement ayant une incidence sur l'exploitation.

L'alimentation basse tension (courant faible) des équipements auxiliaires nécessaires au fonctionnement des équipements au sol du tramway, aussi bien au niveau des sous-stations de la distribution d'énergie qu'au niveau des stations, est réalisée à partir de transformateurs HT/BT placés dans les sous-stations. La liaison entre les sous-stations et les différents équipements emprunte un réseau multitubulaire qui chemine le long de la plate-forme.

Par ailleurs, on peut trouver aujourd'hui quelques innovations remarquables en termes d'alimentation électrique. Parmi les innovations concernant le tramway classique, l'alimentation électrique par le sol est la plus importante à noter. En effet, on reproche parfois au tramway l'aspect inesthétique des lignes aériennes de contact (LAC), notamment dans les centres historiques. C'est principalement par soucis d'esthétisme que la ville de Bordeaux a mis en service en 2003 un tramway circulant sur plusieurs sections avec alimentation par le sol (APS). Cette alimentation se fait à l'aide d'un troisième rail, situé entre deux rails de roulement. Il est divisé en sections isolées les unes des autres et qui ne sont automatiquement mises sous tension que lorsqu'un tramway se trouve au-dessus.

[29] APS : Alimentation par le Sol. On le voit dans le tramway de Bordeaux.

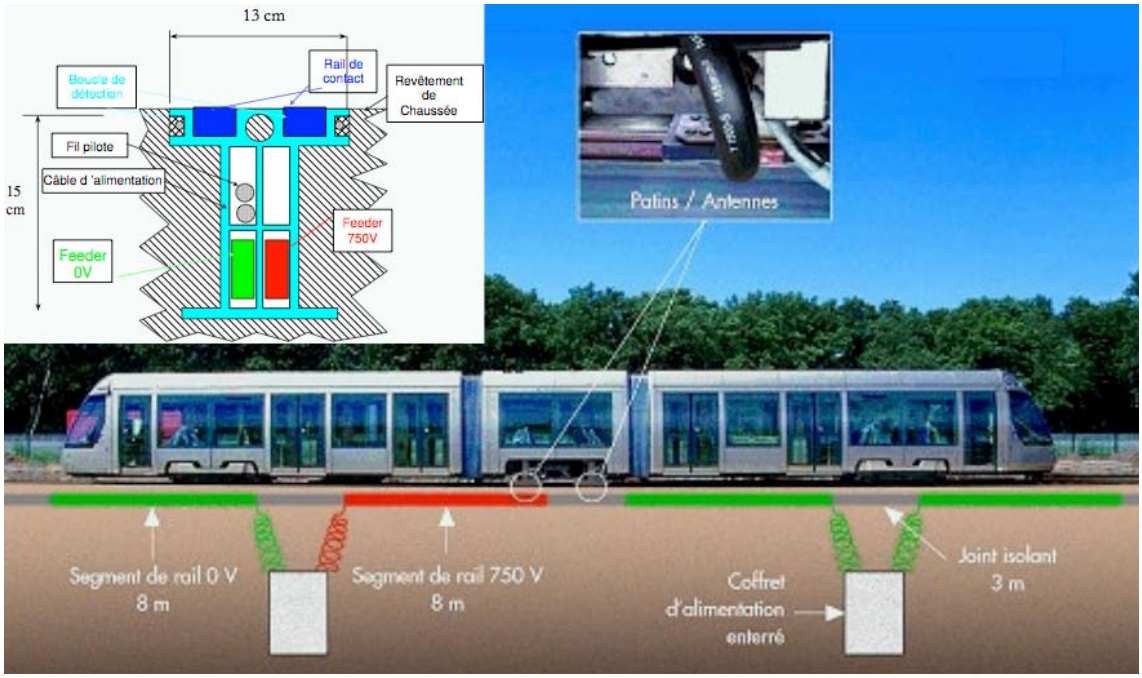


Figure 32: Alimentation par le sol (APS)
(Source : Alstom)

L'alimentation partielle grâce à une batterie embarquée est aussi une des innovations récentes. Le tramway de Nice (Citadis d'Alstom) est le premier tramway équipé de ce système de batteries embarquées. Ces batteries, de type nickel-métal-hydrure, permettent d'éviter les lignes aériennes de contact sur une partie de la ligne notamment en centre-ville permettant au tramway de traverser plusieurs centaines de mètres avec suffisamment d'énergie.

Figure 33: Batterie pour tramway
(Source : Saft)

Bombardier, un autre constructeur géant en termes de transport ferroviaire fournit aussi la solution d'alimentation sans caténaire qui s'appelle PRIMOVE. Selon le

constructeur, les voies sans caténaire pour les tramways et les véhicules légers sur rail augmentent l'attrait d'une ville en procurant un champ visuel sans obstacles.

Le nouveau système PRIMOVE de Bombardier permet d'exploiter les tramways FLEXITY sans caténaire sur des distances variées, partout. L'une des innovations de PRIMOVE est le système de transmission d'énergie sans contact. Ses composantes de distribution d'électricité sont invisibles, cachées sous le véhicule et sous la voie.

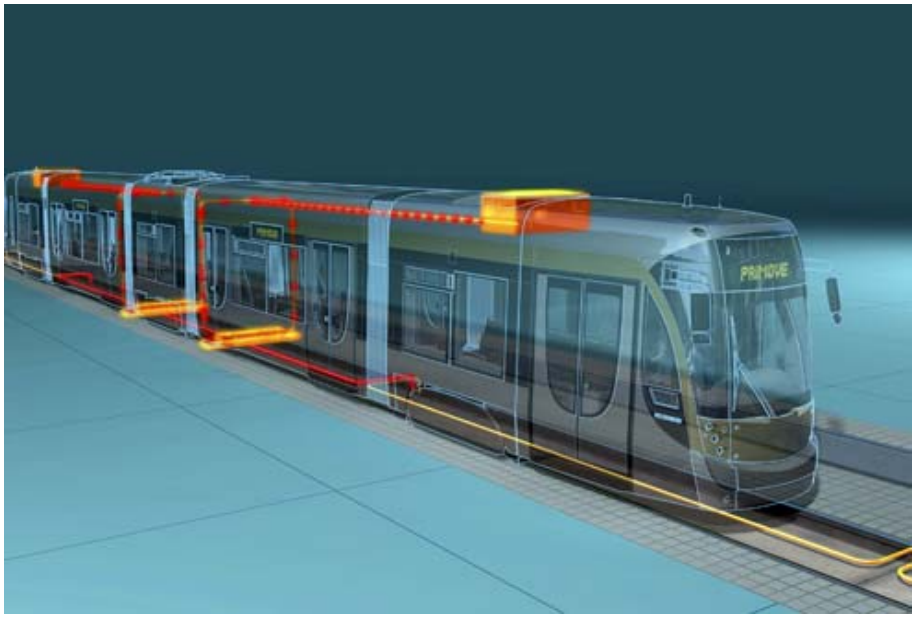


Figure 34: PRIMOVE de Bombardier
(Source : Bombardier)

La dernière chose à noter en termes d'innovation de l'alimentation électrique est l'utilisation de supercapacité. Cette technologie est actuellement en test sur le tramway CITADIS Alstom de Paris T3. Les avantages de ce système sont multiples :

- Suppression des lignes aériennes de contact,
- Économie d'énergie par la récupération énergie : cette solution hautement performante emmagasine l'énergie électrique générée au cours du freinage,
- Homogénéisation du niveau d'énergie.

Le système PRIMOVE, évoqué ci-dessus, utilise aussi des supercapacités pour assurer l'exploitation en continu des véhicules et concurrence ainsi Alstom.

2.1.3. Aspect économique

Les systèmes guidés (dans cette recherche, les tramways) amènent, en général, des économies liées à l'exploitation, tout d'abord, l'économie d'espace et d'énergie, ainsi que la réduction des nuisances sur l'environnement avec une qualité de service bien

supérieure. Toutefois, l'objet de cette partie est de ne regarder que l'aspect purement économique tel que le coût d'investissement et d'exploitation.

Le coût d'investissement d'un projet de tramway est véritablement incertain en raison de contextes locaux différents. Mais, juste à titre d'exemple, ce coût se situe, en général, entre 20 et 40 M€/km.

En ce qui concerne le coût d'exploitation selon les informations obtenues auprès des Autorités Organisatrices de Transport AOT et des exploitants, il se situe autour de 7 € par véhicule x km.

Néanmoins, les coûts d'un projet de transport urbain sont toujours délicats à dire et ne sont pas du tout homogènes selon les bureaux d'étude. Le tableau suivant montre, à titre d'exemple, l'ordre de grandeur des coûts des différents systèmes de transport communiqué par Systra.

	Prix d'un véhicule (M€/véhicule)	Coût d'investissement (M€/km de la ligne)	Coût d'exploitation (€/km parcouru)
Tramway	1,7-2,5	20-30	6
Translohr	2,35	20	6
TVR	1,9	15	6,5
CIVIS	0,8-1,4	8	
Trolleybus	0,5-0,8	4-10	3,1-3,6
Autobus articulé	0,2-0,3	4-8	3

Tableau 5: Coûts des différents systèmes de transport
(Source : Systra)

2.1.4. Aspect urbanistique

2.1.4.1. Emprise au sol

Le rayon minimum absolu pour un tramway est de 25 m, mais un rayon de 50 m de giration est normalement conseillé pour assurer une bonne insertion urbaine pour un coût de maintenance moins élevé dû à une usure excessive des roues.

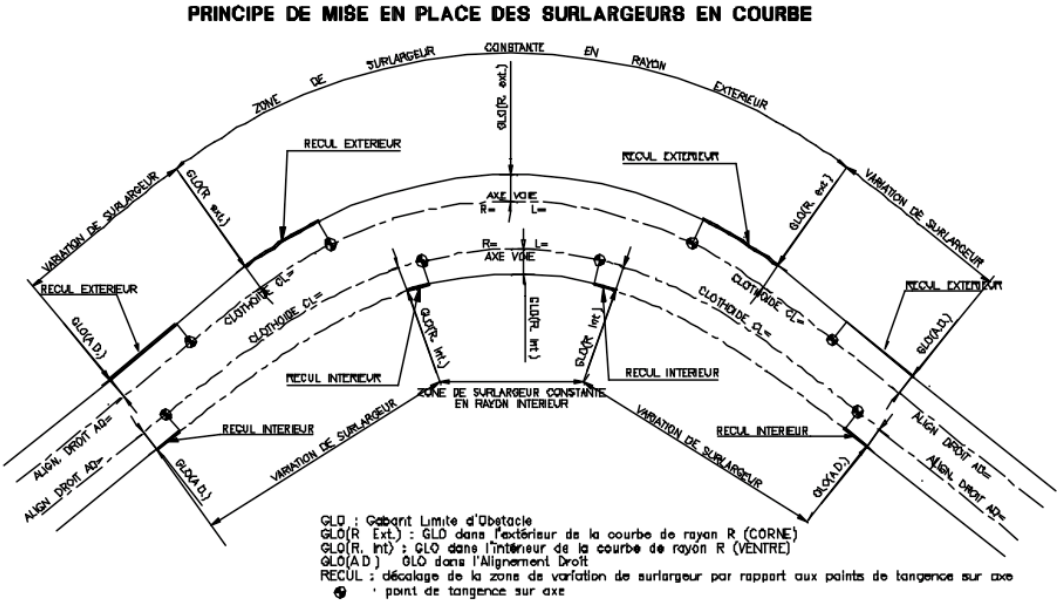


Figure 35: Insertion en courbe
(Source : Egis Rail)

L'emprise au sol du tramway de largeur de 2,30 m (type Citadis d'Alstom) est de 5,65 m à 5,95 m selon l'implantation d'un poteau support de la LAC axiale ou latérale.

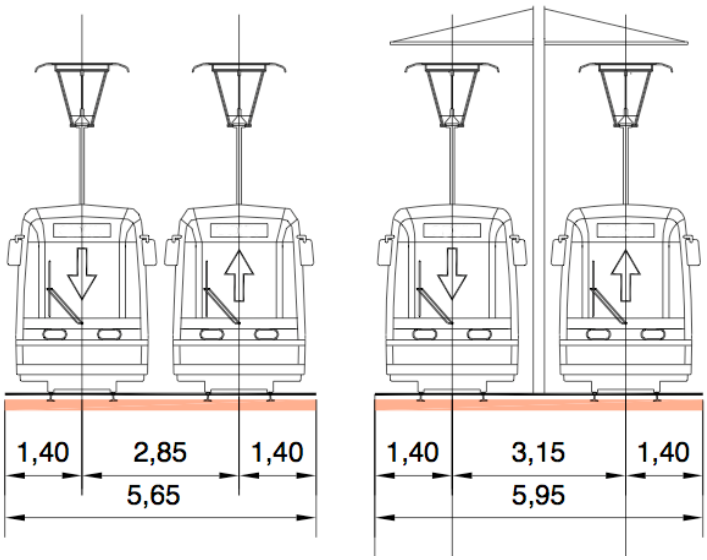


Figure 36: Emprise du tramway de largeur de 2,30 m
(Source : Egis Rail)

L'emprise au sol du tramway de largeur de 2,65 m (type Citadis d'Alsthom) est de 6,40 m à 6,80 m.

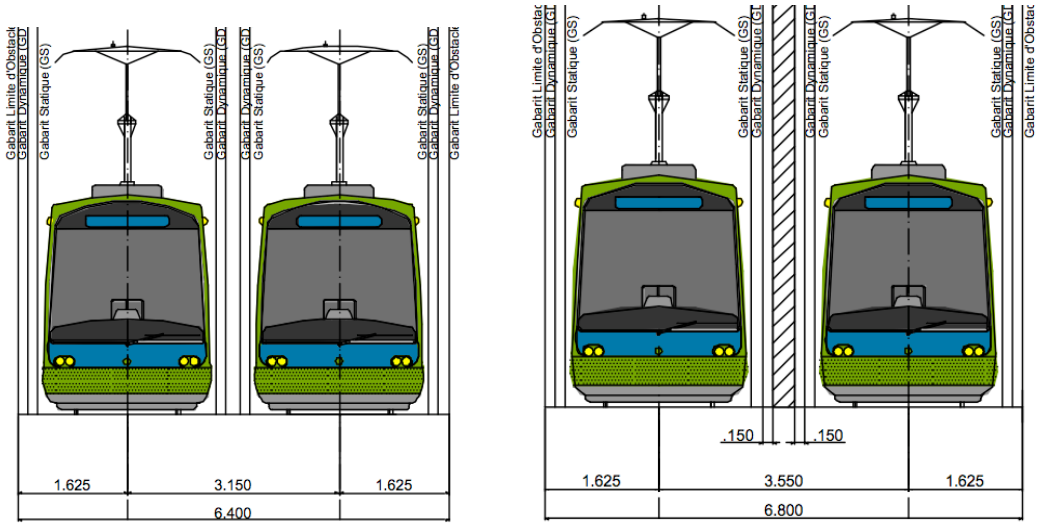


Figure 37: Emprise du tramway de largeur de 2,65 m
(Source : Egis Rail)

2.1.4.2. Accessibilité

Grâce aux rames à plancher bas, le tramway offre une très bonne accessibilité pour non seulement les PMR mais aussi tous ceux qui l'utilisent.

Voici, une coupe type de l'infrastructure au niveau d'un arrêt de tramway.

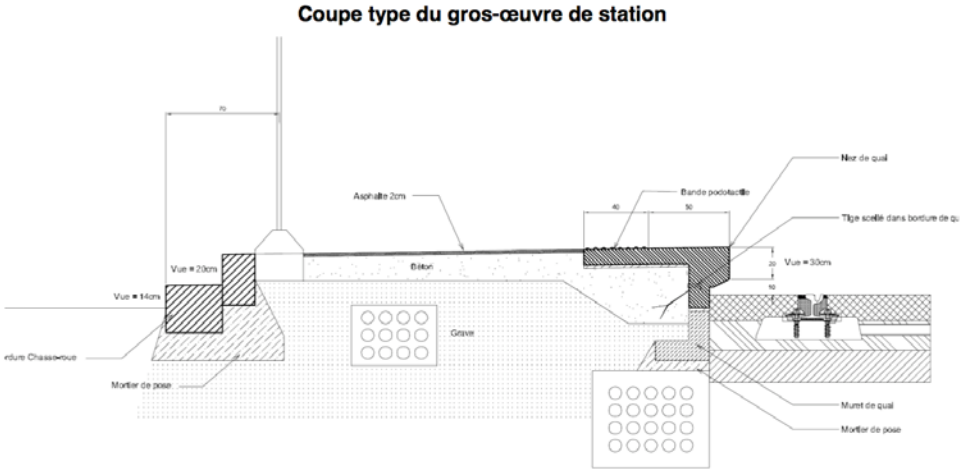


Figure 38: Coupe type du quai d'une station de tramway
(Source : RATP)

2.2. Tramway sur pneu : Translohr

Le tramway sur pneu actuellement exploité à Clermont-Ferrand est le Translohr développé par la Société Lohr-Industrie située en Alsace. Le Translohr dispose d'un guidage permanent physiquement relié à un rail central en forme de V.

2.2.1. Explication générale

Le tramway sur pneus avec un guidage central nommé Translohr est développé par la Société Lohr-Industrie située en Alsace, France. Lohr-Industrie Société spécialisée dans le transport routier de véhicule est, pour le segment du transport public, associée à Fiat-Ferroviaria. Le Translohr est une gamme de tramway sur pneus ayant un guidage permanent et homologué en tant que tramway en France.

La notion de système intermédiaire guidé sur pneus est apparue comme un moyen attrayant de combiner, pour les projets de moyenne importance, les qualités du domaine ferroviaire avec les avantages économiques du réseau routier, afin d'atteindre en quelque sorte un système sur rail à un coût minimum, « commercialement » parlant de 30% d'économie par rapport à un système sur rail classique comme le tramway.

Le premier prototype de ce système a été testé en 2001 sur le site du Trans Val-de-Marne au sud de Paris par la RATP. Clermont-Ferrand a été la première ville à implanter ce système avec des véhicules de 32 m à quatre modules en service régulier par l'opérateur SMTC à partir de 2006.

Le tramway sur pneu avec le dispositif de guidage a plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes que l'on traite dans cette recherche, parmi lesquels on peut noter:

- Des véhicules sur pneu de plus grande capacité que les autobus,
- Une largeur d'emprise réduite,
- Un accostage optimal dans les stations.

Le dispositif de guidage permet un gabarit limite d'obstacles (GLO) réduit. Cette propriété facilite l'insertion de ce système de transport en centre-ville historique avec des rues étroites ayant des contraintes et où l'espace est limité en admettant également au mieux les autres usages de la rue (parking, trottoirs, pistes cyclables, etc.) ou son embellissement. Par exemple, un véhicule guidé peut avoir une réduction d'emprise au sol de 15 à 20 % moindre que celle nécessaire aux autobus.

Lohr-Industrie propose actuellement plusieurs gammes de tramway sur pneu qui s'appellent Translohr STE (numéro) avec guidage permanent. Il y a trois, quatre, cinq ou six modules, soit des véhicules de 4 longueurs variant de 25 m à 46 m. Leur caisse est d'une largeur de 2,20 m la plus étroite parmi celle les tramways. Ces véhicules toujours guidés sont facilement accessibles avec un plancher bas à 25 cm (au-dessus du plan de roulement) et ont une traction électrique dont l'énergie nécessaire est fournie par captation aérienne ainsi que des batteries pour la circulation dans le dépôt-atelier.

2.2.2. Aspect technique

2.2.2.1. Les voies[30] du Translohr

La voie du Translohr est une voie routière ayant un rail central posé au milieu des chaussées, dont le dimensionnement de ces voies s'effectue selon la méthode rationnelle routière LCPC-SETRA. Les hypothèses et les modalités de mise œuvre de la méthode rationnelle routière sont décrites dans « le Guide technique Conception et dimensionnement des chaussées (LCPC-SETRA, décembre 1994) ». Conformément à ce guide, la méthode rationnelle routière est basée sur une démarche combinant les apports de la mécanique rationnelle et des éléments expérimentaux :

- les méthodes de la mécanique des milieux continus sont employées pour simuler numériquement la structure de chaussée et calculer les sollicitations créées dans les différentes couches de matériaux par une charge standard de référence, correspondant à l'essieu légal français,
- les éléments expérimentaux (les résultats d'essais en laboratoire) sur l'endommagement sous chargements répétés des matériaux de chaussées sont utilisés pour apprécier leur résistance vis-à-vis de la fatigue, en tenant compte d'un modèle de fatigue (modèle de Wöhler) et d'un principe d'additivité des dommages (principe de Miner) ; les enseignements résultant de l'observation du comportement de chaussées réelles interviennent enfin pour préciser le critère de vérification vis-à-vis des déformations permanentes du sol support et des couches non liées.

<u>Structure bitumineuse</u>

La partie de la chaussée bitumineuse est constituée de graves et d'enrobés à module élevé (EME) et construite en double voie avec la couche de roulement, de 4 cm d'épaisseur.

Les tronçons construits sont constitués par :

- Deux multitubulaires en béton bordant la plateforme, avec une chambre de tirage tous les 200 mètres environ,
- Deux bordures de granit, 25 x 30 cm, posées sur les multitubulaires et qui calent les bords des différentes couches d'enrobés,
- Calées entre les deux multitubulaires surmontées des bordures : une couche de Graves Non Traitée (GNT) sur 30 cm, compactée et deux couches d'enrobés à module élevé EME de 10 cm et de 9 cm, réalisées en grande largeur de 5,46 mètres (en alignement droit) et d'une couche de béton bitumineux de 7 cm de BBME (Béton Bitumineux à Module Élevé) réalisée aussi en grande largeur. La mise en œuvre en grande largeur permet l'utilisation d'engins de travaux de type routier (niveleur, finisseur et compacteur) qui garantit une meilleure mise en œuvre et compactage des matériaux,

[30] Dans cette partie, l'explication des types de voie de Translohr porte essentiellement sur les chaussées de Clermont-Ferrand où l'on exploite le premier Translohr.

- Lorsque cette plateforme est réalisée à - 4 cm environ du niveau fini, vient ensuite le terrassement dans l'emprise de la future poutre support du rail central de chaque voie qui est réalisé en sciant, rabotant et excavant la plateforme, sur une largeur de 40 cm environ et sur une profondeur de 60 cm. Sur la partie supérieure de la poutre est moulée une engravure (une entaille), en vue d'y poser le rail.
- Une fois aligné et soudé, le rail est suspendu et calé dans l'engravure supérieure, puis collé avec le corkelast de la Société EDILON. Le matériau corkelast a été testé à Louvain dans des conditions de gel et dégel pour un arrachement de 8 tonnes sur 1 ml il y a eu un déplacement de 20 mm.
- Le choix de la couche de roulement s'est orienté à la demande des architectes vers un enrobé clair (cailloux durs déjà utilisés sur la RN 88) et grenaillé. Les 4 couches de BBM, BBME, EME et EME sont anti-orniérantes selon la norme existante, la profondeur de l'ornière vérifiée étant de 5 % à 60 °C pour 3000 cycles. Le passage répété des essieux strictement au même endroit nécessite de la part des matériaux bitumineux un très haut niveau de performance vis-à-vis de l'orniérage, d'autant plus que des contraintes altimétriques sévères sont à respecter. Les tolérances de nivellement à la mise en œuvre de la couche de roulement sont + 25 mm et – 15 mm.
- Les zones d'arrêt ne sont pas traitées spécialement à Clermont-Ferrand. Or, c'est dans les zones de freinage et d'accélération que devraient apparaître les premiers désordres sur la couche de roulement (orniérage) comme le montrent déjà les lignes de TVR (Nancy et Caen), du CIVIS (Rouen, Las Vegas) ou simplement de trolleybus (Gand ou autres lignes).

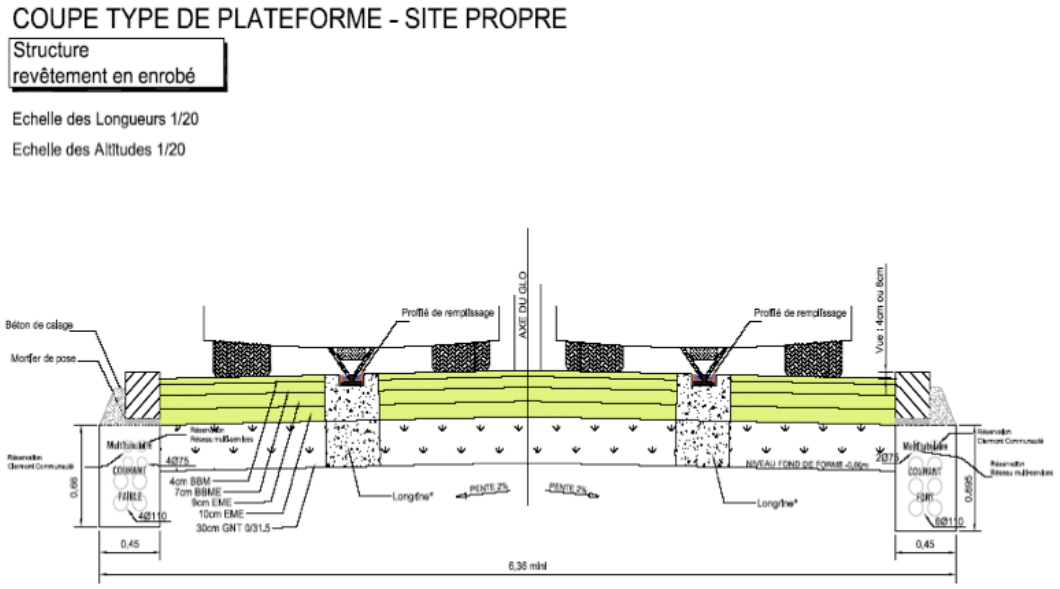


Figure 39: Coupe type de la structure de chaussée du Translohr
(Source : SMTC-AC et Lohr-Industrie)

Structure béton

A priori, il a été retenu deux types de pose :

- Béton bitumineux mise en œuvre sur une couche de grave non traitée compactée,
- Dalle béton coulée sur une couche de grave non traitée compactée.

La partie constituée de dalles en béton à Clermont-Ferrand est d'un linéaire de 2 800 mètres environ, située essentiellement en centre-ville. Le choix des concepteurs s'est arrêté sur des dalles goujonnées car une dalle en BAC[31] n'est pas réalisable dans ce contexte urbain où il y a trop d'interruption de chantier et de reprises de bétonnage.

La dalle a été calculée par la méthode des éléments finis avec les effets de bord. Des joints transversaux tous les 4 mètres comportent des goujons en acier lisse. Au niveau des carrefours, il est prévu des dalles de transition pour la circulation transversale. À la demande des architectes, la surface de la dalle présente une couche de roulement ayant un aspect grenaillé qui devrait engendrer sensiblement plus du bruit.

Chaussées préfabriquées (source : Lohr-Industrie)

Aujourd'hui, Lohr propose un autre type de voie, la chaussée préfabriquée. Cette chaussée est en béton armé et se présente sous forme de modules droits ou courbe de 6 m de long et de 30 cm d'épaisseur, reliés mécaniquement afin d'éviter tout mouvement de « piano » entre eux. Elle a plusieurs avantages selon Lohr-Industrie :

- réduction des temps de chantier en milieu urbain dense et contraint,
- réduction des nuisances sonores pour les riverains,
- confort de roulement optimisé et parfaitement maîtrisé,
- réouverture de la voirie à la circulation quelques heures seulement après la pose de la chaussée préfabriquée,
- durée de vie de la chaussée de 30 ans, haute résistance au trafic routier intense,
- pas de déviation nécessaire des réseaux traversants en raison de la faible épaisseur de la chaussée et de l'intervention ponctuelle en sous-œuvre toujours possible sans interruption du service commercial.
- large choix de finition (béton, béton coloré, gazon, gazon synthétique, pavé, enrobé, etc.).

[31] BAC : Béton Armé en Continu

Figure 40: La voie préfabriquée pour le Translohr
(Source : Lohr-Industrie)

2.2.2.2. Matériels roulants

En ce qui concerne le matériel roulant du Translohr, Lohr-Industrie propose 4 types en fonction de la longueur de véhicule de 25 m jusqu'au 46 m. En France, un seul type, STE 4 est exploité à Clermont-Ferrand à l'heure actuelle.

Translohr	Unité	STE 3	STE 4	STE 5	STE 6
Vitesse maximale	Km/h		70		
Électricité	V		750		
Largeur	m		2,20		
Hauteur sans pantographe	m		2,89		
Hauteur de plancher	m		0,25		
Rayon de giration	m		10,50 au rail		
GLO (Gabarit Limite d'Obstacle)	m		5,39		
Longueur	m	25	32	39	46
Nombre des modules		3	4	5	6
Nombre d'essieux		4	5	6	7
Portes (l :1,3 m x h :1,95 m)		2 x 3	2 x 4	2 x 5	2 x 6
Capacités	4 p/m^2	127	170	213	255
	6 p/m^2	178	238	298	358

Tableau 6: Caractéristiques principales du Translohr
(Source : Lohr-Industrie)

2.2.2.3. Capacité

Figure 41 montre les différentes capacités du Translohr qui est modulable de 3 caisses à 6 caisses.

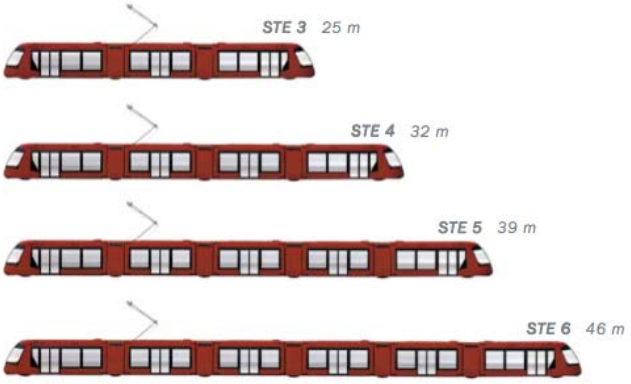


Figure 41: Différentes rames de Translohr
(Source : Lohr-Industrie)

2.2.2.4. Le guidage

Le système de guidage du Translohr, guidage en « V », assuré par 2 galets inclinés en forme de «V» à 45° et monté sur chaque essieu, est mécaniquement solidaire du rail installé dans la chaussée. Il garantit la précision de la trajectoire ainsi que l'accostage précis aux niveaux des stations. Les faces internes des galets sont recouvertes d'un bandage en composite qui évite le contact fer sur fer et contribue à optimiser le silence de roulement sans provoquer l'usure du rail et des crissements en courbe. Le dispositif de guidage ne transmet théoriquement aucune vibration au rail. Les charges sur le rail sont minimes (75 kg par galet) grâce à sa forme en « V » et l'ensemble des efforts verticaux et latéraux sont supportés par les pneumatiques et non par le guidage[32]. De plus, tous les essieux guidés assurent que le véhicule reste monotrace.

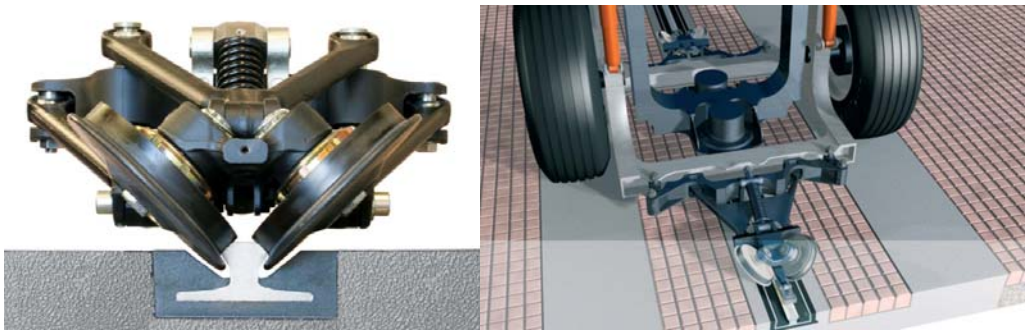


Figure 42: Guidage du Translohr
(Source : Lohr-Industrie)

[32] Source : Lohr-Industrie.

La sécurité est aussi garantie grâce au dispositif de dégagement des objets (DDO). Ce DDO est un dispositif de sécurité complémentaire au chasse-corps installé aux extrémités du véhicule et aux chasse-pierres installés sur chaque galet de guidage. Le DDO est monté directement sur les patins de retour de courant. Ce dispositif descend dans les lacunes de part et d'autre du rail. Il permet de sortir un objet présent dans la lacune du rail.

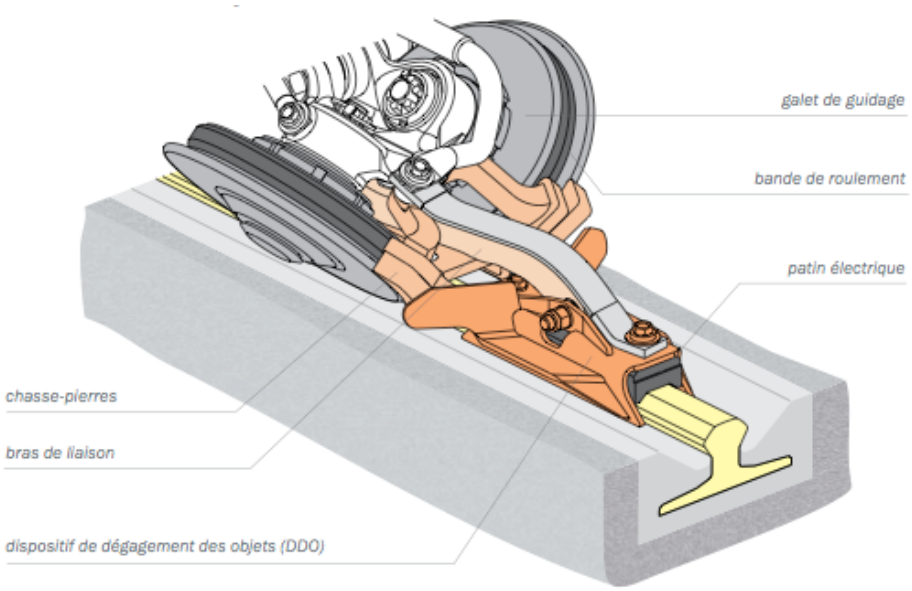


Figure 43: Détail du guidage du Translohr
(Source : Lohr-Industrie)

2.2.3. Aspect économique

D'après **Tableau 5**, le coût d'investissement du Translohr est de l'ordre de grandeur de 20 M€/km et le coût d'exploitation est équivalent à celui du tramway. En ce qui concerne le coût du matériel roulant, selon le contrat avec Lohr-Industrie et le SMTC (Syndicat Mixte de Transport à Clermont-Ferrand), le coût contractuel du MR Translohr était 2,8 M€ pour une rame de 32m de long (2003), montant équivalent à un tramway de 45 m à l'époque (cf. T3 à Paris coûte 2,5 M€/rame environ).

2.2.4. Aspect urbanistique

2.2.4.1. Emprise au sol

Grâce à sa motorisation et à l'adhérence du pneu, le Translohr franchit jusqu'à 13% de pente en charge. Le Translohr offre une facilité d'insertion unique grâce à son gabarit réduit : hauteur 2,89 m, largeur 2,20 m. Ainsi, le rayon de giration très court (10,5 m au rail, quelle que soit la longueur de la rame) permet une insertion particulièrement aisée dans les rues étroites imposant des courbes serrées. Cette performance évite également des procédures lourdes d'expropriation et d'acquisitions foncières et elle réduit l'emprise nécessaire pour le dimensionnement du dépôt.

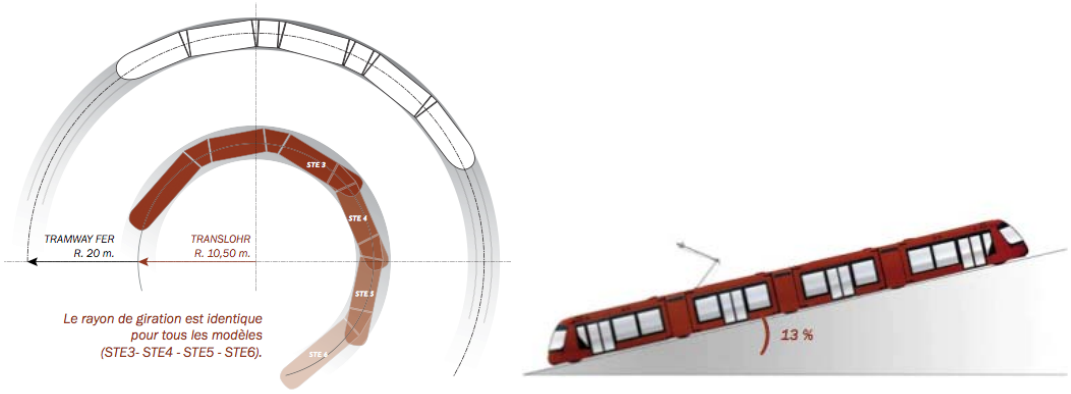


Figure 44: Rayon de giration et pente admissible du Translohr
(Source : Lohr-Industrie)

Figure 45 montre l'avantage de la faible emprise au sol (2,20 m. de largeur hors tout) qui peut optimiser l'espace disponible pour les autres modes (piste cyclable, trottoirs, voirie) pour réaliser un tel partage des voiries.

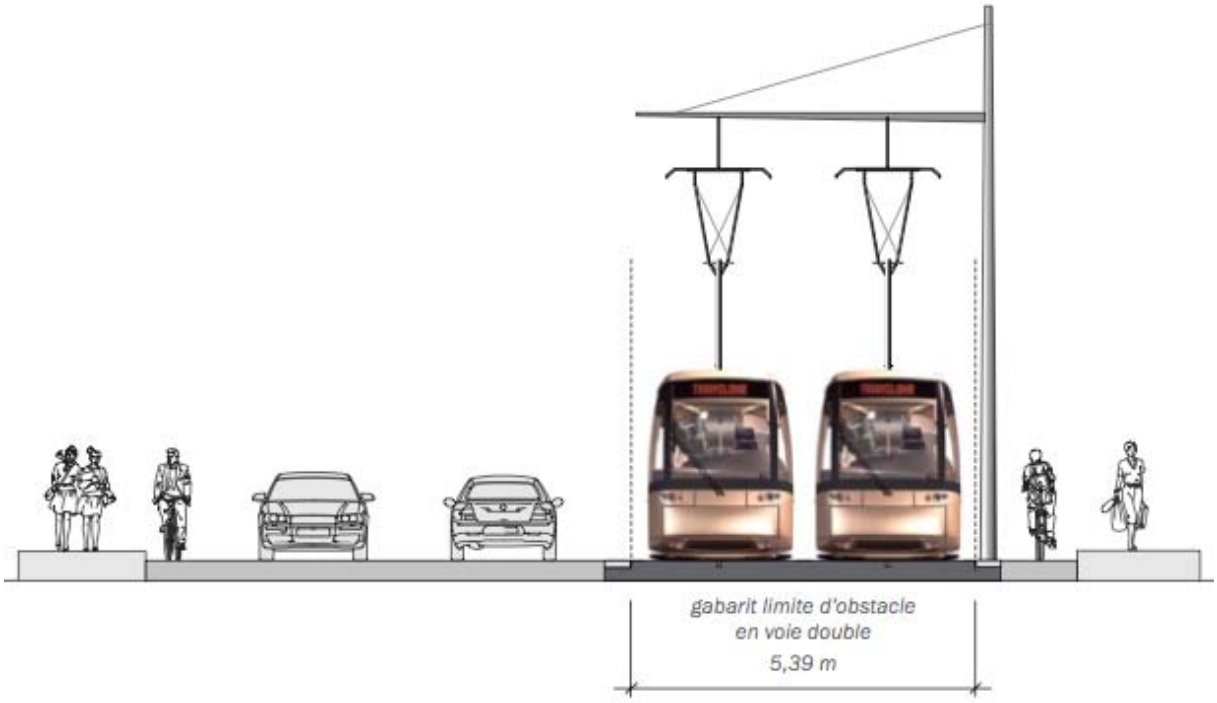


Figure 45: Emprise au sol du Translohr
(Source : Lohr-Industrie)

2.2.4.2. Accessibilité

Grâce au plancher bas intégral situé à 25 cm du sol, le Translohr permet un accès de plain-pied à une hauteur minimisée (quai-trottoir à 23 cm). L'impact visuel des stations aux plates-formes basses est moins agressif par rapport au quai élevé, ce qui permet une insertion « douce » en ville. De plus, ce « grand » niveau d'accessibilité facilite l'accès des PMR et des poucettes.

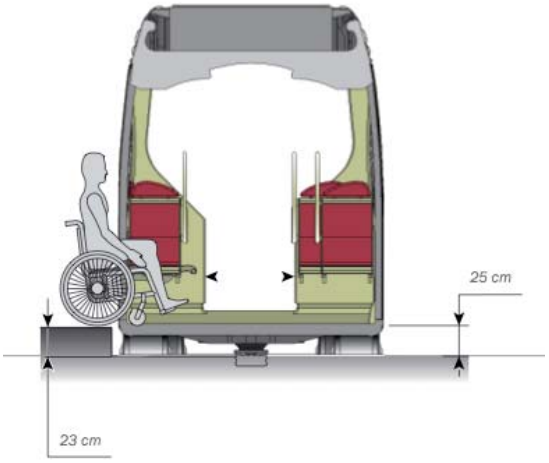


Figure 46: Accessibilité du Translohr pour PMR
(Source : Lohr-Industrie)

3. BHNS « Bus à Haut Niveau de Service »

Le BHNS est un TCSP caractérisé par un véhicule routier limité en France à 24,50 m de long et 2,55 m de large par le code de la route français. Par une approche globale (matériel roulant, infrastructure, exploitation), le BHNS assure un niveau de service supérieur aux lignes de bus conventionnelles ainsi pour la fréquence, la vitesse, la régularité, le confort et l'accessibilité, etc. Il s'approche du niveau de service des tramways aux normes françaises. Sous cette définition, le bus est considéré dans sa conception la plus large : il peut être guidé (guidage matériel ou immatériel) ou non guidé, à motorisation thermique, électrique ou hybride (Certu 2009).

3.1. TVR[33]

Le TVR est un véhicule routier dérivé du trolleybus, guidé sur tout ou partie de son trajet, à traction mixte, électrique et diesel.

3.1.1. Explication générale

Les origines du TVR remontent aux multiples expériences de guidage de véhicules routiers d'une part, et à la volonté de créer un système innovant, supposé économique et intermédiaire, entre le tramway et l'autobus d'autre part (Silhol and Jullien 1997).

Au début, un démonstrateur inconnu sorti de l'usine de La Brugeoise et Nivelles (BN) à Bruges, en Belgique, a fait sa démonstration sur une courte piste à l'ombre de l'Atomium à Bruxelles en 1985. Nommé le GLT (Guided Light Transit), c'était un véhicule sur pneus, de type autobus bi-articulé guidé par un rail central. Le GLT, n'était en fait, au départ, qu'un trolleybus guidé. Chaque véhicule pouvait être accouplé de manière à former un train d'un maximum de 3 unités, d'une longueur de 76 m avec une capacité de 600 passagers (6 p/m2). Chacun des 4 essieux pouvait être mis en mode guidé réduisant le rayon minimal jusqu'à 12,5 m. Il avait un pantographe sur le toit pour alimenter le moteur électrique et une paire de petites roues en ligne à double bride au point central de la partie inférieure du véhicule posée vers le bas sur un rail central par la force hydraulique permettant le retour de courant éventuel lors de l'exploitation avec un fil de contact aérien. Un moteur diesel auxiliaire est monté pour alimenter les moteurs électriques pendant l'exploitation en dehors de la voie de guidage.

Dans les années 1990, une plus longue section de piste d'essai a été construite sur le chemin de fer désaffecté d'une longueur de 4 km entre Jemelle et Rochefort dans les Ardennes belges, et deux prototypes très élaborés ont effectué des essais approfondis, y compris l'exploitation publique. Un troisième prototype a adopté le bogie et réalisé des essais comme un tramway à Bruxelles, mais ce véhicule à plancher haut a été rapidement rendu obsolète par l'arrivée des tramways à plancher bas (et plus tard les autobus) en même temps moins bruyant parce que le GLT faisait un bruit excessif causé par l'oscillation de la roue dans le rail central de guidage.

[33] TVR : le Transport sur Voie Réservée.

En 1989, le conglomérat canadien Bombardier Transports a acquis les Ateliers du Nord de la France (ANF-Industrie) et Brugeoise et Nivelles (Belgique). Cela a été l'occasion de développer davantage le GLT (Guided Light Transit) conçu dans les années 80, avec Spie-Enertrans. Bombardier a fait une campagne agressive en France pour vendre le système comme un mode intermédiaire entre le tramway et l'autobus. Bombardier était en mesure de satisfaire le désir de toutes les villes françaises d'avoir un « tramway à moitié prix », bien entendu avec les encouragements du gouvernement. Et c'est ce qui s'est passé pour la ville de Caen ensuite à Nancy. Le TVR a été choisi pour le projet de TCSP de Caen, et celui de Nancy qui allait remplacer le réseau trolleybus.

Grâce au choix de ce système par la Ville de Caen, le constructeur Bombardier a développé le GLT devenu le TVR, facilement accessible avec son plancher bas, bi-mode diesel-électrique, qui peut être guidé par le rail central ou autonome en tant que véhicule routier. Sous chaque essieu, il y a un bras sur lequel sont fixés deux galets verticaux situés devant et derrière l'essieu, qui suivent le rail central de guidage et orientent les roues. Le bras peut être abaissé ou relevé par le biais d'un vérin hydraulique. Pour positionner ces rouleaux verticaux sur le rail central, il est nécessaire de mettre le véhicule dans une zone transitoire qui dispose d'un dispositif en forme de V pour engager le guidage.

Comme mentionné ci-dessus, la première ville française à montrer un intérêt pour le GLT a été Caen qui, comme beaucoup d'autres villes, est trop petite (200 000 habitants) pour justifier pleinement le système de tramway de coût élevé. Ainsi, le GLT semblait une proposition plus réaliste à cette époque-là. Caen a finalement entrepris des études dans les années 80 et au milieu des années 90 a installé le GLT comme une solution privilégiée pour résoudre les problèmes de congestion dans la ville.

Toutefois, le premier des nouveaux véhicules à être mis en service n'a pas été à Caen, mais à Nancy. Nancy était déjà connue comme ayant été la seule ville en France ayant à l'époque moderne construit un système de trolleybus. Ce système, qui a été ouvert en 1982, était exploité par une flotte de Renault PER180H trolleybus articulés bi - modes avec un moteur Diesel. Il a desservi plusieurs banlieues importantes et un grand hôpital au sommet d'une colline escarpée. À la fin des années 1990, le PER180H arrivait prématurément en fin de vie et il y avait un besoin urgent de remplacement.

Nancy a souhaité apporter une solution de transport lourd pour les trajets importants, mais il a été rapidement estimé que le tramway classique aurait du mal à gravir les pentes dures de l'itinéraire prévu et même s'il le faisait, il ne serait pas en mesure de le faire sans générer d'importants niveaux de bruit et de nuisance pour les riverains[34]. De toute évidence, Nancy a souhaité garder ses installations électriques coûteuses mises en place pour les trolleybus, alors un mode de transport électrique était souhaitable. Le TVR semblait la solution idéale[35]. Ainsi Nancy a choisi le nom TVR pour promouvoir et commercialiser ce système comme un tramway.

Le système TVR à Nancy devait ouvrir ses portes en Décembre 2000. Cependant, après plusieurs déraillements dûs à des conditions de fonctionnement différentes, il a été retiré

[34] Nancy a oublié que la ligne de tramway n°14 fermée en 1952 a longtemps gravi des pentes raides pour atteindre le plateau de Brabois.

[35] Après cette décision, le TVR a été mis au point par Bombardier et testé sur un site expérimental, le Trans-Val-de-Marne, dans la banlieue sud de Paris en 1998.

du service de mars 2001 à mars 2002 pour que Bombardier puisse mettre à niveau les véhicules. Aujourd'hui, il est exploité sans trop de difficulté. A Nancy, le TVR actuellement exploité emprunte environ 60% de l'itinéraire avec un rail de guidage. Sur le reste du parcours, il fonctionne comme un trolleybus.

A Caen, le TVR a été mis en service en Novembre 2002, intégrant les modifications apportées aux véhicules de Nancy lors de la mise à niveau. Ils sont actuellement exploités par la Compagnie des Transports de l'Agglomération Caennaise sous le nom de Twisto.

3.1.2. Aspect technique

3.1.2.1. Les voies de TVR

Dans un premier temps, à la différence des voies de tramway, la voie retenue par le constructeur Bombardier pour le TVR était une voie routière similaire aux sites propres pour autobus. La spécificité résidait dans le placement du rail central sur une longrine en béton armé (emprise de 40 cm de largeur sur 60 cm de profondeur). Il était visé de réaliser une économie de l'ordre de 35 % par rapport à une voie de tramway, mais, ayant sous-estimé les efforts du guidage sur la voie, les frottements, crissements et vibrations par rapport à ce qui était prévu au départ, cette économie de coût sur l'infrastructure a disparu rapidement.

Pour la réalisation du TVR pour les projets des villes de Nancy et de Caen, il existe 3 types de voies pour le mode guidé :

- Piste en béton en trois files pour les roulements et le guidage,
- Dalle construite en béton armé continu sur une couche de fondation,
- Dalle constituée par une structure de béton bitumineux sur une couche de fondation.

Chacun des types de voie a été choisi par le maître d'œuvre selon les conditions locales. Nous nous intéressons ici aux 2 principaux types de voies.

Mesure des structures de voie

L'hypothèse de charge des véhicules pour la conception des structures de chaussées du TVR de Bombardier est la suivante (en mode guidé, les essieux sont allégés par la force d'appui de l'équipement de guidage) :

Charge sur l'essieu	Nombre des passagers	Charge total (kg)	Essieu 1	Essieu 2	Essieu 3	Essieu 4
Vide	0	26 000	5 531	5 758	6 032	7 680
Avec sièges	37	27 405	6 084	6 104	6 771	6 447
2p/m^2	84	30 456	6 236	7 342	8 119	8 759
4p/m^2	131	33 508	6 389	8 579	9 468	9 071
6p/m^2	178	36 559	6 541	9 817	10 817	9 383
8p/m^2	200	37 993	6 613	10 398	11 451	9 530

Tableau 7: Hypothèse de charge sur les essieux du TVR
(Source: Bombardier)

Avec cette hypothèse de charge, de même que pour le Translohr de Clermont-Ferrand, l'épaisseur de la sous-couche et de la couche de béton bitumineux pour le TVR de Caen sont définis ci-après.

Bombardier a indiqué que la structure de Caen est une voie constituée d'une couche de béton bitumineux posée sur une couche de fondation, dans les conditions suivantes:

- Géotextile sur une surface d'un sol aux caractéristiques PF2,
- Couche de GNT[36] de 0,10 m,
- Couche de grave - bitume à haut module de performances GBHPR[37] de 0,12 m,
- Couche de grave - bitume à haut module GBHPR en béton de 0,12 m,
- Couche de roulement de 0,06 m d'épaisseur de béton bitumineux BBAO[38].

[36] GNT : grave non traitée.
[37] GBHPR : Grave Bitume Haute Performance.
[38] BBAO : Béton Bitumineux Anti Ornières.

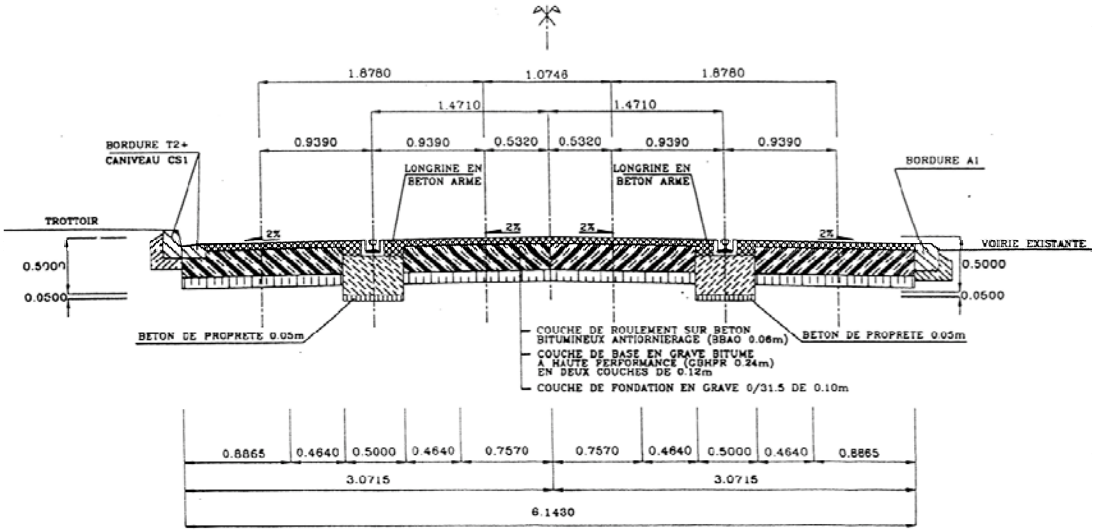


Figure 47: Coupe type du TVR de Caen
(Source : l'AOT de Caen)

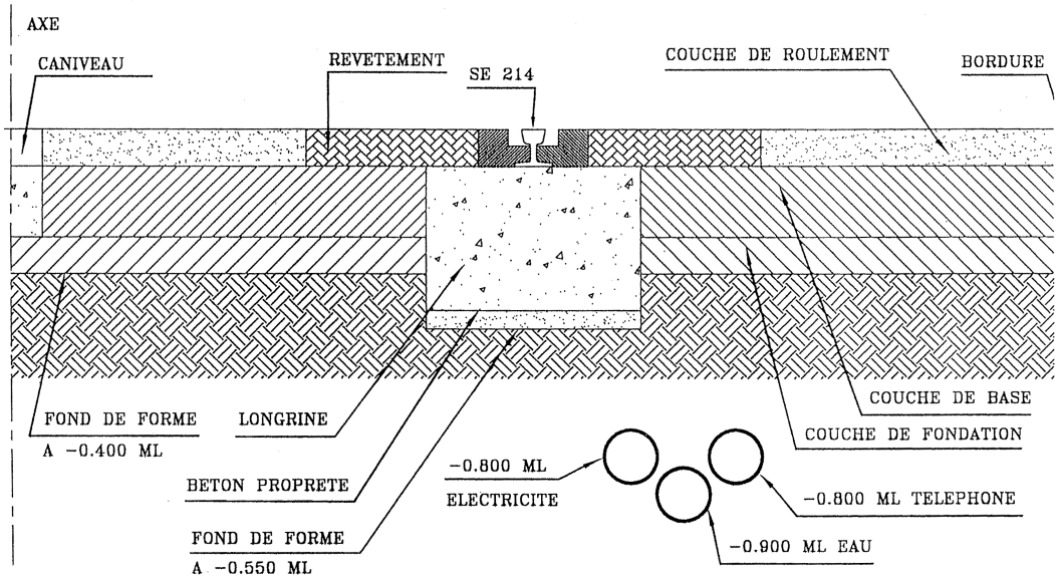


Figure 48: Coupe de la structure de chaussée du TVR de Caen
(Source : l'AOT de Caen)

3.1.2.2. Matériels roulants

Le véhicule TVR n'est pas tout à fait un trolleybus mais un « super » trolleybus puisqu'il est alimenté électriquement par les lignes aériennes et il est monotrace[39] grâce à son guidage par le rail central unique. Le matériel roulant du TVR comprend trois caisses articulées, avec une longueur totale de 24,5 m. Il peut rouler jusqu'à 70 km/h et monter 13 % de pente. Le roulement sur pneu permet des performances en accélération, freinage, possibilités en rampes supérieures à celles du tramway. Ainsi, il est possible de l'insérer dans une courbe de rayon réduit à 12 m.

Le véhicule TVR est plus court que la plupart des tramways modernes, mais assez long par rapport à l'autobus standard et articulé. Il est conçu au départ pour ressembler beaucoup au tramway, même s'il peut fonctionner en mode autobus et qu'il a des rétroviseurs comme un autobus. De plus, grâce à son guidage réversible il peut circuler sur un site propre limité, au moins en première étape, aux troncs communs ou aux sections les plus intéressantes, les véhicules effectuant le reste du parcours en mode manuel comme un autobus. De la même manière, il est possible, à tout moment, sur un site propre équipé, de reprendre le mode manuel pour éviter un obstacle. Contrairement au tramway et au véhicule Translohr, ce véhicule TVR est équipé d'un volant de direction, ce dernier n'étant pas utilisé lors de la conduite en mode guidé.

D'ailleurs, l'accostage aux quais est facile et précis, facilitant ainsi l'accès pour tous.

	Unité	TVR
Vitesse Max.	Km/h	70
Alimentation électrique	V	750 V CC
Largeur	m	2.5
hauteur exceptée de pantographe	m	3.22
Hauteur de plancher	mm	350
Rayon de giration	m	12
GLO	m	
Longueur	m	24,5
Nombre de modules		3
Nombre d'essieux		4
Portes (l :1,3 m x h :1,95 m)		4
Capacités	Places assises	37
	Total : 4 p/m^2	131
	Total : 6 p/m^2	178

Tableau 8: Caractéristiques principales du TVR
(Source: Bombardier)

[39] On a pu contester le caractère monotrace du TVR en raison de ses nombreux déraillements en courbe lors de la mise en service à Nancy.

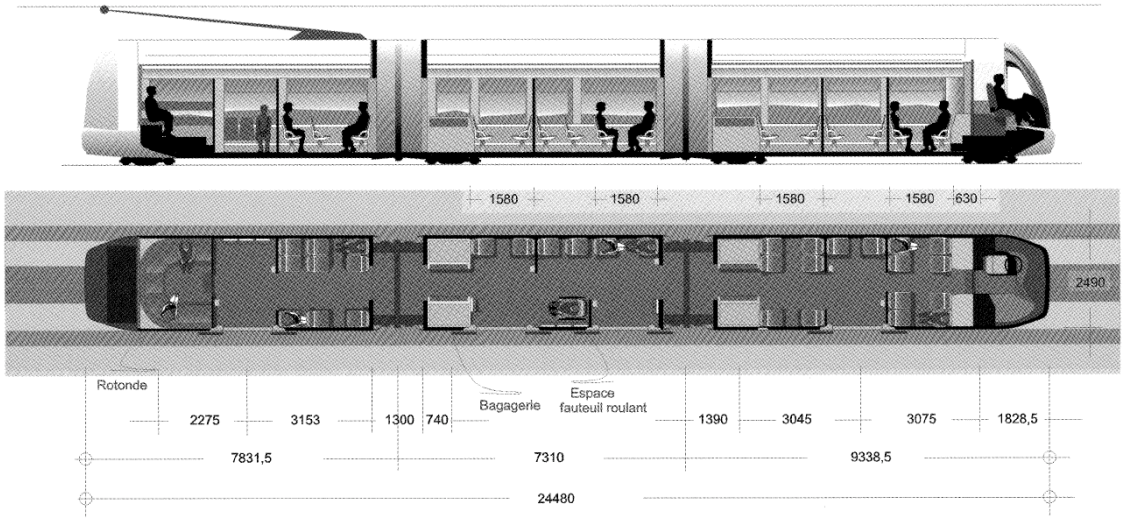


Figure 49: Diagramme du TVR
(Source : Bombardier)

3.1.2.3. Guidage

Le guidage du TVR est un guidage mécanique assuré par chaque essieu doté de deux galets à double bourrelet reposant sur un rail central. Ces galets imposent au trapèze de direction la force nécessaire pour faire braquer les roues. Un coussin pneumatique assure une pression de 750 kg sur le galet ensuite sur le rail, ce qui engendre plusieurs conséquences désagréables, notamment le bruit et l'usure des galets et du rail. Des détecteurs vérifient en permanence le bon fonctionnement du système de guidage. Le passage du mode manuel au mode guidé se fait à la hauteur d'une zone de « droppage » qui canalise les galets sur le rail central. Le relèvement des galets pour repasser au mode manuel peut se faire à tout moment, au moyen de vérins hydrauliques. Le rail étant encastré dans la voie, un passage mixte sur le site propre est possible pour les piétons et pour les automobilistes au niveau du carrefour.

La forte pression exercée sur le rail par les galets produit une diminution du poids du TVR (2250 kg) sur les pneumatiques, ce qui peut avoir une influence négative sur la motricité en cas de mauvaise adhérence (chaussée mouillée par exemple). Mais à l'inverse, cette pression est insuffisante pour garantir contre l'échappement du premier galet si un virage est abordé trop vite. Suite à plusieurs déraillements, la vitesse en courbe a dû être limitée au pas.

Un objet inséré dans la goulotte du rail, tel un boulon, un caillou, entraîne un déraillement des guides. La roue avant du guide montant sur l'objet, même s'il est écrasé. Les détritus, cailloux, boulons… sont un problème majeur des systèmes guidés à rail unique TVR mais aussi des sections partagées avec les piétons, les voitures de service.

La caractéristique principale du TVR est qu'il peut quitter son rail de guidage pour se comporter comme un bus (ou un trolleybus). Ces opérations, appelées dédropages, peuvent se faire à n'importe quel endroit : il suffit de relever les galets pour libérer le TVR de sa contrainte. L'inverse n'est pas pour autant vrai, puisqu'il faut une zone

particulière équipée d'un entonnoir de centrage des galets pour effectuer l'opération inverse.

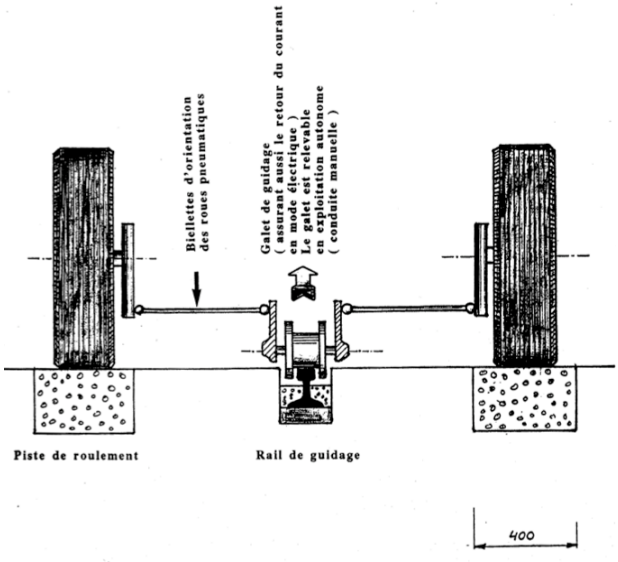


Figure 50: Principe du guidage du TVR
(Source : Silhol and Jullien 1997)

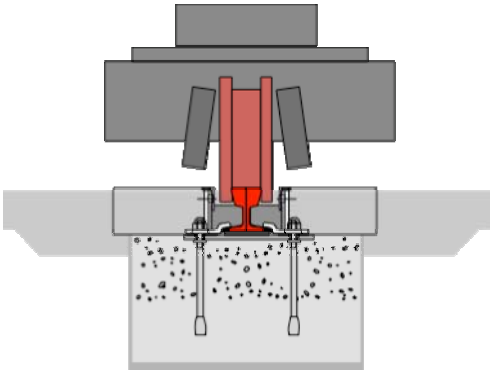


Figure 51: Schéma simplifié du système de guidage du TVR
(Source : Systra)

Figure 52: Rail de guidage du TVR
(Source : auteur)

3.1.2.4. Traction électrique

L'équipement de la traction électrique du TVR est composé de deux chaînes de traction 750 V CC en parallèle alimentant chacune un moteur électrique de 180 kW de puissance. Les essieux 2 et 4 sont ainsi motorisés. En mode autonome, le courant est produit par un groupe diesel électrique embarqué à l'arrière du véhicule.

3.1.3. Aspect économique

D'après les promoteurs du système, y compris le Bombardier, à l'époque de la mise en service du TVR, il était censé apporter :

- Un coût inférieur à celui du tramway classique :
  - Gain sur l'infrastructure 30 à 40 % parce que :
    - la déviation des réseaux souterrains n'est pas nécessaire (mais Nancy a fait le choix de les dévier),
    - le site propre réduit en alignement droit à 6,10 m de large du fait du guidage au lieu de 7 m pour un bus,
  - Gain sur les véhicules 30 %.

Mais ces promesses n'ont pas été tenues dès la première mise en service du TVR à Nancy et notamment les premiers problèmes sont apparus lors de l'inauguration.

3.1.4. Aspect urbanistique

3.1.4.1. Emprise au sol

Tous les essieux sont munis de roues orientables suivant un mécanisme mécanique de braquage progressif qui supprime également en grande partie le phénomène de balayage arrière du véhicule. Avec des rayons de courbe de 12 m, alors que les tramways classiques ne peuvent prendre que des courbes entre 15 à 20 m de rayon minimum en fonction de l'écartement des rails et des véhicules, tant en mode manuel que guidé, l'insertion urbaine est plus aisée. De plus pour de telles courbes, le gain d'emprise au sol par rapport à un autobus standard est de l'ordre de 150 cm.

Véhicule	Rayon extérieur (cm)	Rayon intérieur (cm)	Emprise au sol (cm)	Écart d'emprise au sol par rapport au autobus standard (cm)
Autobus standard	1 126	474	652	0
Autobus articulé	1 200	531	669	17
Trolleybus standard	1 145	567	578	-74
Trolleybus articulé	1 200	531	669	17
TVR 3 caisses	1 200	765	435	-217

Tableau 9: Caractéristiques géométriques des véhicules
(Source : constructeurs)

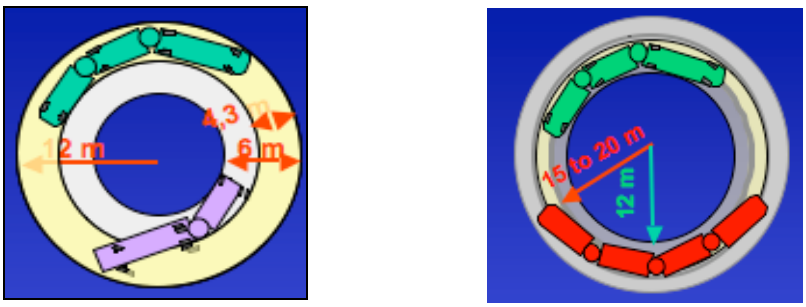


Figure 53: Comparaison des rayons de giration de l'autobus articulé et du tramway sur pneu
(Source: STRV, STMAC, Autorité Organisatrice du Transport de Caen)

3.1.4.2. Accessibilité

Le TVR a un plancher bas sur 100% de sa longueur, muni de larges portes pour chaque caisse, il permet un embarquement et débarquement aisé pour les utilisateurs.

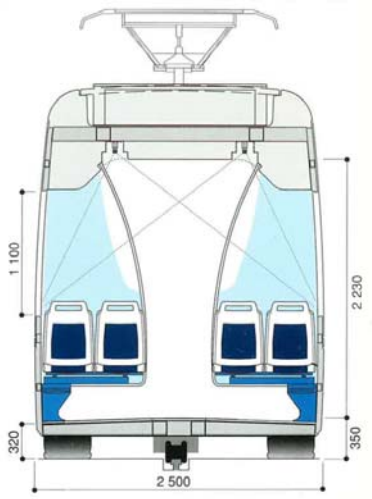


Figure 54: Coupe et dimension du TVR
(Source : Bombardier)

3.2. Autobus avec guidage optique : « CIVIS »

3.2.1. Explication générale

Le système de transport Civis à guidage optique débrayable, initialement développé par une collaboration entre Matra Transport International et Renault Véhicule Industriel (devenu Irisbus) a commencé au milieu des années 90. Matra a développé le concept du Civis sauf le véhicule : l'ingénierie générale du système, les principes du guidage et l'insertion, la réalisation de la voie, les équipements fixes d'alimentation électrique et la fourniture des équipements fixes et embarqués du SAE. Renault était le fournisseur d'un véhicule routier à transmission électrique qu'on a utilisé pour finaliser le projet Civis. Ce dernier résulte du programme de recherche et développement entrepris depuis 1994 par RVI sur le bus « à plancher bas et plat sur toute la longueur ». Ce programme comprend deux projets : le trolleybus et l'autobus diesel-électrique (Certu 2000).

Le Civis est conçu à partir d'une technologie routière et adopte les principaux objectifs suivants :

- Moindre coût d'investissement par rapport au tramway,
- Un nouveau principe de guidage bimodal,
- Une très bonne accessibilité en station grâce au guidage et à un plancher bas et plat sur toute la longueur,
- Un véhicule propre avec 30 ans de durée de vie, grâce à une traction électrique.

Aujourd'hui, Civis commence à élargir son territoire (ligne de Las Vegas, de Castellon en Espagne, et projet de Nîmes, etc) grâce au véritable succès rencontré à Rouen.

3.2.2. Aspect technique

3.2.2.1. Matériels roulants

Le type de matériel roulant du système de Civis correspondait initialement à des autobus standard ou articulé d'Irisbus et à l'heure actuelle, le guidage optique est opérationnel avec 2 types de véhicules : Agora/Citelis et Civis/Cristalis. Cependant depuis quelques temps, tous les types d'autobus de constructeurs différents peuvent être utilisés par ce système.

3.2.2.2. Guidage optique

Civis possède un guidage optique réalisé à partir d'une caméra et d'un traitement d'images. Cette caméra, fixée à bord du véhicule, permet, d'une part la détection de tout écart entre la trajectoire du véhicule et celle optimale matérialisée par un double trait de peinture au sol, et d'autre part, la correction de cet écart, en intervenant mécaniquement sur la colonne de direction du véhicule, sans intervention du conducteur. Le conducteur peut reprendre à tout moment un guidage manuel par simple action sur le volant de direction. Il prend en charge les fonctions d'accélération et de freinage, selon le même

principe de la conduite à vue du tramway (Certu 2000). Au début, Civis a souhaité être homologué en tant que mode de transport guidé comme le tramway, cependant, étant donné un problème lié au marquage par pointillé au sol, il n'est homologué que pour l'utilisation au niveau des arrêts à vitesse réduite en tant qu'une aide à la conduite et à l'accostage.

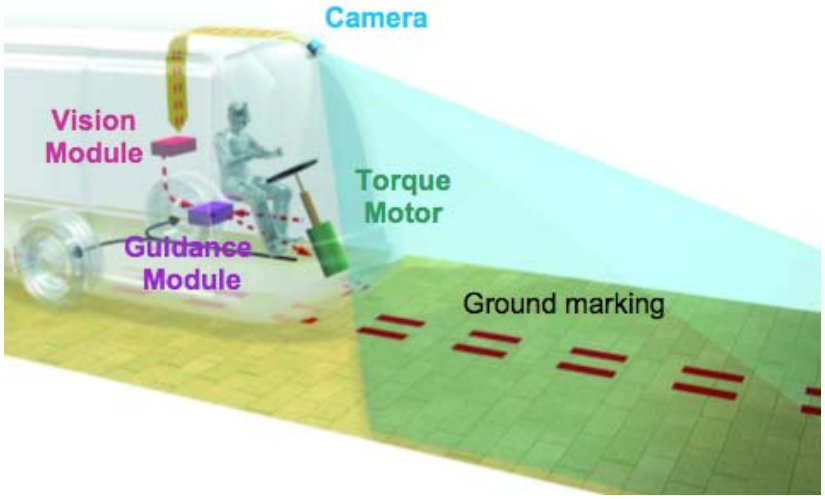


Figure 55: Schéma du guidage optique du CIVIS
(Source : Siemens)

Le guidage optique permet au véhicule de suivre automatiquement la trajectoire indiquée par le marquage au sol en agissant sur la direction du véhicule, tandis que le conducteur ne garde que le contrôle de l'accélération et du freinage, et évidemment continue à surveiller l'environnement pour empêcher des incidents éventuels.

Ce marquage est filmé par une caméra vidéo située à l'avant du véhicule. Les données provenant de la caméra sont ensuite analysées pour calculer la différence entre la trajectoire réelle et la trajectoire de référence. Un servomécanisme comprenant un moteur à couple actionne la colonne de direction pour annuler cette différence.

Selon le constructeur du guidage optique, Siemens, les avantages de ce système sont les suivant :

- Le guidage optique réalise, dans un arrêt, une accessibilité optimisée grâce au positionnement transversal très précis et répétable du véhicule au niveau du quai. Il facilite donc l'accès aux personnes à mobilité réduite, les personnes avec des poussettes, et de manière générale, tous les passagers. La précision d'accostage latéral réduit l'écart vertical à environ zéro. De plus, il est possible d'éviter toute collision entre le véhicule et le quai, qui pourrait se produire lors de la conduite manuelle en raison du fait que le véhicule s'approche très près du quai. Le débarquement des passagers et le temps d'embarquement à la station se trouvent ainsi réduits, ce qui améliore la vitesse commerciale.
- Le guidage optique optimise le confort latéral : son action sur le volant de direction intègre directement les caractéristiques d'itinéraire qui sont destinées à

améliorer le confort (courbes et clothoïdes , etc.). Le mouvement de véhicules perçu par les voyageurs est considérablement atténué au cours de la trajectoire entièrement guidée, en particulier dans les courbes et lors de l'approche délicate et au moment du départ de la station.

- Le guidage optique améliore la sécurité par rapport à la conduite manuelle, ainsi la probabilité de débordement au-delà de l'emprise de la voie (ou GLO) est moindre.
- Le guidage optique considéré comme un système novateur participe à améliorer l'image de ce véhicule d'un système de transport public.
- Le guidage optique réduit la charge de travail des conducteurs, en particulier au niveau de la station.
- Le guidage optique permet la mise en œuvre d'un système de transport performant, tout en gardant la souplesse à tout moment.

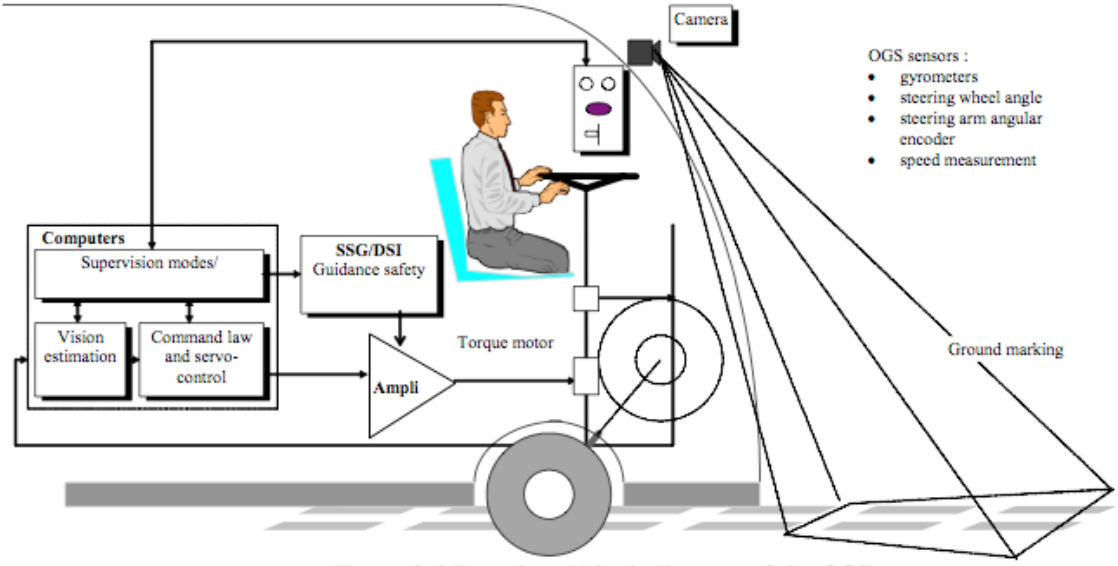


Figure 56: Fonctionnement schématique du guidage optique
(Source: Siemens)

Le modèle de vision et d'estimation analyse l'image enregistrée par la caméra située à l'avant du véhicule. Il identifie le marquage au sol, calcule les données de la géométrie de la voie (rayon de courbure, la section droite, etc.) et mesure la position latérale et l'orientation du véhicule par rapport à la trajectoire marquée. Pour cette opération, il complète les données de l'analyse d'image avec la vitesse de lacet du véhicule, mesurée par un gyromètre, et la vitesse fournie par le véhicule. Toutes les données sont envoyées au module d'orientation.

Le véhicule fournit au système de guidage les données dont il a besoin pour contrôler la trajectoire : vitesse, comportement de conducteur, mode de fonctionnement, etc.

Les caractéristiques liées au véhicule sont prises en compte sous la forme de paramètres stockés dans le système de guidage. Un module de l'évolution du véhicule est intégré dans le module d'estimation.

Le module de guidage décide ou non de mettre en œuvre la commande de direction et élabore les instructions pour le couple moteur en utilisant les données cinématiques du véhicule porteur et le module d'estimation. Le module de comportement dynamique du véhicule est utilisé pour calculer cette instruction.

Le module de guidage prend en compte les actions du conducteur sur le système de direction et, en particulier, détecte la décision du conducteur pour prendre le contrôle. Ensuite, il commande le couple moteur agissant sur le système de direction du véhicule lorsque le conducteur n'a pas pris le contrôle. Ce moteur peut être remplacé à tout moment par le conducteur du véhicule, si nécessaire.

Les capteurs (capteur d'angle du volant, gyromètre, capteur d'angle de direction, etc.) fournissent des données au système de guidage. Les données sur l'état du système peuvent également être envoyées pour le conducteur à travers le volant en utilisant la vibration.

Le système de sécurité rassemble toutes les dispositions soit « hardware » soit « software » destinées à assurer la sécurité de guidage.

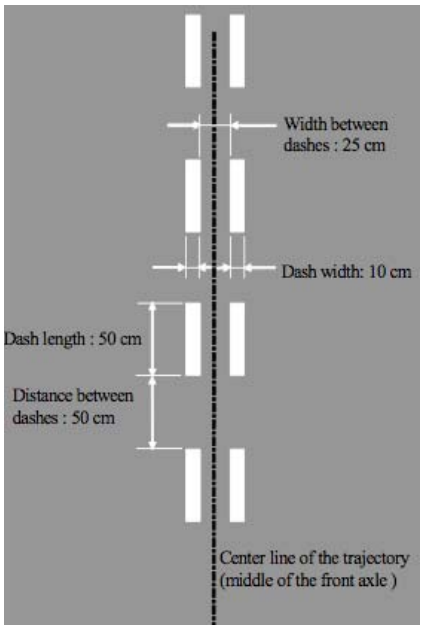


Figure 57: Plan schématique du marquage au sol du CIVIS
(Source: Siemens)

3.2.3. Aspect économique

Le coût d'investissement du CIVIS est considéré comme celui de l'autobus en site propre auquel on ajoute l'équipement de guidage optique sur le matériel roulant et sur l'infrastructure, de l'ordre de grandeur de 8 M€ par kilomètre de ligne selon Systra. En

ce qui concerne le coût d'exploitation, il se situe entre celui de l'autobus en site propre et celui du trolleybus. Le matériel roulant coûte environ 0,6 M€ par véhicule.

3.2.4. Aspect urbanistique

3.2.4.1. Emprise au sol

Règlementairement, le Civis satisfait au code de la route pour pouvoir circuler sur une voie banalisée et un site propre. La longueur varie entre 12 et 24,5 m selon le modèle mais le modèle le plus utilisé est de 18 m type bus articulé. La largeur de caisse est de 2,55 m et la hauteur est 3,10 m.

Le rayon de giration minimum (rayon extérieur) est de 12 m comme celui du TVR et du bus articulé. Cependant, ce rayon minimum de 12 m n'est pas compatible avec la présence de bordures de sécurité. Dans ce cas, le rayon de giration est de 60 m.

Par ailleurs, le guidage optique est réalisable à partir de courbes de plus de 25 m de rayon, y compris en cas de courbe et contre courbe successives.

La pente du profil en long de la voie peut atteindre 13 % comme pour le TVR. Il est important de noter que cette pente est limitée, comme pour les autres systèmes guidés sur pneus, pour le confort des usagers.

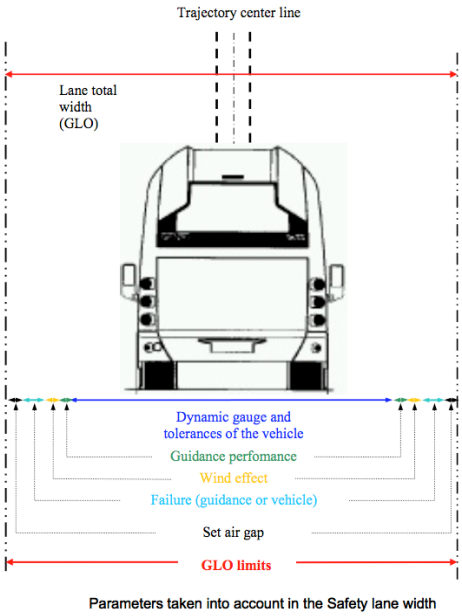


Figure 58: Gabarit Limite d'Obstacle du CIVIS
(Source: Siemens)

En voie unique, l'emprise au sol de Civis est de 3,10 m y compris 2 x 20 cm de bordures. En voie double avec supports de caténaires latéraux et en mode guidé, l'emprise minimale est de 6,20 m (en alignement droit), contre 7,0 m pour un bus en site propre. En courbe la plus serrée, cette emprise s'inscrit avec une largeur de balayage et devient alors 6,60 m.

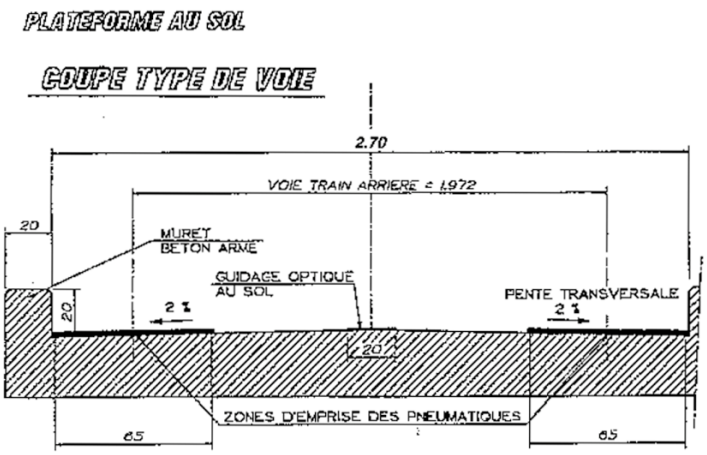


Figure 59: Coupe type de voie du CIVIS
(Source: Siemens)

3.2.4.2. Accessibilité

Le schéma suivant est une comparaison de la lacune entre le véhicule et le quai pour les bus traditionnels, véhicules équipés d'un système de guidage et les tramways. Notez que pour le bus traditionnel, la réduction de la lacune horizontale en augmentant la hauteur de quai est préjudiciable pour l'écart horizontal. Cependant, bien que le véhicule et le quai se rapprochent d'un point de vue vertical, le pilote doit se maintenir à l'écart du quai à l'approche de la station par souci de ne pas toucher le quai.

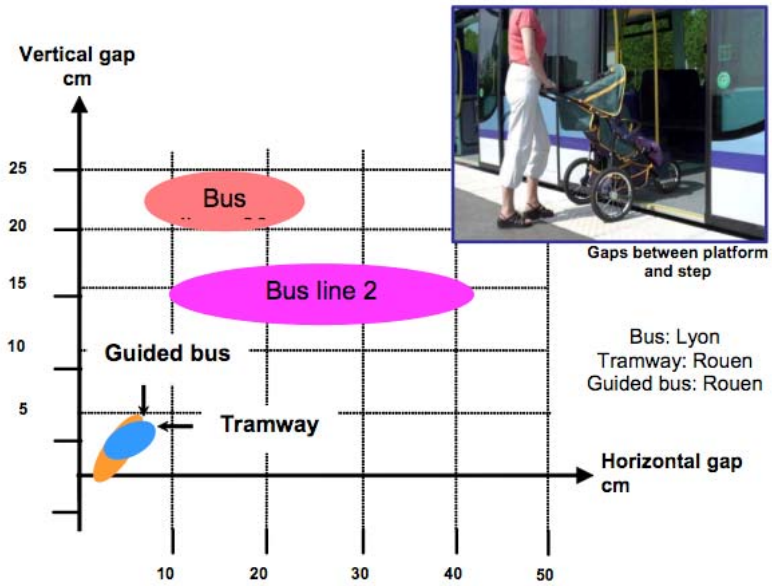


Figure 60: Comparaison des lacunes au droit du quai des stations selon les différents systèmes de transport (source : Siemens)

3.3. Autobus avec guidage magnétique : « PHILEAS »

3.3.1. Explication générale

Le véhicule Phileas est un bus articulé guidé conçu par l'APTS[40] à Eindhoven aux Pays-Bas. Le projet de système de Phileas d'Eindhoven a commencé en 1999 et a duré jusqu'en 2004. La première génération des véhicules Phileas est une série de véhicule hybride avec un moteur GPL et une batterie NiMH sans transmission mécanique directe entre le moteur et les roues. L'énergie électrique est générée par un moteur GPL qui entraîne un générateur. Toutes les roues (à l'exception de l'essieu avant) sont entraînées séparément par des moteurs électriques ce qui permet d'accélérer plus vite. En plus, grâce à la batterie embarquée, un gain de puissance de la batterie est disponible pendant l'accélération. Lors du freinage, les moteurs de roue fonctionnent comme des générateurs. L'énergie récupérée par le freinage est utilisée pour recharger la batterie. Dans des conditions normales, le véhicule fonctionne comme un hybride alimenté par le moteur GPL ou la batterie.

Le châssis est réalisé en matériaux composites, plastique renforcé et fibre de verre, ce qui permet de diminuer le poids de véhicule sans diminuer la rigidité. Le système de guidage magnétique est basé sur des aimants permanents installés dans la chaussée. En outre, il existe un système utilisant les ultrasons à l'arrêt pour assurer la détermination de la distance, qui permet aux véhicules de se positionner exactement dans la direction diagonale. Récemment, pour réduire le poids et les coûts des véhicules, APTS a développé un nouveau système de propulsion hybride parallèle pour le Phileas de deuxième génération.

Le véhicule Phileas peut être exploité en trois modes:

- Mode manuel : comme un bus,
- Mode semi-automatique : la stabilité de la trajectoire est effectuée par le système automatique de direction magnétique et le conducteur est seul responsable de l'accélération et du freinage. De plus en mode semi-automatique, la vitesse dans les courbes est limitée et le véhicule ralentit automatiquement au niveau des arrêts, afin d'assurer un positionnement précis,
- Mode automatique : le réglage de la vitesse est également repris entièrement par un système automatique. Néanmoins, le conducteur a toujours la possibilité de prendre à nouveau le contrôle du véhicule, si nécessaire.

Le véhicule Phileas exploité à Eindhoven a une homologation pour circuler en temps que véhicule routier selon les directives applicables M3 CE catégorie (catégorie I) et la réglementation spéciale concernant les véhicules routiers de transports publics à courte distance aux Pays-Bas.

Par contre, en France, dans la ville de Douai, le Phileas nommé Évéole n'est pas encore homologué comme tramway, donc, actuellement il circule en mode manuel comme un bus conformément au Code de la Route.

[40] APTS : Advanced Public Transport System bv.

3.3.2. Aspect technique

3.3.2.1. Infrastructure pour Phileas

Les exigences minimales pour les infrastructures Phileas sont les suivantes:

- Voies réservées aux autobus autant que possible, avec une vitesse à moins de 50 km/h,
- Un minimum de courbes, ou courbes avec une vitesse inférieures à 50 km/h,
- Une distance moyenne entre les arrêts d'au moins 500 mètres,
- Priorité totale aux carrefours autant que possible, contrôlée par feux de signalisation ou des barrières,
- Les quais des stations ont une hauteur de 30 cm selon les spécifications APTS;
- Des aimants noyés dans le revêtement de la chaussée en vue du guidage et de la précision d'accostage sur toute la longueur de la ligne,
- Chaussées en béton pour éviter la déformation et l'orniérage de la couche de roulement.

Les exigences numéro 1 à 4 s'appliquent également aux systèmes de transport classiques tel que le BRT[41], BHNS. Les exigences numéro 5 à 7 sont spécifiques à Phileas. APTS a également des exigences plus détaillées pour la largeur des voies minimum, l'alignement vertical des voies du Phileas, les matériaux de construction, le dimensionnement de trafic pour l'épaisseur des chaussées, les portes du véhicule, la grille magnétique et les quais des stations du Phileas. Les rails de guidage et les lignes aériennes pour l'énergie électrique n'étant pas nécessaires, les investissements nécessaires pour les infrastructures sont relativement faibles par rapport à ceux du tramway classique.

Les véhicules Phileas étant des véhicules à plancher bas, une attention particulière est nécessaire pour la planéité des routes, car la garde au sol de 0,18 m est relativement faible, sous le châssis des véhicules. Cette faible hauteur permet un embarquement à niveau aux quais de faible hauteur des stations. En raison de la longue distance entre les essieux (jusqu'à 7,7 m) et la garde au sol faible, le rayon de raccordement des déclivités est d'au moins 50 m. Dans ce cas, le véhicule doit être conduit à 5 km/h pour empêcher des dommages éventuels. Néanmoins, avec un plus grand rayon, le véhicule est en mesure de rouler à des vitesses plus élevées. L'angle de fuite à l'avant et à l'arrière du véhicule permet un angle d'inclinaison jusqu'à 12,5% (1:8). Dans le cas d'une rampe importante, juste après une pente, une distance d'au moins 9 mètres est requise entre la fin de la pente et le début de la rampe.

En ce qui concerne les matériaux de construction des voies réservées, en raison de véhicules guidés utilisant toujours la même piste, APTS préconise d'utiliser le béton armé ou des matériaux équivalents stables pour les voies du Phileas. Avec les matériaux

[41] BRT : Bus Rapid Transit.

bitumineux, la déformation de la couche de roulement (ornières) a lieu au bout de quelques mois, d'abord au niveau des stations et des carrefours puis sur l'ensemble de la ligne. L'orniérage génère l'augmentation des coûts de maintenance de l'infrastructure de manière significative. Le renforcement en acier dans les constructions en béton peut être appliqué si nécessaire, par exemple, dans les piles des ponts et des tabliers, sans pour autant perturber le champ magnétique des aimants : les marqueurs magnétiques doivent être simplement positionnés le plus loin possible de ces renforcements.

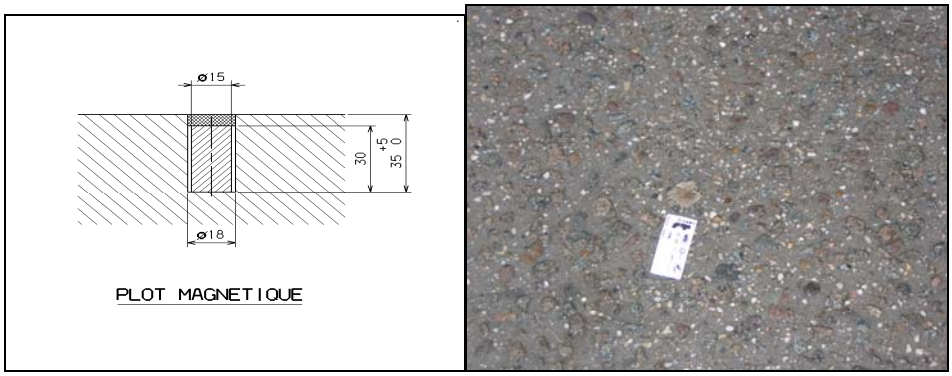


Figure 61: Plot magnétique du PHILEAS
(Source : F. Kuhn)

Selon APTS, les aimants peuvent être installés dans tous les types d'infrastructure. S'il s'agit d'un béton armé, APTS conseille d'envisager une zone de 40 x 40 cm sans aciers afin d'y implanter l'aimant.

À titre d'exemple, la structure de la chaussée pour le véhicule Phileas à Douai (Évéole) est constituée d'une dalle de béton, qui permet l'implantation relativement aisée des capteurs en vue du guidage magnétique. Cette structure est composée de 25 cm de béton armé discontinu sur une couche de fondation de 24 cm de béton maigre.

Exigences générales pour l'implantation des aimants

Sans aucune aide extérieure, le véhicule Phileas peut rouler et suivre sa trajectoire. Ceci est réalisé avec l'intelligence artificielle et les capteurs indépendants posés sur le véhicule tel que l'aide à la conduite dans les roues, le capteur d'angle sur la direction assistée, gyroscopes, etc. De plus, le point innovant et essentiel pour le Phileas est constitué des marqueurs magnétiques. Ils sont implantés dans la couche de roulement de la voie en surface pour un positionnement plus précis et les capteurs magnétiques sous le véhicule détectent le passage des aimants prédéfinis. Chaque voie est munie d'une ligne, « grille des aimants ». Les aimants ont un diamètre de 15 mm et une longueur de 30 mm. Habituellement, la grille magnétique est mise en ligne en surface. Ainsi, la grille magnétique doit être placée dans la surface de la route de telle manière que les capteurs magnétiques soient toujours en mesure de détecter les aimants sous le véhicule lorsqu'il roule. Cette grille des aimants constitue le tracé de la voie que suit et connaît le véhicule. Les informations du type espace-temps sont disponibles et transmises au

SAEIV (Système d'assistance pour l'exploitation et l'information des voyageurs) qui aide à la bonne marche du véhicule Phileas.

Ces aimants sont normalement installés de la manière ci-après:

- Un petit trou est percé dans la chaussée, profondeur de 5 cm, diamètre 1,8 cm,
- Un marqueur magnétique cylindrique de diamètre 1,5 cm et de longueur 3,5 cm est inséré dans le trou,
- Une résine est coulée pour le remplissage au niveau de la surface de la chaussée.

En général, la grille magnétique est implantée pour être installée au milieu de la voie, soit sur les sections droites soit en légères courbes, cependant:

- La ligne de la grille est fixée à un minimum de 145 cm et d'un maximum de 165 cm du côté droit de la route sur les sections droites et dans les virages normaux.
- APTS déterminera le tracé des aimants dans les virages plus serrés ou si l'itinéraire idéal de la grille n'est pas clair.
- La distance moyenne entre les aimants dans le sens longitudinal est de 4,5 m ± 1,0 m. Cette distance correspond à la distance entre les centres de deux plaques adjacentes installés tout au long de la voie.
- Une distance minimale de 20 cm d'un acier ferromagnétique doit être maintenue (par exemple, ponts, viaducs, etc.).

Après avoir suivi ces exigences, la fiabilité du système sera obtenue par la redondance d'information et cette fiabilité répond à la question des préoccupations de sécurité pour les personnes transportées, ainsi que pour les autres utilisateurs des voies adjacentes.

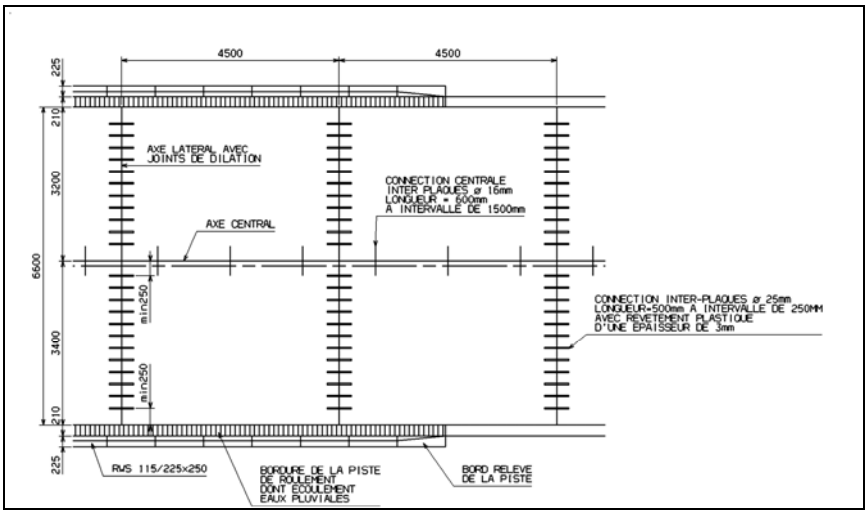


Figure 62: Implantation des plots magnétiques de la voie du PHILEAS sur un ouvrage en BA
(Source : APTS)

3.3.2.2. Matériels roulants

Il existe 3 types de matériel roulant pour le Phileas :

Type	Places assises	Places debout (4 / 6 p/m^2)	Total (4 / 6 p/m^2)
Articulé 18.5 m	29 / 29	74 / 111	103 / 140
Double articulé 24.5 m	46 / 46	83 / 125	129 / 171
Double articulé 26.0 m	52 / 52	89 / 133	141 / 185

Tableau 10: Capacité unitaire des véhicules PHILEAS
(Source : APTS)

Assistance électromagnétique et précision d'accostage

Le véhicule PHILEAS a une assistance électromagnétique et une précision d'accostage qui peuvent être utilisés sur les itinéraires spécifiquement établis à cet effet. Une piste de marqueurs magnétiques de référence est implantée dans la couche de roulement de la voie pour réaliser ce système d'assistance. Grâce à celui-ci, il est possible d'arrêter le véhicule avec une distance constante entre les portes et le bord du quai, qui résulte d'un alignement avec une lacune minimum permettant aux passagers de monter et descendre rapidement du bus, limitant ainsi les temps d'arrêt pour maintenir la vitesse moyenne la plus élevée possible.

Ce système permet de réaliser une conduite complètement automatique. En mode guidé grâce à cette assistance, le pilote n'utilise pas le volant. Le pilote est toujours responsable du contrôle de la vitesse, de l'accélération et du freinage. Parallèlement, la limitation automatique de vitesse est appliquée pour chaque arrêt du véhicule de façon très précise dans le sens de la marche pour aider le conducteur. Parce que, même si le conducteur est vigilant du contrôle de la vitesse, il pourrait ne pas y avoir de détection d'obstacles. Le conducteur peut toujours passer à un contrôle manuel avec un bouton de commande spécial, ou en appliquant une force manuelle sur le volant en cas d'urgence.

Le système de guidage est constitué de 3 transformateurs définissant son fonctionnement. Un incident ne pourrait avoir lieu que si deux des trois processeurs cessent de travailler en même temps. Ce même principe est utilisé dans l'aviation pour le pilotage automatique des avions.

Cependant, pour l'homologation du système Phileas à Douai, APTS doit démontrer que son pilotage automatique offre le même niveau de sécurité qu'un tramway classique. Malheureusement, cette homologation paraît difficile à obtenir actuellement.

Légèreté de la caisse

Le véhicule Phileas utilise une caisse légère qui est 40 % plus légère qu'une construction conventionnelle en acier : le plancher et les panneaux de toit sont constitués de panneaux sandwich en aluminium, les parois latérales sont en panneaux sandwich polyester.

L'application des panneaux sandwich, en général, a un certain nombre d'avantages:

- L'intégration des fonctions, telles que la résistance et la rigidité, l'isolation et la finition,
- Faible poids, offrant plus de charge utile ou de la compensation pour les équipements supplémentaires,
- Pas de corrosion,
- Une grande flexibilité de positionnement des portes et de la configuration intérieure,
- Grande liberté de style, même pour de petites séries.

Le véhicule fabriqué en monocoque est conforme aux exigences pour les véhicules ferroviaires en ce qui concerne l'isolement de résistance au feu et le recyclage. Les crash tests du véhicule Phileas ont démontré une résistance supérieure contre les accidents latéraux avec des voitures particulières. Puis, une durée de vie d'au moins 20 ans est garantie pour la carrosserie du véhicule Phileas.

Pour les véhicules Phileas de 24 mètres de long, le poids à vide est de 19,65 tonnes. À titre d'exemple, le poids à vide du TVR est 26 tonnes, plus lourd (+ 32%) pour une capacité similaire. Le poids est une réelle contrainte pour les coûts d'exploitation (en raison de la consommation d'énergie) et de l'agressivité sur la piste (l'épaisseur des couches de structure). Lorsque les véhicules transportant des passagers sont à une occupation normale de 4 passager/m^2, la charge par essieu sur le STE4 est autour de 7 800 kg pour chacun des 5 essieux, le TVR est plus lourd pour 4 essieux (6 400, 8 600, 9 500, 9 000 kg). Le Phileas de 24 m de long a une charge moins élevée sur chaque essieu de 5 000 à 8 700 kg.

Véhicules vides

Véhicules vides	Masse Totale (kg)	Essieu 1	Essieu 2	Essieu 3	Essieu 4	Essieu 5
STE4 32 m	28 500	6 600	5 200	5200	4 900	6 600
TVR 24 m	26 000	5 531	5 758	6 032	7 680	
Phileas 24 m	19 650	3 335	4 690	4 665	6 960	
Phileas 18 m	15 230	3 270	5 010	6 950		

Véhicules avec 4 passagers/m²

4p/m²	Nombre de passagers	Masse Totale (kg)	Essieu 1	Essieu 2	Essieu 3	Essieu 4	Essieu 5
STE4 32 m	162	38 900	7 900	7 800	7 800	7 500	7 900
TVR 24 m	131	33 508	6 389	8 579	9 468	9 071	
Phileas 24 m	141	29 520	4 910	7 960	7 920	8 730	
Phileas 18 m	104	22 510	4 780	9 025	8 705		

Véhicules avec 6 passagers/m²

6p/m²	Nombre de passagers	Masse Totale (kg)	Essieu 1	Essieu 2	Essieu 3	Essieu 4	Essieu 5
STE4 32 m	222	42 600	8 400	8 700	8 700	8 400	8 400
TVR 24 m	178	36 559	6 541	9 817	10 817	9 383	
Phileas 24 m	185	31 675	5 350	8 875	8 575	8 875	
Phileas 18 m	140	24 820	5 320	10 405	9 095		

Tableau 11: Charge à l'essieu des différents véhicules
(Source : APTS, Lohr-Industrie et Bombardier)

3.3.3. Aspect économique

Selon le projet de Phileas à Douai, à l'heure actuelle il ne fonctionne pas encore avec son guidage automatique, le coût d'investissement est de l'ordre de grandeur de 109,7 M€ sur 12 km (9,14 M€/km, 2004) mais le coût d'exploitation n'est pas encore connu parce qu'il n'y a aucun retour d'expérience actuellement en France.

3.3.4. Aspect urbanistique

3.3.4.1. Emprise au sol

Pour le véhicule de Phileas, toutes les roues sont directionnelles, ce qui avec l'aide de l'assistance électromagnétique, permet une précision d'accostage pour chaque porte. Il s'agit d'une caractéristique unique du véhicule Phileas. Au cours de cet accostage, toutes les roues sont en mesure de s'orienter dans la même direction et le véhicule se déplace latéralement. Le rayon de braquage du véhicule Phileas est égal à celui d'un bus standard 12 m, mais la trajectoire balayée dans les virages serrés est beaucoup plus étroite.

En mode guidé, l'essieu avant est dirigé automatiquement par un servomoteur dont le fonctionnement est déterminé par le système de guidage. Par ailleurs, en mode manuel, l'essieu avant est dirigé par le conducteur à l'aide du volant. La trajectoire pour le deuxième essieu est déterminée par l'essieu avant et les trajectoires pour les autres essieux sont déterminées par l'angle de l'articulation.

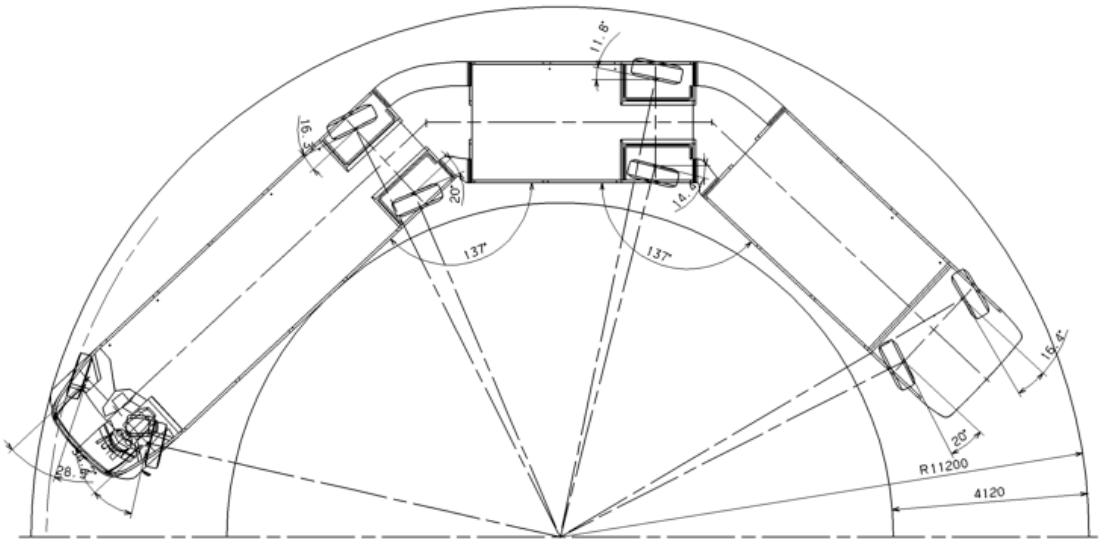


Figure 63: Emprise nécessaire en courbe du PHILEAS bi-articulé
(Source : APTS)

Rayon (mètre)	Rayon intérieur (mètre)	voie (mètre)
12,00	7,76	4,24
12,50	8,33	4,17
18,00	14,37	3,63
25,00	21,69	3,31
50,00	47,08	2,92
100,00	97,27	2,73
150,00	147,33	2,67

Tableau 12: Rayons de giration du PHILEAS
(Source : APTS)

Section en coupe

En prenant en compte des dimensions du véhicule, les contraintes liées au gabarit dynamique et les tolérances de pose des différents équipements, la largeur nécessaire pour le Phileas est la suivante:

- 6,60 m (bordures de séparation de 0,25 m incluses) pour deux voies,
- 3,25 m (bordures de séparation de 0,25 m incluses) pour une voie unique.

En courbe, le GLO exige une largeur supplémentaire en fonction du rayon de courbure. Ces largeurs supplémentaires sont déterminées en utilisant un programme de giration appliqué à chaque courbe: le rayon de courbure, le dimensionnement du matériel roulant, ainsi que la vitesse de circulation.

Le site propre est isolé de la circulation générale par des séparateurs situés des deux côtés de la plate-forme du site propre. Pour les espaces adjacents à la plate-forme, 2 types de protection peuvent être utilisés : le long d'un trottoir, la plate-forme est surélevée de 2 cm et le long d'une route, la plate-forme est surélevée de 6 cm.

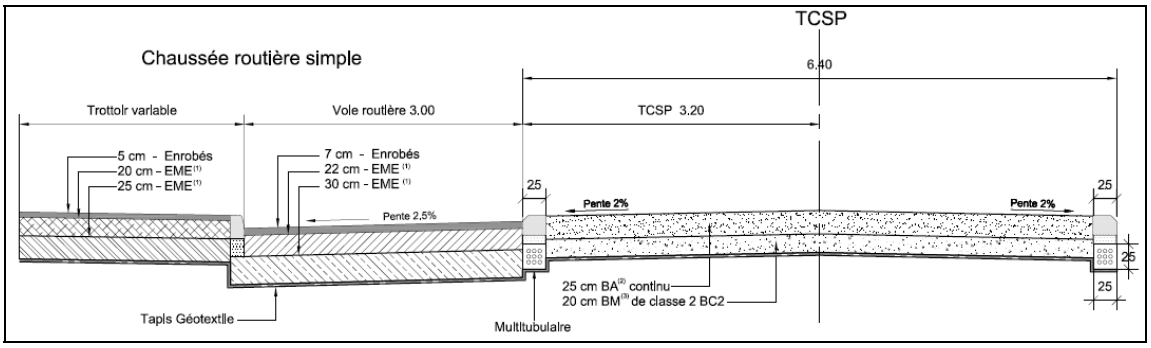


Figure 64: Coupe type de la structure de chaussée d'ÉVÉOLE de Douai
(Source: SMTD)

Nota: EME Enrobés à Module Élevé

Profil en long

La pente maximale observée à Douai est de 6,7%. La pente maximale admissible avec la charge maximale pour un véhicule Phileas de 18,4 m est de 17,3 %.

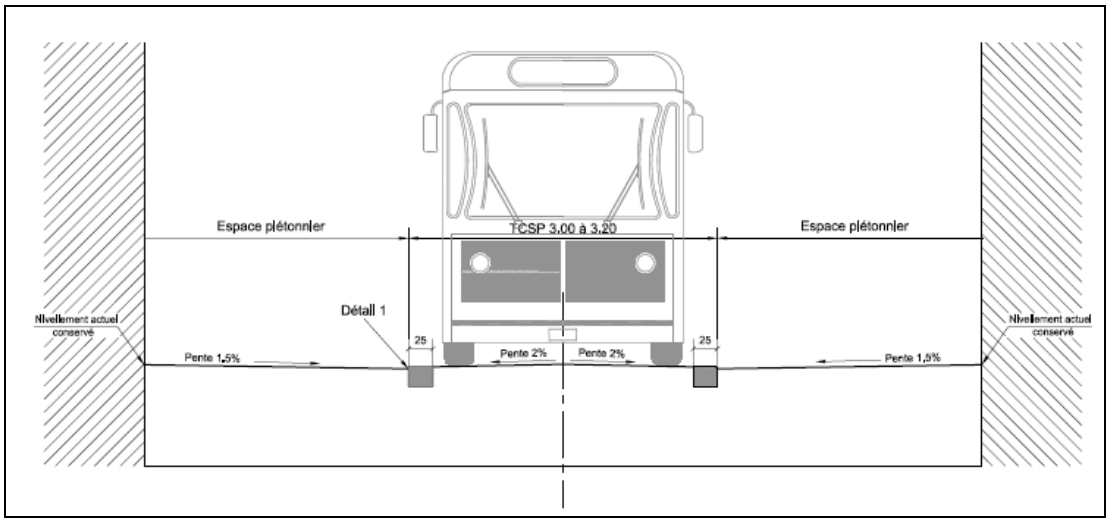


Figure 65: Coupe type d'une voie unique pour ÉVÉOLE
(Source : SMTD)

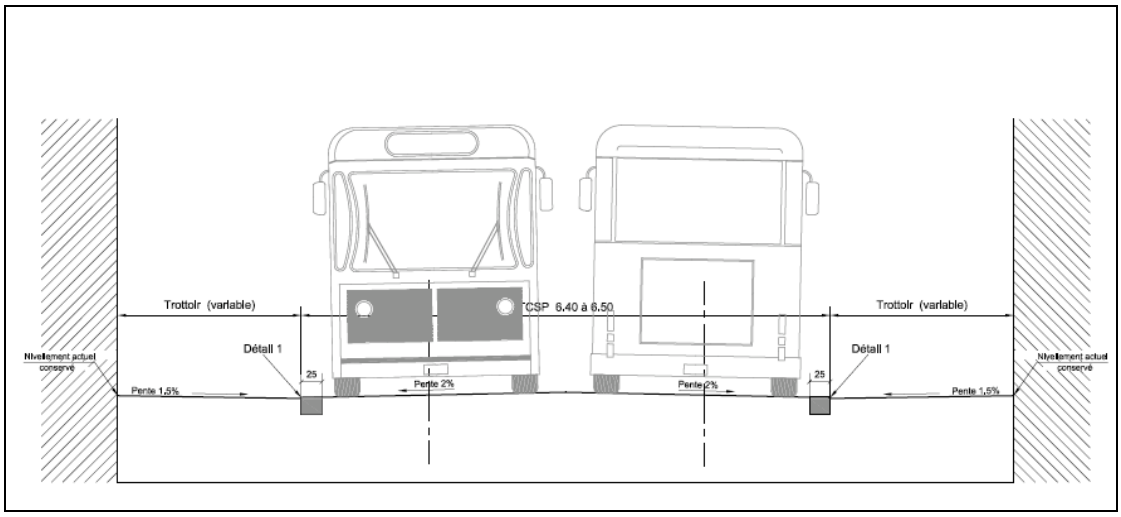


Figure 66: Coupe type d'une voie double pour ÉVÉOLE
(Source : SMTD)

Nota : la largeur d'emprise retenue sur la première de Douai est 6,60 m

3.3.4.2. Accessibilité

Quais surélevés pour les arrêts

L'accostage précis rend possible de s'arrêter à une distance constante minimale entre les portes et le bord du quai. Cela nécessite, en outre, un quai qui est optimisé pour le système Phileas:

- Les quais doivent avoir une hauteur de 30 cm au-dessus du plan de roulement,
- La section en coupe du bord du quai doit être conforme aux spécifications APTS,
- Si le contexte local ne permet pas d'avoir la longueur de quai égale à la longueur du véhicule, il est possible de diminuer la longueur du quai de 4 mètres par rapport à la longueur du véhicule (18, 24 et 26 mètres de long),
- Les stations doivent être en alignement droit et situées directement à côté de la voie réservée aux Phileas,
- Après un virage, le véhicule a besoin d'une section droite d'au moins une longueur du véhicule avant l'arrivée au quai.

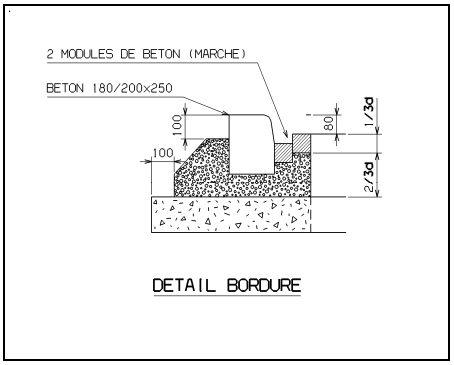


Figure 67: Bordure du PHILEAS
(Source : SMTD)

3.4. Trolleybus

3.4.1. Explication générale

Les trolleybus sont dérivés par des perfectionnements de l'autobus classique ou conventionnel lié aux développements de la technologie électrique, notamment la traction électrique. Le trolleybus offrent, par l'utilisation de moteur électrique, non seulement une meilleur performance de traction sans oublier les économies d'énergie, mais aussi un meilleur confort dû à l'accélération progressive et continue. Ainsi le trolleybus engendre moins de pollution et un bruit nettement inférieur au moteur thermique.

Dans les années 1920 le trolleybus a été introduit dans de nombreuses grandes villes comme une alternative au tramway. Dans les années 1930, par exemple, il y avait plus de 2300 trolleybus à Londres. La raison principale en est une plus grande flexibilité et un coût réduit par rapport à celui du tramway. À cette époque, le moteur à combustion interne était moins puissant et moins fiable que les moteurs électriques.

À la fin des années 1950, la fiabilité et le rendement des moteurs diesel se sont nettement améliorés et le carburant était bon marché, de plus, l'environnement n'était pas le problème du moment.

Cependant, à la fin du 20ième siècle, les questions d'environnement et les crises pétrolières ont fait de la propulsion électrique la solution pour lutter contre la pollution, ce qui permet de rendre une « deuxième » chance au trolleybus. Aujourd'hui, plusieurs villes pensent au trolleybus comme un moyen de transport moins polluant par rapport à l'autobus conventionnel.

3.4.2. Aspect technique

Grâce à ses caractéristiques dues à l'utilisation de moteur électrique, le trolleybus offre plusieurs avantages. Le trolleybus est rapide en accélération grâce à un couple de démarrage constant par rapport à l'autobus qui utilise un moteur thermique et ainsi peut franchir des pentes de plus de 14 % sans difficulté.

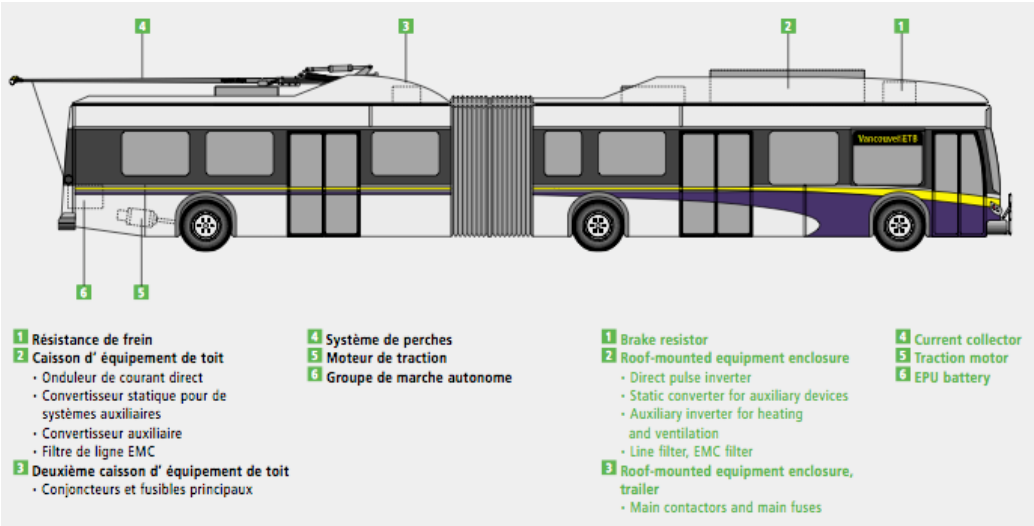


Figure 68: Éléments principaux du trolleybus articulé
(Source : Vossloh)

Pour la même raison, le trolleybus a un meilleur rendement que l'autobus, en moyenne 73 % contre 26 %. Si l'on ajoute la récupération de l'énergie au freinage, il peut atteindre théoriquement 90 %. D'après EDF, en terme de la consommation d'énergie exprimée en Wh/voy/km, le trolleybus consomme en terrain plat 25 Wh/voy/km à comparer au 71 Wh/voy/km de bus Diesel (tramway : 23,5).

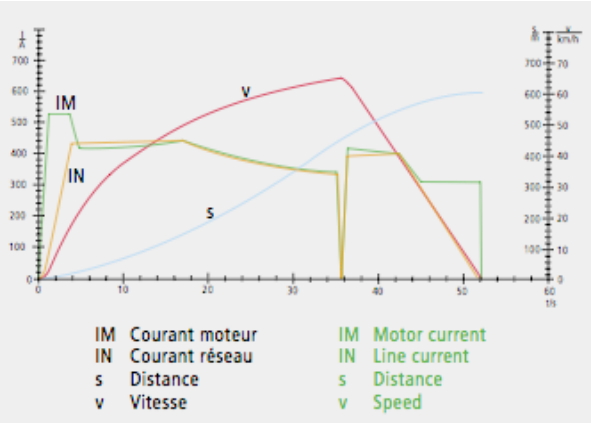


Figure 69: Diagramme de performance de marche pour un trolleybus articulé chargé
(Source : Vossloh)

Le trolleybus est peu bruyant pour les riverains et plus confortable pour les passagers. À ce sujet, le trolleybus, à 50 km/h, est à 75 dBa quand l'autobus est à 84 dBa, à l'arrêt en station le moteur électrique ne produit plus aucun bruit.

En ce qui concerne l'environnement, le trolleybus ne contribue pas à la pollution de l'air ni à l'effet de serre. Il ne produit ni CO, ni NOx, ni composés Organiques Volatiles. Et, il ne produit pas de CO_2 localement par rapport à un autobus Diesel.

3.4.3. Aspect économique

La réalisation d'une ligne de trolleybus est un investissement à long terme. Le matériel roulant étant plus cher qu'un autobus diésel en investissement, selon le Systra il est 2 ou 3 fois plus cher qu'un autobus (0,5-0,8 M€/véhicule par rapport 0,2-0,3 M€/véhicule). Néanmoins sa rentabilité est plus élevée sur 20 ou 25 ans, soit 2 fois plus que la vie d'un autobus et ne produit pas de gaz à effet de serre en phase d'utilisation d'énergie.

	Coût du Matériel roulant (M€)	Capacité moyenne	Coût moyen par place (k€)	Durée de vie	Coût moyen par place sur 30 ans (k€)
Bus standard	0,19-0,22	80	2,5	10-15	5-7,5
Bus articulé	0,25-0,35	120	2,5	10-15	5-7,5
Trolleybus standard	0,40-0,50	80	5,6	20-25	6,7-8,4
Trolleybus articulé	0,60-0,80	120	5,6	20-25	6,7-8,4
Tramway sur pneu	1,90-2,30	120-200	11,5-16,0	25-30	11,5-18,0
Tramway sur fer	2,00-3,00	120-280	11,0-17,0	30	11,0-17,0
Tram-train	3,50	250	14,0	30	14,0
Métro léger	2,30-3,40	150-250	13,5-15,5	35	11,0-13,0
Métro lourd	3,80-5,70	250-700	8,0-15,0	35	7,0-13,0

Tableau 13: Aspect économique des différents systèmes de transport
(Source : EDF, novembre 2004)

Selon EDF, comme montré dans la **Tableau 13**, le trolleybus se situe dans la moyenne parmi les différents systèmes de transport de surface en termes d'aspect d'économique.

3.4.4. Aspect urbanistique

Aujourd'hui, le tramway bénéficie d'une très bonne image pour les villes où se trouve le tramway moderne, tandis que ce n'était pas vrai dans les années 60. Le trolleybus peut aussi bénéficier de cette bonne image en répondant et profitant des enjeux actuels sur l'environnement, notamment le développement durable.

De plus aujourd'hui, le trolleybus offre tout à fait un bon niveau d'accessibilité, quelques constructeurs notamment Vossloh, propose le trolleybus avec un plancher bas et un moteur ayant plus de performances et un meilleur rendement par rapport aux anciens modèles.

La critique majeure vis-à-vis du trolleybus provient de la « pollution visuelle » liée aux fils électriques des lignes aériennes et de leurs supports. Mais il faut relativiser cette « pollution visuelle » des fils de trolleybus. Comme pour le tramway lors de son implantation, le trolleybus peut atténuer cet impact dit « négatif » par une bonne conception des poteaux, plus esthétique, ou une bonne utilisation des contextes urbains qui diminuent leur impact visuel.

3.5. Autobus

Un autobus (bus en abrégé) est un véhicule affecté au transport urbain de voyageurs, c'est-à-dire un véhicule automobile pour le transport en commun de voyageurs. Aujourd'hui en faveur du développement durable, l'autobus hybride, voire électrique est apparu dans le monde du transport public.

3.5.1. Explication générale

Un autobus standard notamment en France est un bus d'une longueur de 12 m. Toutefois, la longueur des autobus ou autocars à deux essieux peut atteindre 13,50 mètres et celle des autobus ou autocars à plus de deux essieux peut atteindre 15 mètres selon l'Article R312-11 du code de la Route, en vigueur depuis le 31 Mai 2003.

La capacité d'un autobus standard est de l'ordre de 70 à 80 places selon une norme de $4p/m^2$. Ce type de véhicule constitue l'élément de base pour le transport des personnes dans les réseaux urbains et interurbains.

Un autobus articulé est un bus bi-caisse d'une longueur de 18 m. Les deux caisses sont reliées par une articulation permettant l'intercirculation et repose sur trois essieux, deux sur la première caisse et un sur la deuxième. La capacité d'un autobus articulé est de l'ordre de 110 à 120 places en appliquant la norme confort de $4p/m^2$. Certains opérateurs estiment, face à l'augmentation du trafic sur certaines lignes fortement chargées, qu'il est préférable d'utiliser, d'abord, des autobus articulés avant de restructurer le réseau entier car ils offrent un meilleur confort et absorbent plus facilement le trafic aux heures de pointe.

Les autres aspects des autobus sont proches de ceux des trolleybus. De plus, ils n'ont pas besoin de l'infrastructure spéciale puisqu'ils utilisent des voies banales sans guidage. Cependant, sur le site propre ou le couloir bus, il est recommandé de les traiter avec plus d'attention en termes de sécurité ainsi que l'infrastructure pour diminuer les coûts de maintenance ultérieurs.

3.5.2. Aspect technique

3.5.2.1. Matériels roulants

L'autobus motorisé a été initialement configuré avec un moteur à l'avant et une entrée à l'arrière et il y avait deux personnes pour l'exploiter, un conducteur et un receveur. Avec le changement de méthode d'exploitation vers une seule personne pour la conduite, l'autobus dans le monde développé a adopté le type de modèle à moteur arrière, avec une porte unique à l'avant, ou des portes multiples. Cependant, l'autobus à moteur avant a persisté pour les marchés de niche tels que les autobus scolaires américains, certains minibus et pour les autobus dans les pays moins développés, qui peuvent être tirés de châssis de camion, plutôt que de bus construit à cet effet.

La plupart des bus ont deux essieux mais les autobus articulés en ont trois. Il existe certains autobus à essieux supplémentaires qui supportent plus de poids ou de longueur pour des cas spéciaux.

Le matériel roulant de l'autobus d'aujourd'hui est très vari : les 2 tableaux suivants montrent les caractéristiques des autobus actuellement disponibles sur le marché.

Constructeurs	Model	Longueur (m)	Nombre des portes	Capacité (min/max), 6p/m²	Hauteur de plancher	Moteur	Remarque
Irisbus	Citelis Line - 2005	12	2 & 3 av. & arr.	assis(min/max):32/49(2 portes), 27/45(3 portes) debout(min/max):57/86(2 portes), 59/84(3 portes	Porte avant:320 mm milieu/arrière:330 mm	Iveco Curso 8 Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 245 & 290 CV	Diesel
	Citelis 12	12	2 & 3	assis (min/max):28/45(2 portes), 22/40(3 portes) debout (min/max):56/89(2 portes, 66/99(3 portes	Porte avant:320 mm milieu/arrière:330 mm	Iveco Curso 8 Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 245 & 290 CV	Diesel
	Citelis 12 - 2005	12	2 & 3 av. & arr.	assis (min/max):28/45(2 portes), 22/40(3 portes debout (min/max):54/81(2 portes, 65/84(3 portes	Porte avant 320 mm milieu/arrière:330 mm	Iveco Cursor 8 CNG-EEV moteur : 210 & 270 CV	GNC
MAN	Lion's city A37	11.980	2 or 3	> 100	320 mm	MAN D0836 LOH 50 Euro 4 EGR moteur : 280 CV	Diesel
	Lion's city A21	11.980	2 or 3	> 100	320 mm, 3rd porte avec/sans marche	MAN E2866 DUH 03 EEV, MAN E2876 LUH 01 EEV moteur : 245 & 310 CV	GNC
	Lion's city A21	11.980	2 or 3	> 100	320 mm, 3rd porte avec/sans marche	MAN D2066 LUH 11 Euro 4 EGR, MAN D2066 LUH 12 Euro 4 EGR moteur : 270 & 310 CV	Diesel
	Lion's city A21	11.980	2 or 3	> 100	320 mm, 3rd porte avec/sans marche	MAN G2876 DUH 01 EEV moteur : 265 CV	GPL
Mercedes-Benz (EvoBus)	Citaro	11.950	2 or 3 double	2 portes: assis 20+1/39+1, debout 59/91 3 portes eng. hor.: assis 1+1/34+1, debout 64/91 3 portes eng. ver.: assis 21+1/32+1, debout 67/91	Porte avant:320 mm milieu/arrière:340 mm	DaimlerChrysler AG OM 906 hLA:286 CV OM 457 hLA:299 & 354 CV OM 906 & 926 LA:286 CV	Diesel
	Citaro CNG	11.950	2 (ou 3 option)	assis (min/max):20+1/38+1 debout (min/max):59/90	Porte avant:320 mm milieu/arrière:340 mm	DimlerChrysler AG OM 447 hLAG Euro 4 and EEV moteur : 250 & 326 CV	GNC
	Citaro LE	12.040	2	assis (min/max):20+1/39+1 debout (min/max):63/80	Porte avant:320 mm milieu:340 mm	DimlerChrysler AG OM 457 moteur : 299 & 354 CV	Diesel
	Citaro L	14.995	3	assis (min/max):29+1/56+1 debout (min/max):40/110	Porte avant:320 mm milieu/arrière:340 mm	DimlerChrysler AG OM 457 hLA moteur : 299 & 354 CV	Diesel
SCANIA	OmniCity - 2007	11.985	2 ou 3	assis min/max):29 debout (min/max):66/88	Porte avant:320 mm milieu/arrière:340 mm	Scania DC9 Euro 4:230, 270 & 310 CV EGR sans BVA, 5 ou 6 vitesses	Diesel
VOLVO	7700	12	2 ou 3	assis (min/max):23 to 35 debout (min/max):50 to 85	340 mm	Volvo D9B Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 260 & 310 CV	Diesel
	7700 CNG	12	2 ou 3	assis (min/max):23 to 35 debout min/max):50 to 75	340 mm	Volvo G9A Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 260 & 300 CV	GNC
Heuliez	Access'Bus GX 327 -2005	12.040	2 ou 3	assis (min/max):23/46 debout (min/max):72/95	Porte avant:320 milieu/arrière:330	Iveco Cursor 8 Euro 4 moteur : 245 CV (option 290 CV)	Diesel
	Access'Bus GX 327 -2005	12.040	2 ou 3	assis (min/max):23/46 debout (min/max):72/95	Porte avant:320 milieu/arrière:330	Iveco Cursor 8 Natural Gaz moteur : 272 CV	GNC
Van Hool	A 330 - 2001	11.995	2 ou 3	assis (min/max):21/37 debout min/max):68/98	330 mm	MAN D0836 LOH 51 moteur : 280 CV	Diesel
	A 330 - 2001	11.995	2 ou 3	assis (min/max):21/37 debout (min/max):52/78	330 mm	MAN E2866 DUH 02 EEV moteur : 310 CV	GNC

Tableau 14: Caractéristique des autobus standard en France
(Source : « Le guide de l'industrie des transports publics », Transport Public, 2007)

Constructeurs	Model	Longueur (m)	Nombre des portes	Capacité (min/max), 6p/m^2	Hauteur de plancher	Moteur	Remarque
Irisbus	Citelis 18 - 2005	18	3 & 4	assis (min/max):39/57(3 portes), 34/52(4 portes) debout (min/max):102/134(3 portes), 113/142(4 portes)	Porte avant:320 mm middle/back:330 mm	Iveco Curso 8 Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 290 & 380 CV	Diesel
	Citelis 18 guided - 2005 (optical guided Siemens Transportation Systems)	18	3 & 4	assis ((min/max):39/57(3 portes), 34/52(4 portes) debout (min/max):102/134(3 portes), 113/142(4 portes)	Porte avant:320 mm middle/back:330 mm	Iveco Curso 8 Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 290 & 380 CV	Diesel
	Citelis 18 - 2005	18	3 & 4	assis (min/max):31/59(3 portes), 33/55(4 portes debout (min/max):104/121(3 portes), 115/131(4 portes	Porte avant:320 mm middle/back:330 mm	Iveco Cursor 8 CNG-EEV moteur : 310 CV	GNC
MAN	Lion's city A23	17.980	3 ou 4	> 145	320 mm, 4rd porte avec/sans marche	MAN D2066 LUH 11 Euro 4 EGR, MAN D2066 LUH 12 Euro 4 EGR moteur : 310 CV	Diesel
	Lion's city A23	17.980	3 ou 4	> 145	320 mm, 4rd porte avec/sans marche	MAN E2876 LUH 02 EEV moteur : 310 CV	GNC
Mercedes-Benz (EvoBus)	Citaro G	17.940	3 ou 4 double	3 portes: assis (33+1/55+1, debout 120/142 4 portes: assis (29+1/48+1, debout 127/146	Porte avant:320 mm mi./back :340 mm	DaimlerChrysler OM 457 hLA:299 & 354 CV OM 457 LA:354 CV	Diesel
	Citaro G CNG	17.940	3 ou 4	3 portes: assis (33+1/54+1, debout 110/135 4 portes: assis (29+1/47+1, debout 110/135	Porte avant:320 mm mi./back:340 mm	DimlerChrysler OM 447 hLAG Euro 4 and EEV moteur : 326 CV	GNC
	Citaro BHNS (3 longueurs possibles: 17.94, 11.95, 10.50 m)	17.940	3 ou 4 portes glissantes	3 portes: assis (33+1/55+1, debout 120/142 4 portes: assis (29+1/48+1, debout 127/146	Porte avant:320 mm middle door:340 mm	DimlerChrysler OM 457 hLA:299 & 354 CV OM 457 LA:354 CV OM 447 hLAG Euro 4 & EEV:326 CV	Diesel/GNC
SCANIA	OmniCity - 2007	17.985	3 ou 4	assis ((min/max):29 debout (min/max):66/88	Porte avant 320 mm mi./back:340 mm	Scania DC9 Euro 4:230, 270 & 310 CV EGR sans BVA, 5 ou 6 vitesses	Diesel
VOLVO	7700 Articulé	18	3 ou 4	assis (min/max):35/58 debout (min/max):70/110	340 mm	Volvo D9B Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 310 & 360 CV	Diesel
	7700 A CNG	18	3 ou 4	assis (min/max):35/58 debout (min/max):70/110	340 mm	Volvo G9A Euro 4-Euro 5-EEV moteur : 300 CV	GNC
Van Hool	AG 300 – 2001	17.985	3 ou 4	assis (min/max):36/55 debout (min/max):101/120	330 mm	MAN D 2066 LOH 01 moteur : 320 CV	Diesel
	AGG 300 - 2001 (bi-articulé)	24.785	4	variable	330 mm	DAF PR 265 Euro 5 moteur : 360 CV	Diesel

Tableau 15: Caractéristique des autobus articulés en France
(Source : « Le guide de l'industrie des transports publics », Transport Public, 2007)

3.5.2.2. Capacité

Nous estimons qu'avec le site propre intégral, la capacité maximale théorique d'une voie est d'environ 700 uvp[42]/h/d. Sous une condition de circulation sans site propre, on peut avoir une baisse très forte de la capacité, par exemple, si la vitesse est d'environ 10 km/h à l'heure de pointe, la capacité n'est que de 100 à 150 uvp/h/d. Supposons que l'on calcule la capacité d'une ligne de bus en utilisant une capacité unitaire de l'autobus de 70 à 160 passagers (6 p/m^2), elle peut atteindre de 15 000 p/h/d à plus de 25 000 p/h/d avec site propre intégral.

Ainsi, la capacité maximale de transport et la régularité de service sont étroitement liées. Donc le problème essentiel est, en pratique, de trouver un bon compromis entre deux, évidemment il y a d'autres critères qui puissent influencer ce raisonnement. De plus, chaque pays a un point de vue différent sur le calcul de la capacité maximale.

Comment définissons-nous le niveau de capacité acceptable en termes de la rapidité et de la régularité ? D'abord, nous allons voir le cas de l'Amérique :

- Si le site propre est une voie simple pour chaque direction, trois niveaux de la circulation et trois niveaux de service existent:
  - avec un flux de trafic inférieur à 30 véh/h/d (2 minutes de fréquence), la traversée du carrefour doit être obtenue par la priorité aux feux; la régularité et la rapidité sont au maximum,
  - avec un flux de trafic entre 30 et 60 véh/h/d (moins de 2 minutes de fréquence): le carrefour à feu ne peut pas donner la priorité à tous les véhicules en site propre parce que la capacité du carrefour serait très réduite, mais les autobus circulent encore avec une bonne régularité grâce à la voie réservée,
  - avec un flux de trafic entre 60 et 120 véh/h/d, la file d'attente est inévitable et il est nécessaire d'envisager des stations avec arrêts décalés. Les arrêts aux carrefours et l'encombrement généré par les autobus entraînent une diminution de la vitesse et de la régularité: au delà de 120 véh/h/d, les avantages de site propre sont très atténués,
- Si le site propre est à voie double pour chaque direction, le temps d'échange diminue avec un nombre suffisant d'arrêts dédoublés et le dépassement est possible. Nous pouvons atteindre une capacité beaucoup plus élevée, jusqu'à 300 véh/h/d (ex: Dans COMONOR Sao Paulo).

En Europe, notamment en France, pour les services de bus en site propre, on ne dépasse pas le seuil de 2 minutes de fréquence, ainsi le site propre avec double voie est rarement utilisé. Alors, 30 véh/h/d avec la priorité au carrefour sont considérés comme raisonnable et acceptable mais jamais au-dessous.

Le tableau ci-dessous indique les capacités théoriques des autobus par heure et par direction : autobus standard, autobus articulé et autobus bi-articulé (anciennement à Bordeaux et Curitiba) :

[42] uvp : unité de véhicule particulier.

Types de bus	Capacité unitaire[43]	Vitesse et régularité max, priorité aux feux (p/h/d)		Vitesse et régularité stables (p/h/d)		Cas limité : vitesse et régularité réduites	
		1 voie/dir.	2 voies/dir.	1 voie/dir.	2 voies/dir.	1 voie/dir.	2 voies/dir.
Autobus standard	97	2 910	7 275	5 820	14 550	11 640	29 100
Autobus articulé	148	4 440	11 100	8 880	22 200	14 800	37 000
Megabus Bordeaux	215	6 450	16 125	12 900	25 800	21 500	43 000
Megabus Curitiba	270	8 100	20 250	16 200	32 400	27 000	54 000

Tableau 16: Capacité des 4 types d'autobus
(Source : constructeurs)

La méthode de calcul de la capacité pour l'autobus est complètement différente selon les pays soit 4 personnes par mètre carré soit 6p/m^2 voire 8p/m^2. La **Tableau 16** est un exemple extrême pour compter le nombre des personnes d'un autobus notamment dans les pays où l'on utilise l'autobus comme le système principal de transport urbain et inter-urbain, autrement dit les pays dominés par les modes routiers.

3.5.2.3. Autobus hybride

L'autobus hybride, comme le véhicule hybride, est un autobus qui utilise le moteur thermique et le moteur électrique en même temps pour offrir un service du transport. Le moteur thermique fournit du courant électrique et c'est le moteur électrique qui fait avancer seul l'autobus. L'hybridation peut permettre une réduction de la consommation jusqu'à 30 % selon le constructeur MAN. De plus elle réduit l'émission polluante et le niveau de bruit liés à l'utilisation du moteur thermique.

Presque tous les constructeurs d'autobus proposent plusieurs gammes d'autobus hybride aujourd'hui. Les ingénieurs se penchent sur plusieurs solutions techniques novatrices tel l'emploi de supercondensateurs en lieu et place de batteries afin de faire tampon entre les moteurs thermique et électrique : l'objectif est d'améliorer la durabilité de la motorisation des autobus. De plus, en terme de carburant, il existe une version du moteur thermique diesel alimenté non seulement par du gazole mais aussi de l'éthanol.

Cette technologie de l'hybridation ne cesse d'avancer par des innovations technologiques.

[43] 8 p/m^2

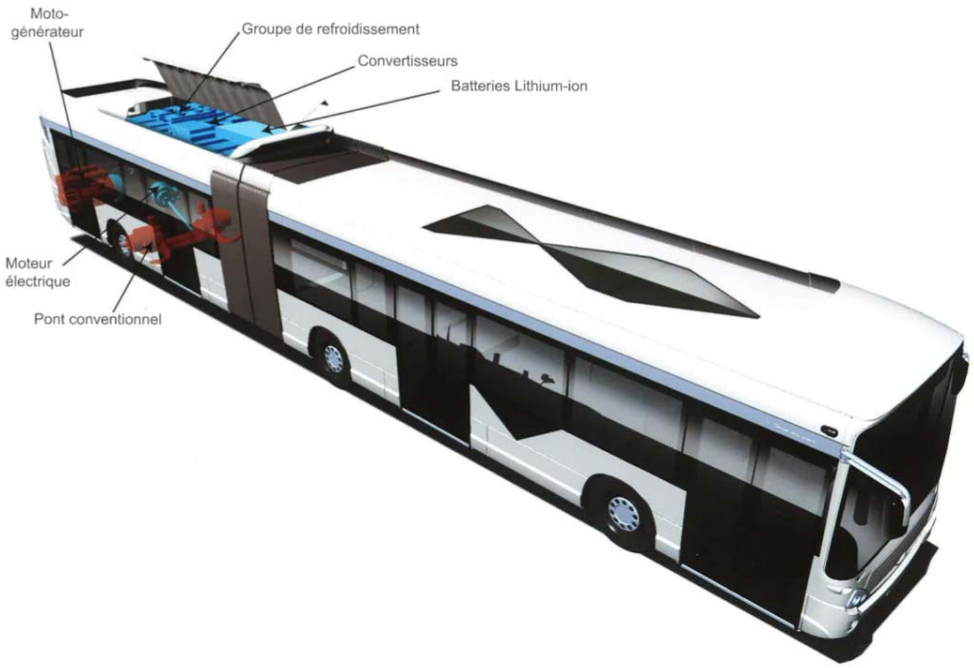


Figure 70: Principe d'un autobus hybride
(Source: Heuliezbus)

3.5.2.4. Autobus électrique

L'autobus 100 % électrique est disponible sur le marché mais plutôt de petit gabarit, parce qu'il y a une limite de puissance du moteur électrique qui n'est pas encore aussi puissant que le moteur thermique, notamment le moteur Diesel.

Parmi les autobus 100 % électrique, le plus connu en France est le microbus « Electricity » de Gruau équipé de batteries solides Lithium-Metal-Polymère BatScap Bolloré (3 packs batteries : 400V et 30 kWh) et de moteur électrique asynchrone 35 kW avec réducteur différentiel ayant l'autonomie de 120 km sans recharge et sans remplacement de batteries.

Figure 71: Microbus 100 % électrique de Gruau
(Source : Gruau)

Cependant, l'autobus électrique est plus avantageux par rapport à l'autobus à moteur thermique en termes de propreté et de silence. L'utilisation de ce type d'autobus va augmenter au fur et à mesure à l'instar du véhicule électrique privé. Selon EDF à l'heure actuelle, 43 villes ont prévu de s'équiper de bus électrique dont 20 ont déjà débuté l'exploitation, 23 projets sont en cours.

3.5.3. Aspect économique

Le coût d'un autobus varie selon les types et les constructeurs. La **Tableau 17** montre un exemple des coûts d'autobus en France communiqué par le Certu.

Types de bus	Coût actualisé en M€ (2007)
Autobus standard	0.268
Autobus articulé	0.439
Autobus bi-articulé	0.732
Trolleybus standard	0.585
Trolleybus articulé	0.975

Tableau 17: Coûts des différents types d'autobus et de trolleybus
(Source : Certu)

Nous avons un autre exemple de coût d'autobus. Récemment (en 2009) le RATP a passé commande de 225 nouveaux bus de dernière génération à l'un de ses fournisseurs, Irisbus. Le montant total de la facture était de 50 millions d'euros, ce qui ramène le prix d'un bus à 222.000 €.

Types de bus	Coûts d'exploitation en €/veh·km (2007)
Autobus standard	4.87 to 6.34
Autobus articulé	5.49 to 7.32
Autobus bi-articulé	6.17 to 8.29
Trolleybus standard	5.37 to 6.97
Trolleybus articulé	6.58 to 8.78

Tableau 18: Coûts d'exploitation des différents types d'autobus et de trolleybus
(Source : Certu)

En ce qui concerne le coût d'exploitation des autobus, il est aussi très variable selon les opérateurs et les réseaux. Néanmoins le Certu nous donne un ordre de grandeur de ce coût pour les réseaux français.

3.5.4. Aspect urbanistique

L'autobus est généralement considéré ne pas donner une bonne image pour la ville en terme d'insertion : pas de mono trace ni embarquement à niveau. Néanmoins, grâce au progrès technologique, l'autobus d'aujourd'hui s'insère relativement bien dans un milieu urbain ou rural par rapport aux anciens modèles et ainsi offre un bon niveau de service en termes d'esthétique.

3.5.4.1. Emprise au sol

Le rayon de giration de l'autobus est d'environ 12 m, soit standard soit articulé, et qui est le plus court parmi les modes de transport public.

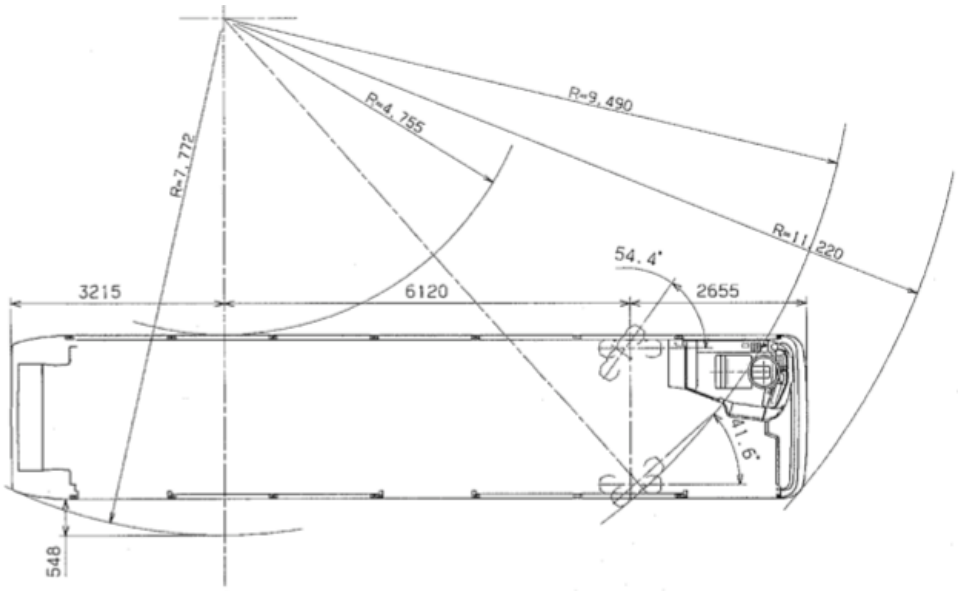


Figure 72: Caractéristiques de giration de l'autobus standard
(Source : Certu)

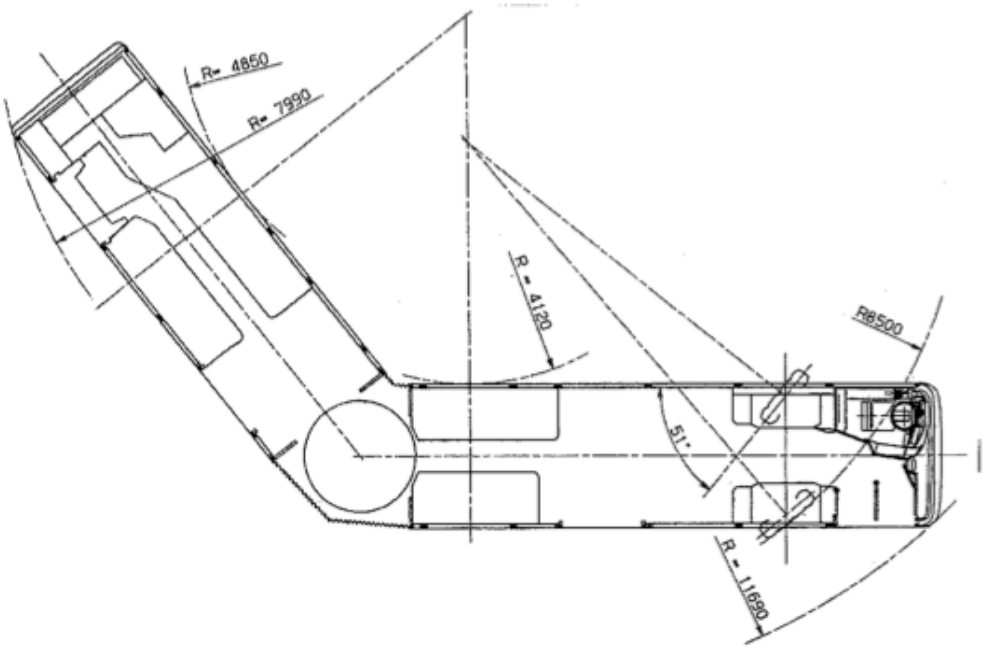


Figure 73: Caractéristiques de giration de l'autobus articulé
(Source : Certu)

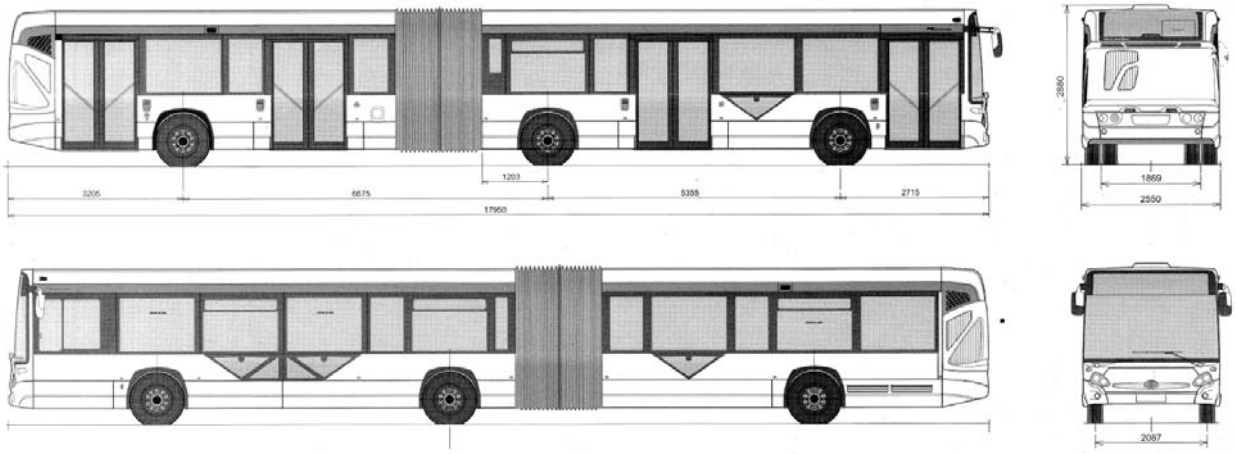


Figure 74: Caractéristique géométrique l'autobus articulé
(Source : Heuliezbus)

3.5.4.2. Accessibilité

L'autobus à l'heure actuelle offre un relativement bon niveau d'accessibilité grâce au matériel roulant à plancher bas avec l'utilisation de l'agenouillement et de la palette automatique. Il ne faut pas oublier de la loi concernant l'accessibilité pour le PMR[44].

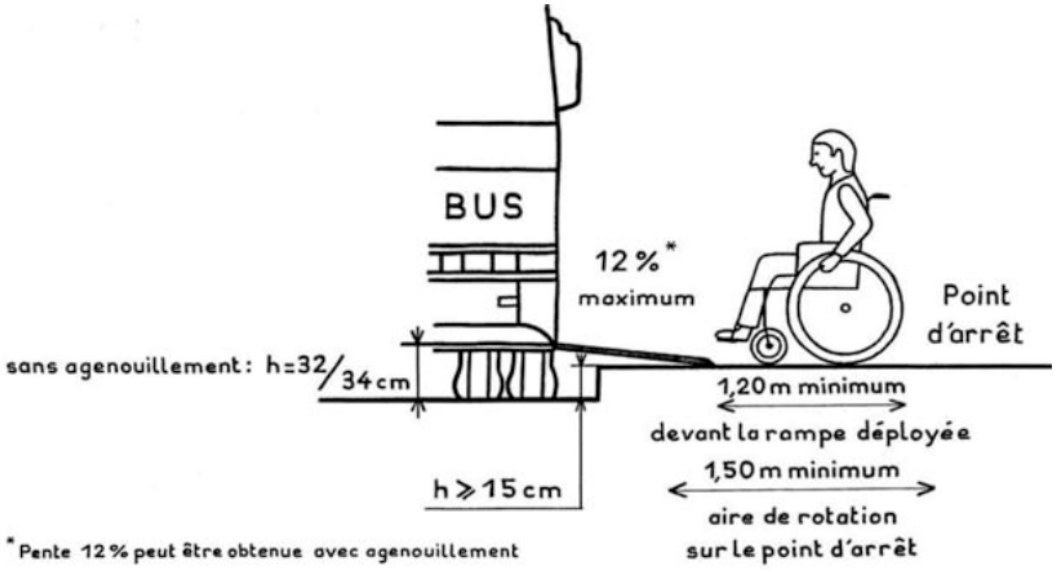


Figure 75: Dimensionnement d'un point d'arrêt pour permettre l'accès en fauteuil roulant au véhicule équipé d'une rampe
(Source: Certu)

[44] Pour consulter : Certu (2008) « Le bus et leurs points d'arrêts accessible à tous »

QUATRIÈME CHAPITRE

Chapitre IV : Application de la méthode ELECTRE III et IV

L'objet de cette partie est d'appliquer la méthode ELECTRE III et IV que nous avons retenus pour comparer les 6 systèmes de transport guidé de surface. En un premier temps nous effectuons le choix des critères pertinents, pour une bonne utilisation de cette méthode. Ensuite, nous employons avec les méthodes ELECTRE III et IV, ces critères avec les bases de données obtenues auprès des autorités organisatrices des transports des villes françaises (A.O.T.).

En un dernier temps, nous utilisons ces critères sur des scenarii prédéfinis pour savoir si tel ou tel système correspond au choix adapté pour le développement durable dans la ville actuelle.

1. Utilisation de la méthode ELECTRE III et IV

1.1. Problème d'agrégation des données

D'après la littérature présentée dans le chapitre II, notre problématique correspond à l'agrégation partielle (surclassement de synthèse) car d'une part, l'enjeu de transport est complexe et multicritère, et d'autre part, le choix du système de transport revient souvent à un choix limité par exemple à la comparaison ou au choix entre 2 systèmes. Sous cet angle, nous avons décidé d'utiliser les méthodes ELECTRE III et IV qui non seulement sont toutes des méthodes d'agrégation partielle mais aussi ont plusieurs avantages :

- La valeur ne change pas au fil de la procédure, la méthode ELECTRE garde la valeur des données de départ jusqu'au bout sans modification.
- Elle accepte une incertitude des informations.
- Le biais humain peut être évité.

1.2.ELECTRE III

Cette méthode, comme nous l'avons indiqué dans la partie III, est relative à la problématique du rangement γ, et prend en compte les seuils d'indifférence et de préférence. Elle se base sur une relation de surclassement qui a le mérite, par rapport à une relation ordinaire (sans poids sur les critères), d'être moins sensible aux variations des données et des paramètres introduits.

Dans ELECTRE III, on définit un degré de surclassement associé à chaque couple d'actions. On peut le comprendre comme un « degré de crédibilité de surclassement ».

Nous commençons par associer un poids à chaque critère et on calcule pour chaque couple d'actions l'indice de concordance en représentant et/ou appliquant les seuils d'indifférence, de préférence et de véto. Dans cette étape, le choix d'un poids est considérablement important mais pas toujours transparent ni compréhensible. Nous employons donc, pour être compréhensible et transparent, une méthode de pondération relativement simple, l'attribution de score.

Nous déterminons alors un rangement à partir d'un indice de qualification de chaque action, qui représente la différence entre le nombre d'actions surclassées et le nombre d'actions qui surclassent. On obtient un pré-ordre total en rangeant les actions selon leur qualification.

1.3.ELECTRE IV

Cette méthode vise, à l'instar de ELECTRE III, à ranger les actions mais sans introduire de pondération des critères car il existe des cas où la connaissance de l'importance des critères est difficile voire inexistante. Elle se base sur des considérations « de bon sens » compatibles avec la non-connaissance des importances relatives des critères. Elle est analogue à ELECTRE III, si ce n'est qu'elle ne fait pas intervenir de pondération. Mais elle ne permet pas de donner une solution assez fine pour finaliser une décision en effectuant un choix parmi des actions difficilement comparables.

2. Grille d'analyse

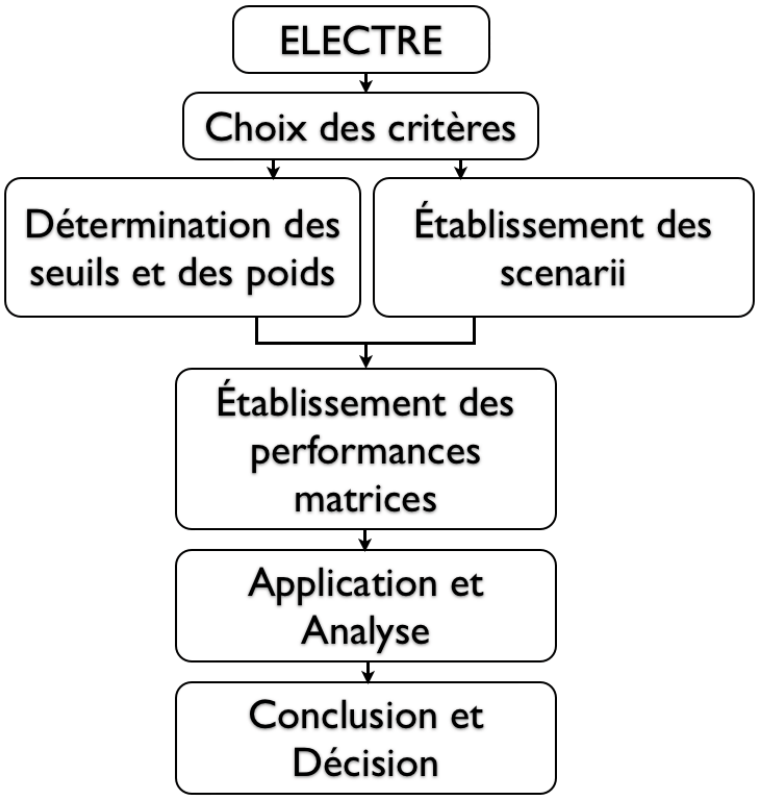


Figure 76 : Grille d'analyse

Dans notre recherche, nous allons utiliser une grille d'analyse selon la figure ci-dessus. Cependant, il est à noter que, comme la première application se déroule en utilisant les bases de données réellement obtenues auprès des AOT, il n'est pas nécessaire d'établir de scenario. Nous n'établissons ces scenarii qu'à partir de la deuxième application de la méthode ELECTRE, c'est-à-dire pour les cas allant de 5 à 20.

3. Choix des critères

Le choix des critères ou caractéristiques possibles pour évaluer les systèmes de transport en site propre entre eux est très important. Il tient compte des préoccupations majeures dans le domaine du transport public : la fiabilité, la disponibilité (elle est liée à la fréquence), la maintenabilité et la sécurité.

Dans le cadre d'une approche systémique, ces critères sont dépendants de chaque composant du système, par exemple, le matériel roulant, l'infrastructure et les équipements liés à l'exploitation. Le choix des critères est un enjeu majeur pour mieux apprécier plus ou moins objectivement les possibilités des systèmes dans le contexte urbain actuel.

En général, nous utilisons les critères suivants pour connaître les possibilités d'un système de transport :

- Le débit horaire pour analyser la différence du nombre de personnes transportées (capacité d'une ligne),
- La vitesse commerciale pour évaluer l'ensemble de la qualité de service y compris le pourcentage de site propre et l'accessibilité (fluidité des descentes et montées),
- Les longueurs de ligne avec l'espacement entre stations pour distinguer le temps de parcours,
- Les coûts d'investissement et d'exploitation pour traiter de l'aspect financier et économique, à court et à long terme, avec la contrainte de pénurie d'argent.

Cependant, il y a d'autres aspects qui ne sont pas traités et sont souvent ignorés, notamment des critères liés à la subjectivité des usagers. Dans notre recherche, nous nous intéressons non seulement aux critères présentés ci-dessus, mais aussi à ceux qui sont plus difficilement quantifiables pour analyser plus finement ces systèmes de transport en commun. Les méthodes multicritères ELECTRE III et IV utilisées permettent de prendre compte de ces aspects.

Dans notre recherche, après en avoir discuté avec différentes personnes du domaine du transport, nous découpons les critères en trois catégories principales :

- Critères liés aux performances et aux services rendus :
    - Fréquence,
    - Vitesse commerciale,
    - Ponctualité,
    - Emprise au sol,
    - Fiabilité,
    - Accessibilité,
- Critères liés aux coûts :
    - Coût d'investissement,

- Coût d'exploitation.

- Critères liés aux aspects « environnementaux » :
  - Gaz à Effet de Serre (GES),
  - Image de l'insertion.

3.1. Critères liés aux performances et aux services rendus

La performance des systèmes de transport est une mesure composite des caractéristiques du système de transport, en général quantitatives, telle que la capacité, la fréquence, la vitesse commerciale, la fiabilité et la productivité. Pour compléter notre panoplie, nous ajouterons les éléments jugés nécessaires pour assurer un bon fonctionnement des systèmes de transport souvent liés à la qualité de service rendue aux usagers : la ponctualité et l'accessibilité.

3.1.1. Capacité

La capacité est une valeur qui représente la prestation de transport maximale d'un moyen de transport. Selon le « Transit Capacity and Quality of service » de TCRP[45], on utilise normalement 2 catégories de la capacité :

- *« person capacity » : The maximum number of people that can be carried past a given location during a given time period under specified operating conditions ; without unreasonable delay, hazard, or restriction ; and with reasonable certainty. »*
- *« vehicle capacity » : The maximum number of transit vehicles (buses, trains, vessels, etc.) that can pass a given location during a given time period.*

Il est à noter que le service de transport public se concentre sur la réalisation du déplacement des personnes d'un endroit à l'autre. Contrairement au mode automobile, où un grand nombre de véhicules sont utilisés pour transporter un assez grand nombre de personnes, le transport en commun fonctionne en utilisant des véhicules en nombre limité pour transporter un grand nombre de personnes. En conséquence, la capacité de ce moyen est davantage axée sur le nombre de personnes qui peut être transporté dans un temps donné (capacité en places), plutôt que le nombre de véhicules utilisés (capacité en nombre de véhicules). Toutefois, la détermination du nombre maximal de véhicules qui peut être mis en service dans un temps donné est souvent une première étape nécessaire pour déterminer le nombre maximum de personnes qui peuvent être transportées (TCRP, 2003). Pour le transport public, la capacité exprimée en nombre de passagers / heure et / sens est majoritairement utilisée pour définir ou choisir l'offre de transport.

La capacité peut être déterminée simplement par le type de véhicule utilisé si la fréquence de la ligne et la vitesse commerciale sont fixées, bien entendu la longueur de

[45] TCRP : Transit Cooperative Research Program

ligne est donnée. D'une manière simplifiée, on peut calculer la capacité par la méthode suivante :

$$C = \frac{Ll}{Vc} \times \frac{60}{f},$$

$$Cp = C \times Cv$$

où, C : Capacité des véhicules (nombre de véhicules),

Ll : Longueur de ligne (km total),

Vc : Vitesse commerciale (km/h),

f : Fréquence (nombre de véhicule/h),

Cp : Capacité en passagers (nombre de personnes)

Cv : capacité d'un véhicule (nombre de personnes/véhicule, 4p/m^2).

Par ailleurs, comme la vitesse commerciale et la fréquence ont des limites, il est évident que la capacité a aussi une limite selon certaines conditions. La figure suivante montre cette limite théorique de la capacité.

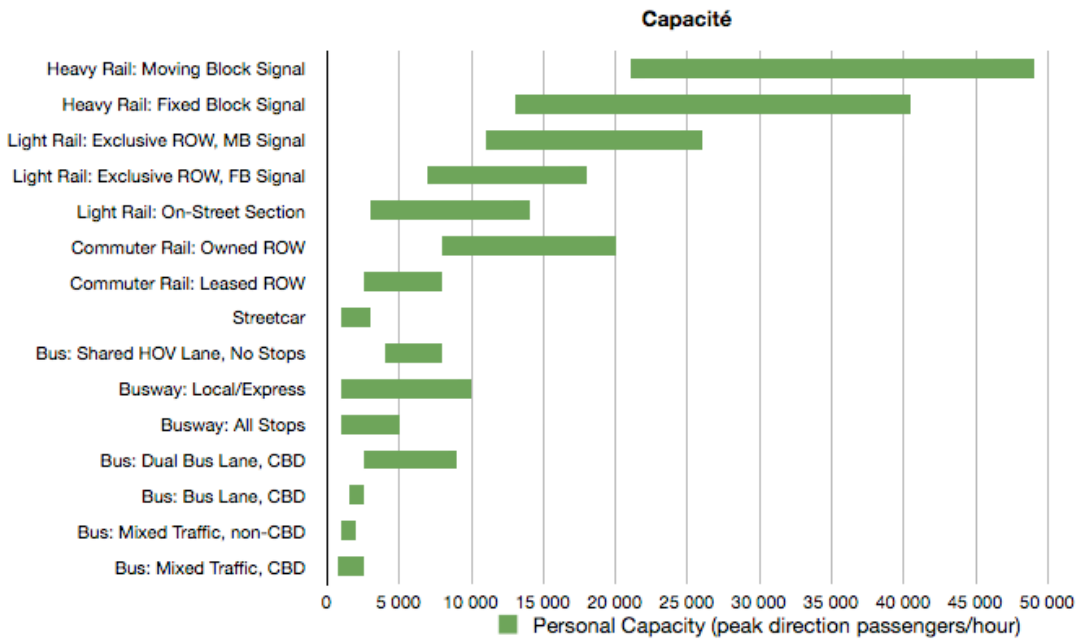


Figure 77: Capacité des systèmes de transport
(Source : TCQM)

Dans la pratique, on utilise *Cp* comme référence pour déterminer le niveau de service et comparer les systèmes. Nous allons suivre cette règle dans notre recherche pour être compatible.

Le tableau suivant montre la capacité d'un véhicule (unitaire) de chaque système de transport en site propre que nous avons retenu. Bien entendu il y a toujours un débat sur le choix de la capacité d'un système de transport. Nous avons choisi, pour tous les modes, la méthode calculée appliquant le principe de 4 personnes par mètre carré que le monde ferroviaire utilise généralement prenant en compte le confort des usagers.

	Capacité d'un véhicule (4p/m^2)
Tramway 45m	250 ou 300
Tramway 32m	200
Translohr	170
TVR	130
CIVIS	105
Trolleybus	105
Autobus articulé	105

Tableau 19: Capacité d'un véhicule
(reconstituée par l'auteur)

3.1.2. Fréquence

La fréquence est le nombre de véhicules circulant sur un itinéraire selon un horaire régulier par unité de temps. En pratique, on utilise ce terme de la manière suivante : le temps observé entre les véhicules qui passent régulièrement et successivement dans un endroit donné, soit le laps de temps qui s'écoule entre le passage de deux véhicules successifs (1/fréquence).

En théorie, une fréquence de 2 minutes est considérée comme un seuil d'exploitation afin de ne pas gêner le trafic antagoniste au niveau des carrefours. En pratique, la fréquence de 4 minutes à l'heure de pointe est normalement pratiquée pour les modes de transport de surface.

En règle générale, on emploie la fréquence pour mesurer le niveau de service et la qualité de service d'une ligne de transport. Elle influence aussi incontestablement la capacité d'une ligne ainsi que la capacité unitaire des rames choisies.

Ainsi, l'attractivité dépend pour partie de la fréquence. La fréquence en pratique, ne doit donc pas dépasser 6 minutes (maximum) à l'heure de pointe car plus elle devient grande plus les utilisateurs attendent pour prendre un véhicule, ce qui défavorise le niveau de service et en même temps, la qualité de service.

Dans notre recherche, nous allons fixer la fréquence de chaque système, d'une part pour faciliter la comparaison entre systèmes de transport, et d'autre part, pour exiger le même niveau de service des différents systèmes, niveau qui plus ou moins détermine la capacité de la ligne.

La figure suivante montre la capacité horaire en fonction de la fréquence selon les modes de transport de surface. En pratique, la fréquence se situe entre 3 et 7,5 minutes à l'heure de pointe.

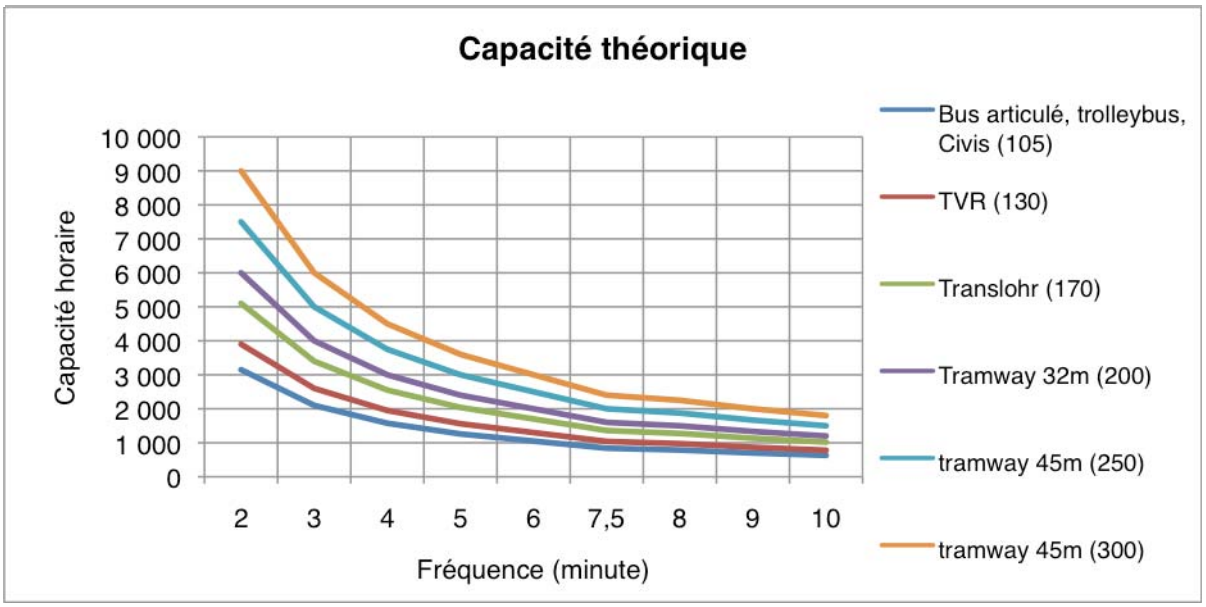


Figure 78: Capacité théorique en fonction de la fréquence

fréquences									
	2	3	4	5	6	7,5	8	9	10
Autobus articulé, trolleybus, Civis (105)	3 150	2 100	1 575	1 260	1 050	840	788	700	630
TVR (130)	3 900	2 600	1 950	1 560	1 300	1 040	975	867	780
Translohr (170)	5 100	3 400	2 550	2 040	1 700	1 360	1 275	1 133	1 020
Tramway 32m (200)	6 000	4 000	3 000	2 400	2 000	1 600	1 500	1 333	1 200
tramway 45m (250)	7 500	5 000	3 750	3 000	2 500	2 000	1 875	1 667	1 500
tramway 45m (300)	9 000	6 000	4 500	3 600	3 000	2 400	2 250	2 000	1 800

Tableau 20: Capacité théorique en fonction de la fréquence

3.1.3. Vitesse commerciale

La vitesse commerciale est une vitesse moyenne utile à l'usager. Elle peut être obtenue par un calcul, longueur de la ligne divisée par le temps de trajet y compris les temps d'arrêt en station.

$$v_c = \frac{l}{T_t}$$

où :

v_c : vitesse commerciale,

l : longueur de ligne,

T_t : temps total de trajet.

La vitesse commerciale est nécessaire d'une part, pour savoir l'efficacité d'une ligne de transport et la qualité de service, et d'autre part, pour déterminer le nombre de rames nécessaires et utilisées sur une ligne ce qui a une influence importante sur le coût d'exploitation. Elle est donc souvent considérée comme l'un des indicateurs primordiaux pour le service du transport public.

Pour comparer les différents systèmes de transport, d'un point de vue plus ou moins technique, nous allons supposer que la vitesse commerciale est déjà donnée et cela signifie que les différents systèmes de transport peuvent offrir le même niveau de service aux usagers. Cette tendance est constatée actuellement dans le domaine du transport public, notamment avec les modes de transport routier en introduisant le concept dit système « rail-like ».

La vitesse commerciale pour les systèmes de transport de surface, notamment le tramway est normalement autour 18-20 km/h que l'on prend comme objectif au début d'un projet de TCSP, cependant ce chiffre n'est pas toujours garanti et obtenu.

Selon l'annuaire statistique du Certu 2009 et l'AOT de chaque ville, la vitesse commerciale moyenne de chaque système pour l'année 2008 est donnée par le tableau suivant ; Toutefois, les vitesses commerciales du trolleybus et l'autobus articulé sont des estimations « à dire d'experts » résultant des consultations effectuées :

2008	Vitesse commerciale (km/h)
Tramway	19,5
Translohr	18
TVR	16,5
CIVIS	17,3
Trolleybus	16,5
Autobus articulé	16

Tableau 21: Vitesse commerciale des différents systèmes de transport
(Source : les AOT)

3.1.4. Ponctualité (on-time performance)

La ponctualité est une caractéristique de ce qui est conforme à l'horaire d'exploitation prédéfinie. Elle est étroitement liée à la qualité de service car elle influence le temps d'attente à l'arrêt pour les usagers.

La vie dans les villes contemporaines est assez stressante, et notre société attend pour le transport public des actions envisageables ou concevables comme la régularité ou plus exactement, la ponctualité. Les retards dans le trafic ne sont acceptables par les voyageurs que dans de rares cas. Il y a des modes de transport qui sont plus immunisés ou à l'abri de surcharges de trafic et de mauvais temps (généralement, le mode sur rails), et il y en a d'autres qui sont très vulnérables aux perturbations en milieu urbain (habituellement, le mode basé sur la technologie routière) (Grava 2004).

En règle générale, plus on réalise de site propre avec la priorité aux feux, ce qui est vrai dans la plupart des cas de système sur rails, plus la ponctualité est respectée. La ponctualité, donc, peut être un des critères nécessaires qui agit sur le niveau et la qualité de service sensiblement liés au choix des usagers et sur la discrimination entre les différents systèmes de transport.

La ponctualité peut donc se traduire en fonction du pourcentage de site propre qui est utilisée dans notre recherche comme l'un des critères importants. Pour la facilité du calcul, nous allons allouer une note pour chaque système en tenant compte de l'existence du guidage ou non et de l'intégralité ou pas de ce site propre. De plus, nous supposons que les modes ferroviaires sont légèrement plus performants du point de vue de la ponctualité par rapport aux modes routiers en raison de la présence du rail qui se distingue physiquement et est mieux respecté des automobilistes.

	Guidage	Ponctualité (% de site propre)	Note
Tramway 32m	Oui	Varie ou même niveau	90
Translohr	Oui		90
TVR	Oui		90
CIVIS	Oui en station		80
Trolleybus	Non mais contraint par la LAC		70
Autobus articulé	Non		70

Tableau 22: Ponctualité

3.1.5. Emprise au sol

L'emprise au sol qui est théoriquement en fonction de la largeur d'une rame/véhicule et du rayon de giration est fortement liée, d'une part à la capacité d'un véhicule car le gabarit de la rame est limité physiquement, et d'autre part à la condition de l'insertion dans un milieu urbain où l'espace est relativement rare.

Par ailleurs, l'équipement de guidage joue un rôle important pour l'emprise au sol parce que le guidage « physique » peut réduire le GLO au regard des systèmes non guidé.

Nous nous intéressons donc à l'emprise au sol en fonction de deux mesures, accompagnant la présence de guidage « physique » : le GLO et le rayon de giration. Mais pour notre analyse, nous nous contentons de ne prendre en compte que le GLO de

6 systèmes car, si le rayon de giration joue un rôle sensible sur des tracés difficiles avec plusieurs courbes et contre courbes, notre comparaison est effectuée sur un tracé classique majoritairement en alignement droit.

Véhicule	Guidage	GLO (m)	Rayon de giration (m)	Écart du GLO par rapport au autobus articulé (m)
Tramway 32 m	Oui	5,85	25	-0,95
Tramway 45 m	Oui	6,4	25	-0,4
Translohr	Oui	5,46	10,5	-1,34
TVR 3 caisses	Oui	6,14	12	-0,66
Trolleybus articulé	Non mais contraint par la LAC	6,8	12	0
CIVIS / Autobus articulé	Oui en station / Non	6,8	12	0

Tableau 23: Emprise au sol
(reconstitué par l'auteur)

3.1.6. Fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'un système ou d'un matériel, à fonctionner sans incidents pendant un temps donné. Pendant la durée de sa mission, il est normal qu'un système de transport fonctionne correctement et en sécurité en assurant le service prédéfini.

En ce qui concerne le système de transport, cela signifie qu'un système de transport doit effectuer fidèlement sa mission, transporter des gens de l'origine à la destination sans avoir de difficultés sauf un incident imprévu ou un accident inévitable. Ce critère comprend d'une part le matériel roulant et d'autre part le service de transport. Dans notre recherche, sous un angle technologique, on considère que tant que le matériel roulant est fiable, le service de transport est aussi bon.

Ce critère favorise un système sûr et relativement ancien par rapport à un nouveau système de transport qui n'est pas encore mature autrement dit qui n'est utilisé que dans certaines villes, par exemple. La fiabilité d'un système de transport repose donc beaucoup sur sa durée d'exploitation ou de l'utilisation qui permet de donner suffisamment de retour d'expérience.

La fiabilité et la sécurité sont les deux points principaux du domaine ferroviaire. Or aujourd'hui les autres systèmes de transport viennent du monde routier et ils ambitionnent d'assurer le même niveau d'exigence du transport public. Il est donc admis de compter la fiabilité comme un des critères pour comparer les systèmes de transport public dont le TCSP.

Dans notre recherche, nous allons utiliser la fiabilité de la manière suivante :

- La fiabilité est une fonction :
  - de la durée d'existence depuis la naissance du mode,
  - du nombre des villes où l'on trouve ce mode de transport,
  - de l'interruption de l'exploitation du système depuis sa mise en service.

Véhicule	Durée en années	Nombre de réseaux en France	Interruption	Total
Tramway	>100	15	Non	9
Translohr	<10	1	Non	8
TVR	<10	2	Oui	7
CIVIS	<10	1	Non	8
Trolleybus	>100	3	Non	9
Autobus articulé	80	>100	Non	9

Tableau 24: Fiabilité

3.1.7. Accessibilité

L'accessibilité, en général, est un indicateur destiné à mesurer les relations temporelles entre une origine et les destinations réparties dans l'espace. Cependant, dans notre recherche, c'est plutôt une notion pour mesurer le niveau de facilité d'échange au niveau du quai du transport public pour que l'usager puisse facilement embarquer et débarquer du véhicule, soit par l'installation d'équipements spécifiques soit par un aménagement spécial de l'infrastructure.

En règle générale, s'il y a moins de lacune entre le véhicule et le quai, le temps d'arrêt à la station diminue, et en conséquence, l'amélioration de la vitesse commerciale est acquise. De plus, en mettant plus l'accent sur l'accessibilité « physique », on favorise les personnes à mobilité réduite à utiliser le transport en commun sans trop de difficultés ce qui est un des buts sociaux du transport public.

Dans notre recherche, nous allons retenir uniquement l'accessibilité du niveau de quai et non pas l'accessibilité spatiale. Par exemple, si un mode de transport est capable d'offrir le « level boarding » ou embarquement à niveau, nous considérons que ce système a une bonne accessibilité. L'accessibilité utilisée est donc traitée d'une manière simple.

Véhicule	Embarquement à niveau	Total
Tramway	Oui	1
Translohr	Oui	1
TVR	Oui	1
CIVIS	Oui	1
Trolleybus	Non	0
Autobus articulé	Non	0

Tableau 25: Accessibilité

3.2.Critères liés aux coûts

Comme le développement des transports publics constitue un enjeu important dans les politiques des villes et des agglomérations, les aspects financiers sont très présents dans les décisions et les choix des systèmes de transport ou des technologies appropriées.

Le coût global lié à un projet d'un système de transport public est un élément essentiel qui influence considérablement le choix d'un projet par rapport aux autres aspects depuis toujours. Ce coût se décompose habituellement en 2 parties : le coût d'investissement et le coût d'exploitation. Les deux composantes du coût global n'ont pas le même poids économique selon les types de système de transport. Donc, l'approche habituelle qui consiste à rechercher le coût de construction le moins cher ne correspond pas à une bonne application pour choisir un "meilleur système de transport" dans un certain contexte donné. De plus, si l'on répartit tous les coûts sur la durée de fonctionnement du système de transport (Life Cycle Cost : LCC), le choix d'un système peut être différent.

La figure suivante montre un exemple de découpage de coût d'un tramway.

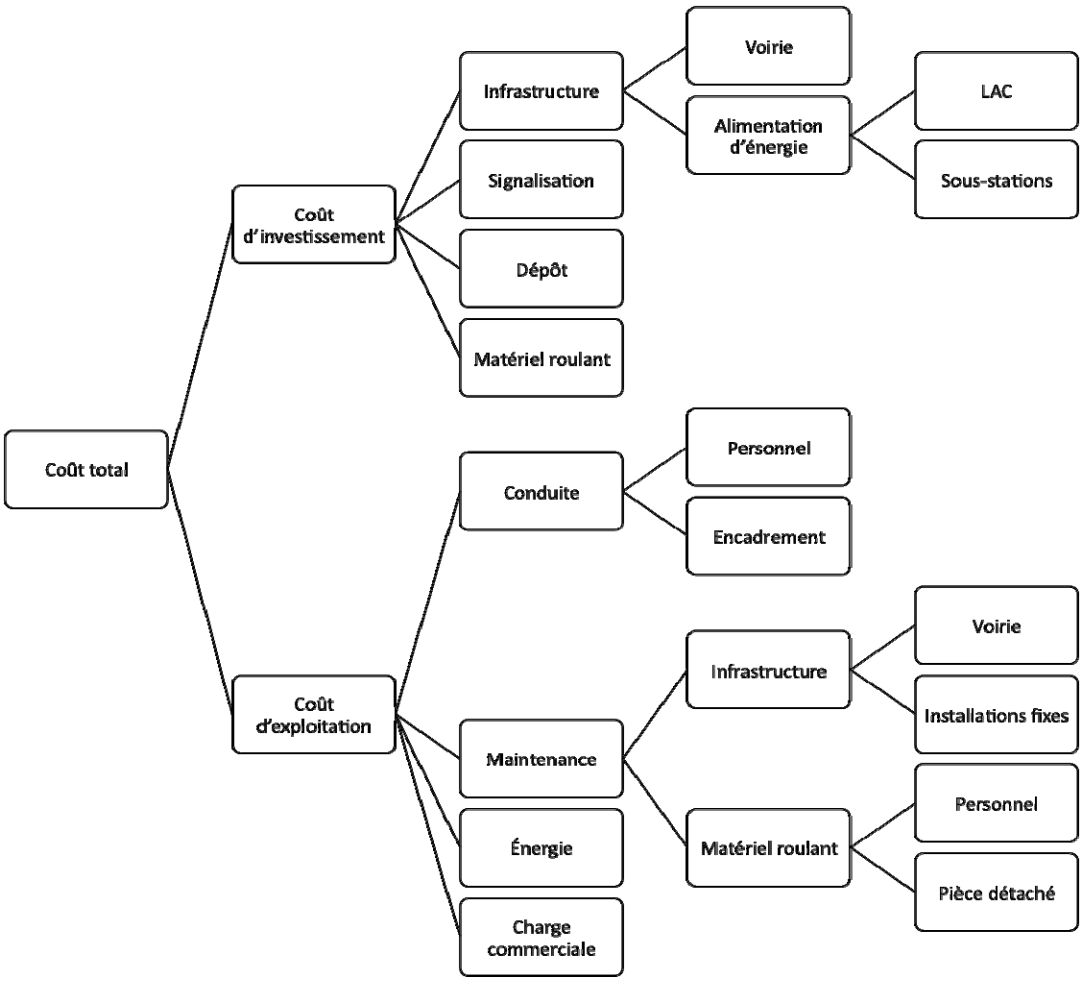


Figure 79: Structure des coûts d'un tramway
(Source : auteur)

3.2.1. Coûts d'investissement

Le coût d'investissement est le montant total nécessaire pour un projet depuis son origine, jusqu'à la conception, la réalisation et la mise en service. Il est normalement évalué en monnaie constante d'une date de référence, et englobe l'ensemble des dépenses engagées avant la mise en service. Le coût d'investissement comprend, en général, les coûts du foncier, les coûts d'études, les coûts d'accompagnement de la mission de maîtrise d'ouvrage (assistance à maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, contrôles, etc.), les coûts des travaux, les coûts d'équipement et du matériel roulant et les coûts financiers et frais divers (frais d'emprunt, taxes, assurances, etc.)

En ce qui concerne un système de transport, ce coût comprend :

- Coûts directs pour infrastructure : génie civil, équipements liés à l'exploitation y compris le dépôt atelier (75 à 80 %),
- Coûts indirects : terrain, frais administratifs, frais de maîtrise d'œuvre et aléas divers (20 à 25 %).

Les coûts de construction ou d'infrastructure dépendent des paramètres techniques, par exemple, technologie et conditions du site, etc. Cela est donc souvent sujet à polémique ou « une bonne excuse » pour un projet considéré comme étant trop cher par rapport au coût moyen d'un projet de transport.

Postes de dépenses	Montant total	Coût (€/km)
Maîtrise d'ouvrage		
Études		
Maîtrise d'œuvre travaux		
Acquisitions foncières et libération d'emprise		
Déviation de réseaux		
Travaux préparatoires		
Ouvrages d'art		
Plate-forme du site propre		
Revêtement du site propre		
Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés		
Alimentation en énergie de traction		
Voirie (hors site propre) et espaces publics		
Équipements urbains		
Signalisation		
Stations		
Courants faibles et PCC		
Dépôt		
Matériel roulant		
Opérations induites		
Parc relais - Pôle d'échange		
Aléas		
TOTAL		

Tableau 26: Répartition du coût par poste
(Source : Certu)

Il existe plusieurs découpages possibles et utilisés couramment, cependant, dans cette recherche nous allons nous contenter de détailler les postes de dépenses comme ce que la ville de Nantes a utilisé lors de son premier projet de tramway. De plus, ce découpage est largement utilisé dans plusieurs autres villes qui ont réalisé le TCSP.

Le tableau qui suit est un récapitulatif des coûts d'investissement des 6 systèmes de transport dont les coûts du trolleybus et de l'autobus sont calculés par l'auteur à partir du TVR de Caen et du CIVIS de Rouen. En effet nous n'avons pas d'informations sur de nouveau projet de trolleybus et d'autobus en site propre. Il est à noter que ces coûts ne sont pas des moyennes mais des coûts de cas précis.

	Tramway		Translohr		TVR		Civis		Trolleybus		Autobus	
2010	Valenciennes		Clermont-Ferrand		Caen		Rouen		Basé sur le TVR de Caen		Basé sur le CIVIS de Rouen	
km	9,4		14		15,7		24,5		15,7		24,5	
Postes de dépenses	Montant total (M€)	Coût (M€/km)	Montant total (M€)	Coût (M€/km)	Montant total (M€)	Coût (M€/km)	Montant total (M€)	Coût (M€/km)	Montant total (M€)	Coût (M€/km)	Montant total (M€)	Coût (M€/km)
Maîtrise d'ouvrage	33,8	3,33	44,6	3,19	14,7	0,93	7,86	0,32	6,2	0,4	7,86	0,32
Études	0,0	0,00	32,5	2,32	36,6	2,33	9,13	0,37	6,2	0,4	9,13	0,37
Maîtrise d'œuvre travaux	20,4	2,01	3,7	0,27	8,2	0,52	3,80	0,16	8,2	0,5	3,80	0,16
Acquisitions foncières et libération d'emprise	9,1	0,90	4,0	0,28	6,0	0,38	9,00	0,37	6,0	0,4	9,00	0,37
Déviation de réseaux	3,7	0,36	18,6	1,33	5,2	0,33	3,80	0,16	0,0	0,0	0,00	0,00
Travaux préparatoires	8,7	0,86	2,9	0,21	8,6	0,55	1,40	0,06	8,6	0,5	1,40	0,06
Ouvrages d'art	16,6	1,63	8,6	0,61	10,8	0,69	24,22	0,99	0,0	0,0	0,00	0,00
Plate-forme du site propre	21,7	2,13	23,3	1,67	22,0	1,40	6,98	0,28	12,4	0,8	6,98	0,28
Revêtement du site propre	0,0	0,00	23,6	1,68	0,0	0,00	12,43	0,51	0,0	0,0	12,43	0,51
Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés	31,2	3,07	2,0	0,14	21,8	1,39	1,65	0,07	0,0	0,0	0,00	0,00
Alimentation en énergie de traction	14,4	1,42	12,5	0,90	22,9	1,46	0,00	0,00	22,9	1,5	0,00	0,00

Voirie (hors site propre) et espaces publics	26,0	2,56	55,7	3,98	16,9	1,08	27,01	1,10	16,9	1,1	27,01	1,10
Équipements urbains	5,4	0,54	13,4	0,95	5,3	0,34	11,54	0,47	5,3	0,3	11,54	0,47
Signalisation	2,0	0,20	11,2	0,80	3,5	0,22	4,95	0,20	3,5	0,2	4,95	0,20
Stations	6,5	0,64	6,2	0,44	2,9	0,18	8,88	0,36	2,9	0,2	8,88	0,36
Courants faibles et PCC	22,0	2,17	12,1	0,86	15,0	0,96	15,60	0,64	15,0	1,0	15,60	0,64
Dépôt	22,4	2,21	14,4	1,03	4,5	0,29	0,63	0,03	4,5	0,3	0,63	0,03
Matériel roulant	37,2	3,66	50,5	3,61	50,0	3,18	21,56	0,88	33,3	2,1	19,02	0,78
Opérations induites	5,6	0,55	0,0	0,00	4,8	0,31	11,29	0,46	4,8	0,3	11,29	0,46
Parc relais - Pôle d'échange	20,8	2,04	0,0	0,00	1,4	0,09			1,4	0,1		
Aléas	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0,00
TOTAL	307,6	30,26	339,8	24,27	261,0	16,62	181,74	7,42	158,2	10,1	149,53	6,10

Tableau 27: Coût d'investissement des 6 systèmes de transport
(Source : Certu, AOT et auteur)

3.2.2. Coûts d'exploitation

Le coût d'exploitation rassemble l'ensemble des coûts liés à la production du service de transport, c'est-à-dire toutes les dépenses effectuées après la mise en service d'un projet de transport pour exploiter normalement et en toute sécurité le système.

Le coût d'exploitation comprend le coût de maintenance (entretien courant, maintenance préventive, maintenance curative, gros entretien et renouvellement des équipements), le coût de conduite, le coût de consommation d'énergie et les autres dépenses nécessaires au fonctionnement du service de transport.

La méthode retenue pour cette recherche est proche de celle utilisée pour l'étude sur les coûts d'exploitation des systèmes de transport lourd et guidé, par exemple le métro. Les principes sont les deux suivants :

- Isoler les coûts directement liés à l'exploitation du système de transport,
- Classer les coûts par nature et fonction mais aussi par destination (voies, stations, matériel roulant, etc.) pour permettre les comparaisons relativement facile et claire entre systèmes.

Le détail de la méthode se poursuit par :

- Les impôts et taxes, les amortissements de toute nature sont exclus.
- Les coûts d'exploitation sont classés par **nature et fonction** :
  - Les regroupements par nature :
    - Frais de personnel,
    - Consommation d'énergie,
    - Entretiens sous-traitance,
    - Autres achats et services extérieurs,
    - Pièces détachées.
  - Les différentes fonctions sont les suivantes :
    - Opérations (exploitation proprement dite) :
      - Agents de station et d'opérations en ligne, contrôleur,
      - Conducteurs,
      - Agents au PCC,
      - Énergie de traction et alimentation électrique des équipements de voie, de station, du PCC.
    - Maintenance :
      - Entretien des installations fixes :
        - Entretien de la voie, des stations et PCC, ateliers,
        - Entretien de la signalétique (voie et stations),

- Entretien des équipements électriques (énergie de traction),
- Entretien des équipements électroniques (signalisation, télécommunications, vidéo, distributeurs, etc.),

- Entretien du matériel roulant :
  - Entretien caisses et traction,
  - Entretien de la signalétique,
  - Entretien des automatismes embarqués.

➢ Pour chaque croisement nature et fonction, les charges sont réparties selon qu'elles soient liées :
  - Au kilométrage de voies,
  - Au nombre de stations,
  - Au kilométrage voiture réalisé.

Après avoir adapté cette méthodologie, nous avons obtenu une structure du coût d'exploitation présentée ci-dessous. Ce découpage n'est pas absolument obligatoire et peut varier selon les cas de plusieurs manières différentes. Néanmoins, il est à noter que, même si les découpages ne sont pas homogènes, le coût total d'exploitation reste toujours inchangé.

Poste de dépense		Montant total	Coût (€/km)	%
Personnel	Exploitation			
	Maintenance			
	Structure			
Énergie	Véhicules (traction et autres)			
	Bâtiment			
Entretien sous-traitance	Matériel roulant			
	Voie			
	Stations			
	Ligne aérienne			
	Sous-stations			
	Courant faible, signalisation			
	Bâtiments - Espaces verts			
Autres achats et services extérieurs	Assurance			
	Marketing			
	Gardiennage			
	Dotation vestimentaire			
	Collecte de fonds			
	Autres charges			
Pièces détachées	Matériel roulant			
	Installations fixes			
TOTAL				

Tableau 28: Découpage du coût d'exploitation
(Source : Certu)

À titre d'exemple, « en part relative », la fonction d'exploitation représente environ la moitié du coût total d'exploitation, l'entretien des installations fixes environ 15% et l'entretien du matériel roulant environ 35%.

3.2.2.1. La consommation d'énergie

La consommation d'énergie peut être mise soit dans le coût d'exploitation soit dans le critère lié à l'environnement. Cependant, dans notre recherche, en vue de faciliter le calcul, nous avons décidé de la placer dans le coût d'exploitation, méthode largement pratiquée.

Nous donnons néanmoins comme information supplémentaire, l'efficacité énergétique de chaque système de transport :

	Consommation d'énergie
Tramway 32m	3,4 kWh/km/rame
Tramway 45m	4,0 kWh/km/rame
Translohr	3,3 kWh/km/rame
TVR	4,2 kWh/km/rame et 1,63 l/km/rame
Civis	0,7 l/km/rame
Trolleybus standard	3,7 kWh/km/rame
Trolleybus articulé	4,0 kWh/km/rame
Autobus standard	0,5 l/km/rame
Autobus articulé	0,7 l/km/rame

Tableau 29: Consommation d'énergie des différents systèmes de transport
(Source : constructeurs)

3.3.Critères liés aux impacts « environnementaux »

3.3.1.Émission du gaz à effet de serre

Un « gaz à effet de serre » est tout simplement un gaz qui participe à l'effet de serre qui influence le changement climatique par exemple. C'est un gaz qui se présente dans l'atmosphère terrestre et qui intercepte les infrarouges émis par la surface terrestre. Il y a deux types de gaz à effet de serre: les gaz « naturels » et les gaz « industriels ».

Les gaz « naturels »

Les deux principaux gaz responsables de l'effet de serre de la Terre, depuis la naissance de notre planète sont :

- la vapeur d'eau (H_2O),
- le gaz carbonique (CO_2).

Outre la vapeur d'eau et le gaz carbonique, les principaux gaz « naturels » à effet de serre sont :

- le méthane (CH_4),
- le protoxyde d'azote (N_2O),
- l'ozone (O_3).

Ces gaz sont « naturels », mais ceci ne signifie pas que l'homme n'a pas d'influence sur leurs émissions ou sur leur concentration dans l'atmosphère. Pour les 3 gaz mentionnés ci-dessus, comme pour le CO_2, il est vrai que l'homme ajoute sa part et contribue à leur concentration dans l'air. C'est la raison pour laquelle on essaie de réduire leur émission qui participe au changement climatique. Le protocole de Kyoto est l'un des exemples significatifs pour cette action dans le monde entier.

Les gaz « industriels » ou artificiels

A côté des gaz existant naturellement, il y en d'autres, que nous pouvons fabriquer artificiellement : il s'agit de gaz industriels qui ne sont présents dans l'atmosphère qu'à cause de l'homme. Les principaux gaz « industriels » à effet de serre sont les halo-carbures ($C_xH_yHal_z$ où Hal représente un ou plusieurs halogènes) : il s'agit d'une vaste familles de gaz obtenus en remplaçant, dans une molécule d'hydrocarbure que l'on trouve souvent dans l'essence, de l'hydrogène par un gaz halogène (le fluor, le chlore...). Les molécules de ces gaz absorbent très fortement les infrarouges, beaucoup plus que le gaz carbonique à poids égal et certaines d'entre elles sont très "solides", cela signifie que seule la partie la plus forte du rayonnement solaire (les ultraviolets et les rayons cosmiques) peut pénétrer à travers ces molécules. Une famille particulière d'halo carbures, les CFC, a la double propriété de contribuer à l'augmentation de l'effet de serre, mais aussi de diminuer la concentration de la « couche d'ozone ». La production de ces gaz est désormais interdite (ou en cours d'éradication), au titre du protocole de Montréal signé en 1987, qui ne concerne pas les autres gaz à effet de serre.

Il existe également un autre gaz industriel que l'on mentionne souvent dans les milieux spécialisés, l'hexafluorure de soufre (SF_6). Il est utilisé par exemple pour les applications électriques (transformateurs) et les doubles vitrages. Il n'est pas émis en grande quantité mais est encore plus absorbant pour les infrarouges et résistant à la partie la plus dure du rayonnement solaire que les halo-carbures.

Dans cette recherche, nous allons utiliser le résultat d'une étude de l'ADEME pour appliquer le critère de l'émission de ces gaz. Par contre, il est à noter que le taux d'émission de GES n'est pas en valeur absolue mais relative entre les différents systèmes.

Dans le cadre de l'étude d'ADEME, les émissions spécifiques considérées sont l'ensemble des gaz à effet de serre lors de la phase amont et les émissions de CO_2 lors de la phase d'utilisation pour l'ensemble des modes de transport ainsi que les émissions de particules, NO_x, SO_2, et d'hydrocarbures de la phase de production des carburants et de leur utilisation uniquement pour les modes de transport routier (Vidalenc 2008).

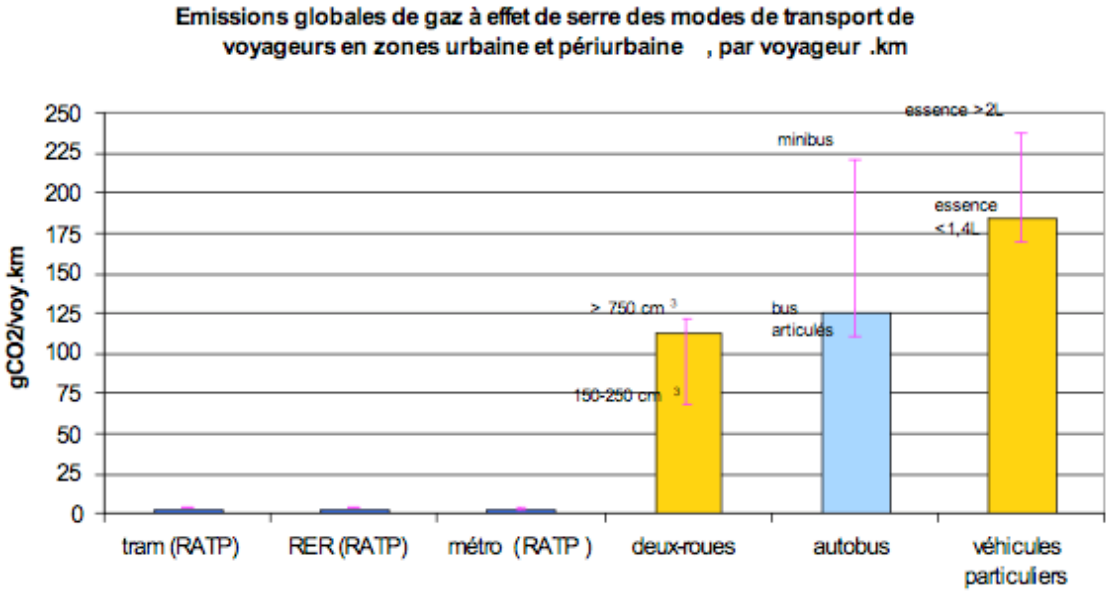


Figure 80: Émission globales de GES des modes de transport
(Source : Vidalenc 2008)

Si l'on regarde les émissions GES du tramway et de l'autobus articulé, ils sont de l'ordre de grandeur 5 et 110 gCO_2/voyageur·km[46]. Ce qui montre, en gros, l'avantage de l'utilisation d'électricité par rapport au carburant. Cependant, avec l'introduction du taux d'occupation, ces chiffres peuvent considérablement varier notamment pour le cas de l'autobus.

[46] En titre d'exemple, en moyenne un Français émet 6 tonnes de CO_2 par an, un Américain 20, et un Ghanéen 0,4.

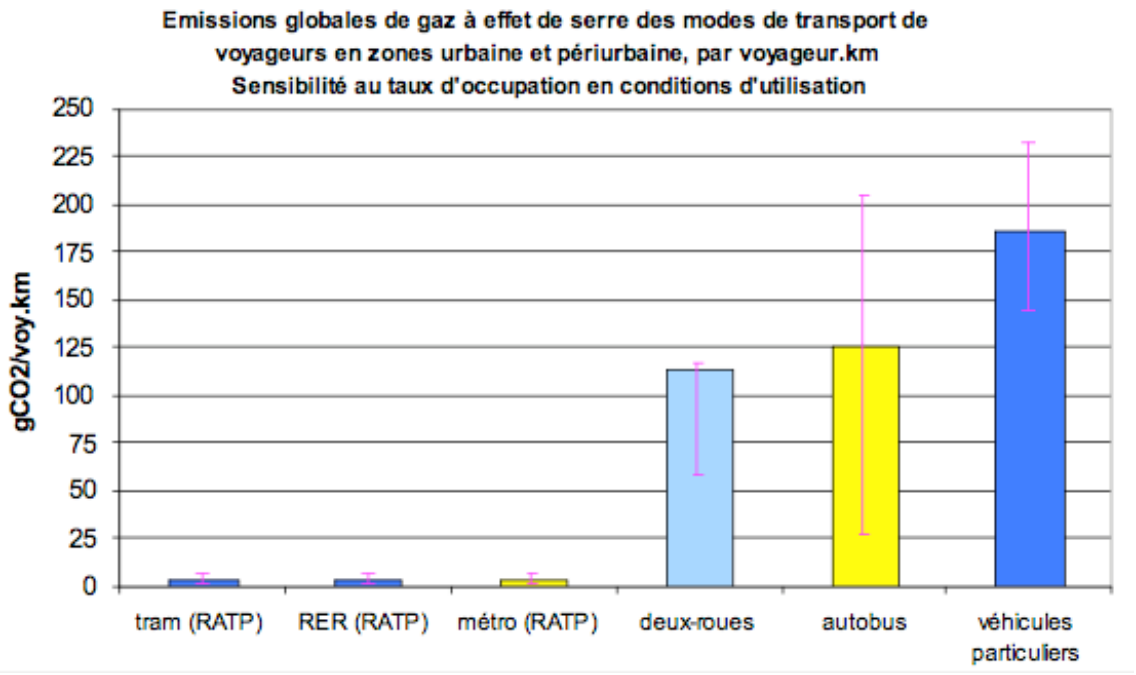


Figure 81: Émission globales de GES des modes de transport avec sensibilité au taux d'occupation
(Source : Vidalenc 2008)

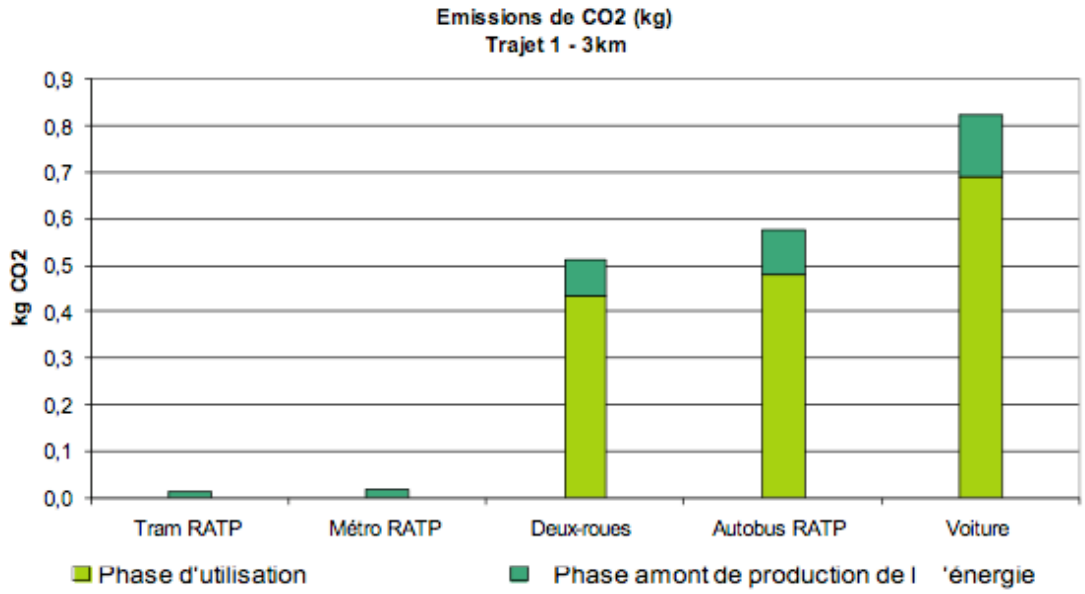


Figure 82: Émission de CO2 des modes de transport
(Source : Vidalenc 2008)

Après avoir étudié les résultats obtenus l'ADEME, nous n'avons donc retenu que l'émission de GES pour le tramway et l'autobus qui nous semblent les représentants des modes de transport fer et routier. Les valeurs que nous avons conservées sont celles de

la phase d'utilisation : celle du tramway est zéro et celle de l'autobus est 480 g CO_2/véhicule·km. Cela signifie qu'on va utiliser le chiffre du tramway pour les systèmes de transport qui utilisent l'électricité et le chiffre de l'autobus articulé pour ceux qui utilisent le carburant en tant qu'énergie de traction.

En ce qui concerne le prix de CO_2, nous suivons la recommandation du rapport Boiteux II : 100 €/tonne de carbone. Ce qui donne le prix de la tonne de CO_2 de 27,3 €, puisque le poids de carbone dans les CO_2 est 12/44.

Véhicule	Émission CO_2 (gCO2/véhicule·km)	Émission total (tCO2/véhicule/an)	Coût total (€/an)	Coût total (€/voyage)
Tramway	0	0	0	0,000
Translohr	0	0	0	0,000
TVR	48	78	42 667	0,007
CIVIS	480	781	426 666	0,080
Trolleybus	0	0	0	0,000
Autobus	480	781	426 666	0,080

Tableau 30: Émission de CO2
(Source : auteur)

Nous supposons en outre que la part d'utilisation de gazole du TVR est 10 % de trajet total.

3.3.2. Critères urbanistique : image de l'insertion

Le choix de ce critère urbanistique est un regard sur l'insertion urbaine qui favorise l'obtention d'une image positive ou d'une qualité de vie meilleure pour une ville où le projet de TCSP se réalise. Ce critère est sujet à subjectivité et fluctue significativement en fonction des attentes du décideur. Néanmoins, il est intéressant et même nécessaire de l'introduire dans notre recherche pour distinguer chaque système de transport selon son « impact » sur l'aménagement de la ville.

Un « bon » aménagement est avant tout celui qui assure la diversité sociale, fonctionnelle, culturelle de la ville, ainsi que sa capacité à évoluer et à se renouveler. Et un « bon » système de transport est essentiel pour accomplir ce « bon » aménagement.

Par exemple, d'après la réalisation de 2 lignes de tramway à Nantes, la ville de Nantes a perçu l'insertion comme suit:

> *D'une manière générale, l'intégration des deux lignes de tramway a nécessité la recomposition de l'espace urbain dans lequel elles venaient s'insérer, se traduisant notamment par le partage de la voirie et l'aménagement d'espaces publics à dominante piétonnière. Cela permet entre autres de retrouver des logiques anciennes, de faire réapparaître la structure urbaine, de renforcer la cohérence et la lisibilité des espaces parcourus.*

Il apparaît ainsi que la réalisation du tramway a permis de déclencher ou d'accélérer des opérations d'urbanisme visant à requalifier certains quartiers, à recréer des pôles urbains d'attraction à proximité de la ligne.

En ce qui concerne la nature des constructions réalisées le long des lignes de tramway on constate : pour la première ligne, une prédominance des équipements de services, culturels, de sports et loisirs (un tiers des opérations et 55% de la SHON[47]) et la forte présence de logements (la moitié des opérations et 37% de la SHON) ; pour la deuxième ligne, un plus grand équilibre des opérations avec prédominance de l'enseignement supérieur (31% de la SHON).

Les programmes de construction le long du tramway laissent ainsi apparaître une forte dominante d'équipements publics ou d'enseignement supérieur, qui contribuent à renforcer le caractère structurant du tramway et, par l'effort consenti par la puissance publique, à entraîner l'investissement privé (AURAN 1998).

Par ailleurs, les systèmes de transport et de services sont l'image publique d'une communauté vis-à-vis des utilisateurs et de l'extérieur. Tout le monde vient en contact avec eux, et ils sont généralement la première chose que le visiteur de l'extérieur va rencontrer. Ce sont des éléments de fierté civique dans la plupart des cas, et ils montrent l'esprit de sérieux qui est souvent appliqué à la création d'une communauté conviviale et efficace. Mais cette fierté peut devenir l'orgueil voire « un délire », et il y a des cas dans lequel des solutions de transport ont été mises en œuvre pour des raisons autres que la nécessité fonctionnelle. Cela ne devrait pas arriver dans la ville contemporaine car il y a la connaissance et le potentiel pour comprendre la capacité des modes de transport. Il y a des raisons légitimes pour accepter les systèmes de transport qui répondent aux besoins et aux capacités d'une communauté et à être fier de ce qui fonctionne bien (Grava 2004).

Dans notre recherche, nous avons donc retenu l'aspect d'aménagement comme un des critères importants. Même s'il n'y a pas de vrai consensus, un projet TCSP a des effets sur la ville à long-terme. Ainsi, cette image plus ou moins subjective peut être traitée en utilisant la méthode ELECTRE comme critère de véto par exemple.

Le tableau suivant indique la note de chaque mode de transport donnée en distinguant le guidage et la tendance en France :

Véhicule	Image de l'insertion
Tramway	9
Translohr	9
TVR	7
CIVIS	6
Trolleybus	6
Autobus	5

Tableau 31: Image de l'insertion des différents systèmes de transport
(Source : auteur)

[47] SHON : Surface Hors Œuvre Nette.

4. Pondération des poids

L'utilisation de méthodes agrégatives a pour objet de synthétiser le problème afin de permettre une vision globale. Cette simplification implique fréquemment une modification et une perte d'information plus ou moins importante en fonction de la méthode utilisée[48]. Malgré cet inconvénient, ces méthodes agrégatives sont demandées dans de nombreux cas par les décideurs, et nous avons noté que c'est u atout l'analyse socio-économique. Or cette agrégation demande un travail difficile : la détermination des poids de chaque critère impliqué. La détermination de l'importance d'un critère par rapport à un autre est un enjeu majeur à la fois technique et politique.

Pictet et Bollinger (1999) insistent sur le fait que, selon la méthode d'agrégation employée, l'importance des critères peut représenter :

- des poids, au sens intuitif du terme, pour les méthodes d'agrégation partielle,
- des constantes d'échelle, pour les méthodes d'agrégation totale, qui recouvrent en fait deux notions : d'une part les poids et d'autre part, la relation entre les échelles des critères, ce qui rajoute, en théorie, une difficulté supplémentaire à la définition des pondérations dans ces méthodes.

Nous appelons poids la mesure de l'importance relative entre les critères telle qu'elle est vue par le décideur. D'après Pomerol (Pomerol et Barba-Romero 1993), il est assez courant en analyse multicritère, que le décideur pense spontanément qu'un critère est plus important qu'un autre, pour des raisons diverses, parmi lesquelles ses préférences personnelles (raisonnablement objectives ou complètement subjectives).

Néanmoins, cette mesure n'est pas toujours déterminée facilement par le décideur dans bien des situations, et des méthodes pour évaluer les poids des critères (Pomerol et Barba-Romero 1993, Roy 1985, Maystre, Pictet et al. 1994) sont développées pour pallier cette difficulté. Parmi ces méthodes nous en citons quelques unes :

- Attribution de scores, par exemple la répartition de 100%,
- Comparaison par paire,
- Analyse de jugement en utilisant des échelles, par exemple, de 1 à 10 ou 1 à 100,
- Valeurs attendues,
- Technique du « jeu de carte »,
- Arbre des pondérations.

Pour appliquer ELECTRE III, nous avons besoin de pondérer les poids de chaque critère qui jouent de temps en temps un rôle important voire décisif pour une procédure de décision. Jusqu'à aujourd'hui, il n'existe pas de méthode qui affecte des poids de critères en chiffre absolu dans un domaine de transport parce que chaque projet est

[48] Il est à noter que la méthode ELECTRE ne modifie pas les informations et les garde jusqu'au bout.

considéré différent et chaque décideur a une manière différente de juger sa préférence sauf en cas de décision tout à fait évidente et n'ayant pas d'alternative.

Dans cette recherche, comme il n'y a pas de consensus ni de méthode de référence, nous allons premièrement choisir les poids de référence pour chaque critère donné, fixer ces poids par simple utilisation de la méthode de l'attribution de score, et puis les faire varier avec bon sens pour vérifier si cette allocation est valable.

Nous avons choisi les critères selon trois catégories : Performance, Coûts et Environnement. Pour simplifier, nous fixerons en conséquence le choix du score total à la valeur 300. Donc il est naturel, d'abord, de penser à affecter le poids pour mettre l'accent sur l'une des catégories par rapport aux deux autres. Cependant, il existe, dans la pratique, des critères jugés plus importants que les autres tels que la capacité, le coût d'investissement et le coût d'exploitation. La méthode que nous avons retenue est de donner plus de poids sur ces critères jugés plus importants, les autres critères étant définis de manière complémentaire pour atteindre le score fixé. Cela implique que le poids des coûts et de la capacité sont toujours plus grands que les autres pour le poids de référence.

Par exemple, supposons que nous choisissons un des systèmes de transport sous prétexte que le niveau de service attendu est fixé (fréquence, la vitesse commerciale et la ponctualité). Pour offrir ce service, nous observons généralement les coûts avec la contrainte de la capacité et les caractéristiques physiques des systèmes. Cette application va être utilisée dans la partie scenario.

Critères		Poids de référence	Poids 1	Poids 2	Poids 3
Performance	Capacité	50	50	40	40
	Fréquence	20	20	10	10
	Vitesse commerciale	30	20	10	10
	Ponctualité	20	30	20	20
	Emprise au sol	10	30	20	10
	Fiabilité	10	10	10	10
	Accessibilité	10	20	10	10
	sous-total	150	180	120	110
Coûts	Coût d'investissement	50	40	70	40
	Coût d'exploitation	50	40	70	40
	sous-total	100	80	140	80
Environnement	GES	25	20	20	50
	Image de l'insertion	25	20	20	60
	sous-total	50	40	40	110
	Total	300	300	300	300

Tableau 32: Pondération des poids

5. Récapitulatif des critères

Le tableau suivant montre tous les critères finalement retenus pour notre recherche comparative :

Critères		Unité	Poids référence
Performance	Capacité	Capacité horaire ou capacité annuelle	50
	Fréquence	Minutes	20
	Vitesse commerciale	Km/h	30
	Ponctualité	pourcentage de site propre	20
	Emprise au sol	m	10
	Fiabilité	1-10	10
	Accessibilité	1 ou 0	10
Coûts	Coût d'investissement	€/km	50
	Coût d'exploitation	€/km parcourus ou €/an	50
Environnement	GES	gCO_2/véhicule·km ou tCO_2/an	25
	Image de l'insertion	1-10	25

Tableau 33: Récapitulatif des critères

6. Application de la méthode ELECTRE III et IV pour le choix d'un système de transport

L'objet de ce chapitre est de comparer les 6 systèmes de transport de surface, d'une part en utilisant les données réelles, et d'autre part en fondant des scenarii que nous souhaitons traiter avec des contextes différents. Le logiciel que nous utilisons est fourni par LAMSADE[49].

6.1. Application des données réelles moyennes

Avant de regarder les scenarii, nous allons comparer les 6 systèmes de transport de surface en utilisant les bases de données réelles.

Les données que nous utilisons ont été obtenues et recueillies entièrement près des AOT[50] de villes françaises: Bordeaux, Caen, Clermont-Ferrand, Grenoble, Le Mans, Limoges, Lyon, Montpellier, Mulhouse, Nantes, Nancy, Orléans, Paris, Rouen, Strasbourg et Valenciennes. Le tableau ci-dessous montre ces données pour le système de transport et pour les villes d'où ces données proviennent. Les données utilisées sont des moyennes si les données proviennent de plusieurs villes sinon une valeur représentative car la donnée vient d'une seule ville.

Systèmes de transport public	Villes
Tramway	Bordeaux, Grenoble, Le Mans, Lyon, Montpellier, Mulhouse, Nantes, Orléans, Paris, Strasbourg, Valenciennes
Translohr (Tramway sur pneu)	Clermont-Ferrand
TVR	Caen, Nancy
CIVIS	Rouen
Trolleybus	Lyon, Limoges
Autobus	Grenoble, Lyon

Tableau 34: Origine des bases de données

Tous les critères sont définis et indiqués dans la partie précédente. S'agissant des coûts d'investissement et d'exploitation, nous les présentons dans la partie suivante.

[49] LAMSADE : Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision www.lamsade.dauphine.fr)
[50] AOT : Autorité Organisatrice des Transports.

6.1.1. Tramway 32 m

6.1.1.1. Coût d'investissement

Le coût d'investissement y compris matériel roulant que nous avons obtenu provient des données de l'AOT de chaque ville que le tableau suivant représente :

	M€/km (2010)	Remarques
Bordeaux A	33,00	Citadis 402
Grenoble LA	26,76	TFS
Le Mans	24,77	Citadis 302
Lyon T1	25,78	Citadis 302
Marseille T1	33,04	Flexity Outlook
Montpellier L1	30,08	Citadis 401
Montpellier L2	26,82	Citadis 302
Mulhouse	23,45	Citadis 302
Nantes L1	18,11	TFS
Nantes L2	30,50	Incentro
Nice L1	38,90	Citadis 302
Orléans L1	22,05	Citadis 301
Paris T1	33,87	TFS
Paris T2	17,12	Citadis 302
Paris T3	40,74	Citadis 402
Rouen L1	56,38	TFS
Strasbourg A&D	39,33	Citadis 403
Strasbourg B&C	27,05	Eurotram
Valenciennes	30,26	Citadis 302
Moyen	**30,43**	

Tableau 35: Coût d'investissement des tramways en France
(calculé par l'auteur)

Cependant, pour le coût d'investissement du tramway 32 m, on a éliminé les 4 réseaux dont les coûts sont hors norme (construction de souterrain, embellissement et travaux archéologique, etc.). Le tableau suivant montre les coûts d'investissement des villes où l'on utilise les tramways 32 m comme matériel roulant, ce qui donne un coût moyen d'investissement de 27,41 M€.

Tramway 32 m	M€/km (2010)
Grenoble LA	26,76
Le Mans	24,77
Lyon T1	25,78
Marseille T1	33,04
Montpellier L2	26,82
Mulhouse	23,45
Nantes L2	30,50
Orléans L1	22,05
Paris T1	33,87
Strasbourg B&C	27,05
Valenciennes	30,26
Moyen	**27,41**

Tableau 36: Coût d'investissement des tramways 32 m en France
(calculé par l'auteur)

6.1.1.2. Coût d'exploitation

Par contre, le coût d'exploitation n'a été obtenu auprès des AOT que pour les réseaux de Lyon et Grenoble. L'annuaire statistique 2009 de Certu, « Transports collectifs urbains » ne donne que le montant global tous modes confondus pour un réseau donné, ce qui ne nous permet pas de connaître le coût d'exploitation de chacun des modes.

	€/km (2010)
Lyon	7,00
Grenoble	7,47
Moyenne	**7,24**

Tableau 37: Coût d'exploitation du tramway 32 m
(calculé par l'auteur)

6.1.2. Translohr

De la même façon que précédemment, nous donnons les coûts d'investissement et d'exploitation obtenus seulement auprès de l'AOT de Clermont-Ferrand car actuellement c'est la seule ligne en exploitation en France (deux lignes sont en construction en Île-de-France).

6.1.2.1. Coût d'investissement

Le coût d'investissement du Translohr est indiqué selon le tableau suivant :

2010	Translohr (Clermont-Ferrand)	
km	14	
Postes de dépenses	Montant total (M€)	Coût (M€/km)
Maîtrise d'ouvrage	44,6	3,19
Études	32,5	2,32
Maîtrise d'œuvre travaux	3,7	0,27
Acquisitions foncières et libération d'emprise	4,0	0,28
Déviation de réseaux	18,6	1,33
Travaux préparatoires	2,9	0,21
Ouvrages d'art	8,6	0,61
Plate-forme du site propre	23,3	1,67
Revêtement du site propre	23,6	1,68
Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés	2,0	0,14
Alimentation en énergie de traction	12,5	0,90
Voirie (hors site propre) et espaces publics	55,7	3,98
Équipements urbains	13,4	0,95
Signalisation	11,2	0,80
Stations	6,2	0,44
Courants faibles et PCC	12,1	0,86
Dépôt	14,4	1,03
Matériel roulant	50,5	3,61
Opérations induites	0,0	0,00
Parc relais - Pôle d'échange	0,0	0,00
Aléas	0,0	0,00
TOTAL	**339,8**	**24,27**

Tableau 38: Coût d'investissement du Translohr
(calculé par l'auteur)

6.1.2.2. Coût d'exploitation

En ce qui concerne le coût d'exploitation de Translohr STE4 de Clermont-Ferrand par rapport à celui du tramway, nous avons trouvé que ces deux coûts sont relativement équivalents. Or il reste encore une marge de réduction du coût d'exploitation possible de Translohr après quelques années de l'exploitation.

	€/km (2010)
Clermont-Ferrand	7,30

Tableau 39: Coût d'exploitation du Translohr 32 m
(calculé par l'auteur)

6.1.3. TVR

6.1.3.1. Coût d'investissement

Pour le coût d'investissement du TVR actuellement deux lignes sont en exploitation sur deux réseaux différents en France, nous avons obtenus les deux coûts. Ce qui donne le coût moyen d'investissement de 16,51 M€/km.

	TVR		TVR	
2010	Nancy		Caen	
km	11		15,7	
Postes de dépenses	Montant total (M€)	Coût (M€/km)	Montant total (M€)	Coût (M€/km)
Maîtrise d'ouvrage	3,7	0,33	14,7	0,93
Études	4,1	0,37	36,6	2,33
Maîtrise d'œuvre travaux	5,5	0,50	8,2	0,52
Acquisitions foncières et libération d'emprise	0,9	0,08	6,0	0,38
Déviation de réseaux	11,7	1,06	5,2	0,33
Travaux préparatoires	3,8	0,35	8,6	0,55
Ouvrages d'art	10,3	0,93	10,8	0,69
Plate-forme du site propre	9,4	0,85		
Revêtement du site propre	6,8	0,62	22,0	1,40
Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés	11,4	1,04	21,8	1,39
Alimentation en énergie de traction	15,5	1,41	22,9	1,46
Voirie (hors site propre) et espaces publics	18,9	1,72	16,9	1,08
Équipements urbains	13,1	1,19	5,3	0,34
Signalisation	4,6	0,42	3,5	0,22
Stations	5,2	0,47	2,9	0,18
Courants faibles et PCC	0,3	0,02	15,0	0,96
Dépôt	4,7	0,43	4,5	0,29
Matériel roulant	39,6	3,60	50,0	3,18
Opérations induites	3,8	0,35	4,8	0,31
Parc relais - Pôle d'échange	7,5	0,68	1,4	0,09
Aléas	0,0	0,00	0,0	0,00
TOTAL	**180,5**	**16,41**	**261,0**	**16,62**

Tableau 40: Coût d'investissement du TVR
(calculé par l'auteur)

6.1.3.2. Coût d'exploitation

Par contre, comme dans le cas du Translohr, nous avons obtenu par l'AOT un seul coût d'exploitation, celui du TVR de Nancy. Nous estimons que le coût d'exploitation du réseau de Caen est sensiblement le même ayant obtenu les mises à niveau du matériel roulant après les incidents survenus à Nancy.

Nancy	€/km (2010)
	6,34

Tableau 41: Coût d'exploitation du TVR
(calculé par l'auteur)

6.1.4. CIVIS

6.1.4.1. Coût d'investissement

Le coût d'investissement de CIVIS est donné ci-dessous :

	Civis	
2010	Rouen	
km	24,5	
Postes de dépenses	Montant total (M€)	Coût (M€/km)
Maîtrise d'ouvrage	7,86	0,32
Études	9,13	0,37
Maîtrise d'œuvre travaux	3,80	0,16
Acquisitions foncières et libération d'emprise	9,00	0,37
Déviation de réseaux	3,80	0,16
Travaux préparatoires	1,40	0,06
Ouvrages d'art	24,22	0,99
Plate-forme du site propre	6,98	0,28
Revêtement du site propre	12,43	0,51
Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés	1,65	0,07
Alimentation en énergie de traction	0,00	0,00
Voirie (hors site propre) et espaces publics	27,01	1,10
Équipements urbains	11,54	0,47
Signalisation	4,95	0,20
Stations	8,88	0,36
Courants faibles et PCC	15,60	0,64
Dépôt	0,63	0,03
Matériel roulant	21,56	0,88
Opérations induites	11,29	0,46
Parc relais - Pôle d'échange		
Aléas	0,00	0,00
TOTAL	**181,74**	**7,42**

Tableau 42: Coût d'investissement du CIVIS
(calculé par l'auteur)

6.1.4.2. Coût d'exploitation

Par contre, le coût d'exploitation de CIVIS ne nous a pas été communiqué, néanmoins l'annuaire statistique 2009 du Certu indique pour la ville de Rouen, un coût moyen d'exploitation des réseaux à 5,60 €/km pour l'année 2008, le Sytral indique le coût d'exploitation d'un autobus articulé de 5,53 €/km (valeur 2007). Nous avons ajouté 3,5%[51] pour l'entretien des équipements spécifiques du guidage optique, ce qui nous donne 6,05 €/km (valeur 2010).

6.1.5. Trolleybus

6.1.5.1. Coût d'investissement

Le coût d'investissement du trolleybus en site propre a été estimé par l'auteur basé sur le projet du TVR de Caen car le TVR est considéré comme un trolleybus guidé avec une voie spécifique. Donc nous obtenons ce coût en adaptant ou supprimant certains postes de dépense liées aux infrastructures et au matériel roulant tels que la maîtrise d'ouvrage, les études, les déviations de réseaux, les ouvrages d'art, la plate-forme du site propre, la voie et le matériel roulant. En même temps, le Sytral nous a communiqué le coût d'investissement d'une ligne de trolleybus articulé pour un montant 9,23 M€/km (valeur 2010) qui est proche de notre estimation mais non détaillée. Donc nous retenons pour notre recherche, la valeur 10,1 M€/km qui comprend des informations plus détaillées indiquées ci-après :

	Trolleybus articulé	
2010	Basé sur le TVR de Caen	
km	15,7	
Postes de dépenses	Montant total (M€)	Coût (M€/km)
Maîtrise d'ouvrage	6,2	0,4
Études	6,2	0,4
Maîtrise d'œuvre travaux	8,2	0,5
Acquisitions foncières et libération d'emprise	6,0	0,4
Déviation de réseaux	0,0	0,0
Travaux préparatoires	8,6	0,5
Ouvrages d'art	0,0	0,0
Plate-forme du site propre	12,4	0,8
Revêtement du site propre		
Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés	0,0	0,0
Alimentation en énergie de traction	22,9	1,5
Voirie (hors site propre) et espaces publics	16,9	1,1
Équipements urbains	5,3	0,3
Signalisation	3,5	0,2
Stations	2,9	0,2
Courants faibles et PCC	15,0	1,0
Dépôt	4,5	0,3
Matériel roulant	33,3	2,1
Opérations induites	4,8	0,3
Parc relais - Pôle d'échange	1,4	0,1
Aléas	0,0	0,0
TOTAL	**158,2**	**10,1**

Tableau 43: Coût d'investissement du trolleybus
(calculé par l'auteur)

[51] Ce chiffre n'est pas une valeur tutélaire, néanmoins, cette évaluation nous semble raisonnable.

6.1.5.2. Coût d'exploitation

Le coût d'exploitation nous a été fourni par l'AOT de Lyon et nous l'utilisons dans notre recherche :

Lyon	€/km (2010)
	6,05

Tableau 44: Coût d'exploitation du trolleybus
(calculé par l'auteur)

6.1.6. Autobus articulé

6.1.6.1. Coût d'investissement

De la même manière que pour le trolleybus articulé, nous calculons le coût d'investissement de l'autobus articulé en site propre basé sur le coût d'investissement du CIVIS de Rouen en modifiant les même postes de dépenses sauf la plate-forme et son revêtement car il s'agit d'une même infrastructure et du même type de véhicule :

	Autobus articulé	
2010	Basé sur le CIVIS de Rouen	
km	24,5	
Postes de dépenses	Montant total (M€)	Coût (M€/km)
Maîtrise d'ouvrage	6,34	0,26
Études	6,34	0,26
Maîtrise d'œuvre travaux	3,80	0,16
Acquisitions foncières et libération d'emprise	9,00	0,37
Déviation de réseaux	0,00	0,00
Travaux préparatoires	1,40	0,06
Ouvrages d'art	0,00	0,00
Plate-forme du site propre	6,98	0,28
Revêtement du site propre	12,43	0,51
Voie spécifique des systèmes ferrés et guidés	0,00	0,00
Alimentation en énergie de traction	0,00	0,00
Voirie (hors site propre) et espaces publics	27,01	1,10
Équipements urbains	11,54	0,47
Signalisation	4,95	0,20
Stations	8,88	0,36
Courants faibles et PCC	15,60	0,64
Dépôt	0,63	0,03
Matériel roulant	19,02	0,78
Opérations induites	11,29	0,46
Parc relais - Pôle d'échange		
Aléas	0,00	0,00
TOTAL	**145,21**	**5,93**

Tableau 45: Coût d'investissement de l'autobus articulé
(calculé par l'auteur)

6.1.6.2. Coût d'exploitation

Nous avons obtenu le coût d'exploitation de l'autobus articulé de deux grand réseaux d'autobus Lyon et Grenoble dont le coût moyen est le suivant :

	€/km (2010)
Lyon	5,87
Grenoble	6,01
Moyenne	**5,94**

Tableau 46: Coût d'exploitation de l'autobus articulé
(calculé par l'auteur)

Le tableau suivant est une matrice de performance, ayant rendu compte de tous les critères cités ci-dessus, que nous utilisons pour l'analyse comparative :

2010	Capacité (p/h/d)	Fréquence (minutes)	Vitesse commerciale (km/h)	Ponctualité (% de site propre)	Emprise au sol (GLO) (m)	Fiabilité	Acces sibilité	Coûts d'investissement (M€/km)	Coûts d'exploitation (€/km)	GES (gCO2/véhicule·km)	Image de l'insertion (0-10)
Tramway 32m	3 000	4	19,5	90	5,85	9	1	27,41	7,24	0	9
Translohr	2 550	4	18	90	5,46	8	1	24,27	7,3	0	9
TVR	2 600	3	16,5	90	6,14	7	1	16,51	6,34	48	7
CIVIS	2 100	3	17,3	80	6,8	8	1	7,42	6,05	480	6
Trolleybus	2 100	3	16,5	70	6,8	9	0	10,1	6,05	0	6
Autobus articulé	2 100	3	16	70	6,8	9	0	5,93	5,94	480	5
Poids	50	20	30	20	10	10	10	50	50	25	25
Seuil d'indifférence	10%	1	10%	10%	10%	1	0	10%	10%	15%	1
Seuil de préférence	20%	2	20%	20%	20%	2	1	30%	20%	30%	3
Seuil de veto	50%		50%	50%	30%				50%		4

Tableau 47: Matrice de performance avec les bases de données réelles et le poids de référence

6.1.7. Résultats

À partir des données réelles précédemment indiquées nous avons analysé par la méthode Electre III en introduisant les poids puis Electre IV sans pondération.

Nous constatons dans cette première analyse que le système tramway se classe 3 fois sur 4 en première position. Le Translohr, le TVR se classent 2 fois en première position.

Rang	Poids de référence	Poids 1	Poids 2	Poids 3	Rang
1	Tramway	Tramway/Translohr	TVR/CIVIS	Tramway/Translohr, TVR	1
2	TVR	TVR	Tramway, Autobus	Trolleybus	2
3	Translohr	CIVIS/Trolleybus	Translohr	Autobus	3
4	CIVIS/Trolleybus	Autobus	Trolleybus	CIVIS	4
5	Autobus				5

Tableau 48: Rangs de chaque système selon des poids

Pour le rappel, le poids de référence met le plus l'accent sur la capacité, le coût d'investissement et le coût d'exploitation en allouant le même poids 50 sur 300 pour chacun des trois. Le poids 1 place en priorité les performances : la capacité avec un poids de 50, la ponctualité avec un poids de 30, l'emprise au sol avec un poids de 30. Et puis, les coûts d'investissement et d'exploitation avec un poids de 40. Le poids 2 met la priorité sur les coûts d'investissement et d'exploitation. Le poids 3 met la priorité sur les GES et l'Image.

La méthode ELECTRE III nous permet de classer, à partir des données réelles et l'affectation des poids 1, le tramway et le Translohr au premier rang, le TVR au deuxième rang. Selon l'affectation du poids 2, le TVR et le CIVIS sont au premier rang, le tramway et l'autobus sont au deuxième rang. Pour l'application du poids 3, le tramway/le Translohr et le TVR sont au premier rang, le trolleybus au deuxième rang.

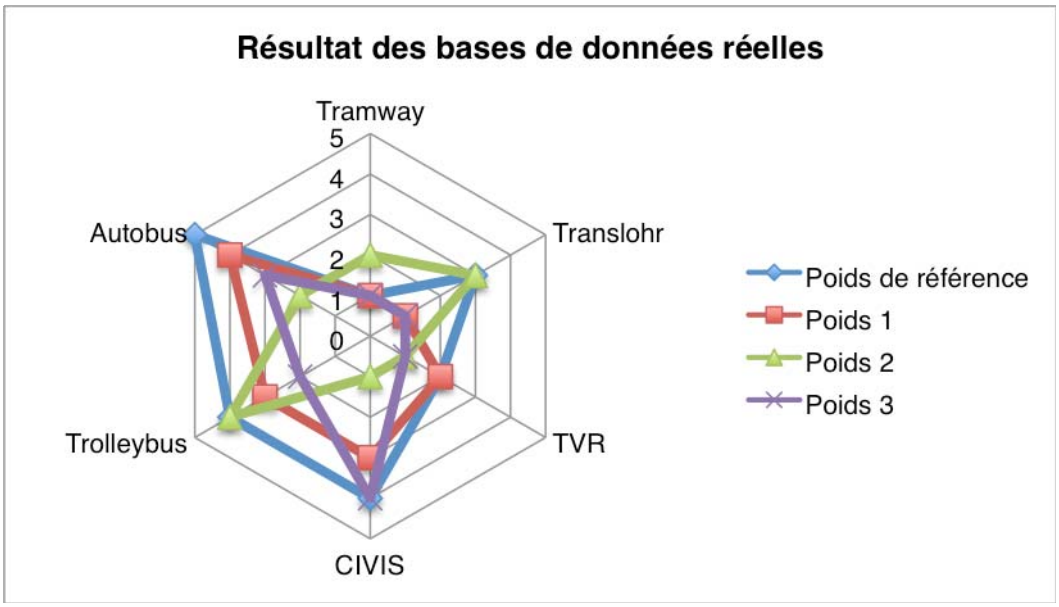


Figure 83: Résultat des bases de données réelles

Le résultat nous montre la « supériorité » des modes de transport physiquement guidé de surface dans tous les cas d'affectation des poids. Donc on peut dire que le tramway et le Translohr/TVR peuvent être jugés comme des systèmes adéquats pour nos villes sauf dans le cas où il y a des contraintes considérables de coût. Par exemple, dans la ville de Rouen, il a été décidé de réaliser un système CIVIS au lieu du tramway sur la deuxième phase du projet de transport en site propre pour économiser des coûts de réalisation. D'après notre résultat, cette solution était tout à fait justifiée et voire un « bon choix ». De la même manière, le choix du TVR entièrement guidé tout au long de la ligne pour la ville de Caen peut être aussi jugé raisonnable mais par contre, le choix du TVR pour la ville de Nancy n'est pas jugé ad hoc parce que sur certaines parties de la ligne, le TVR n'est pas guidé et est exploité comme un trolleybus ce qui n'est pas souhaitable dans tous les cas.

Par ailleurs, le choix du Translohr de la ville de Clermont-Ferrand est tout à fait justifiable si l'on ne privilégie pas l'aspect des coûts y compris le coût d'exploitation.

6.1.7.1. Introduction du poids de référence

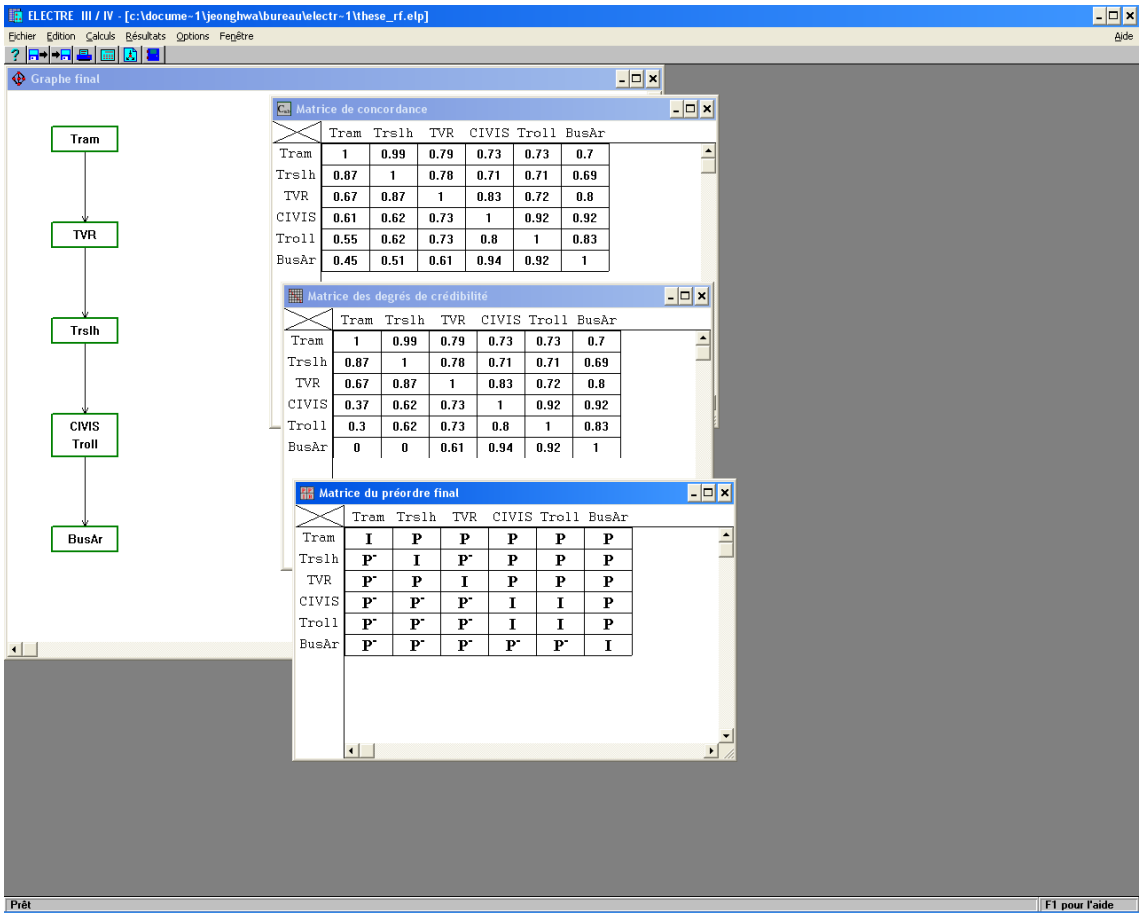


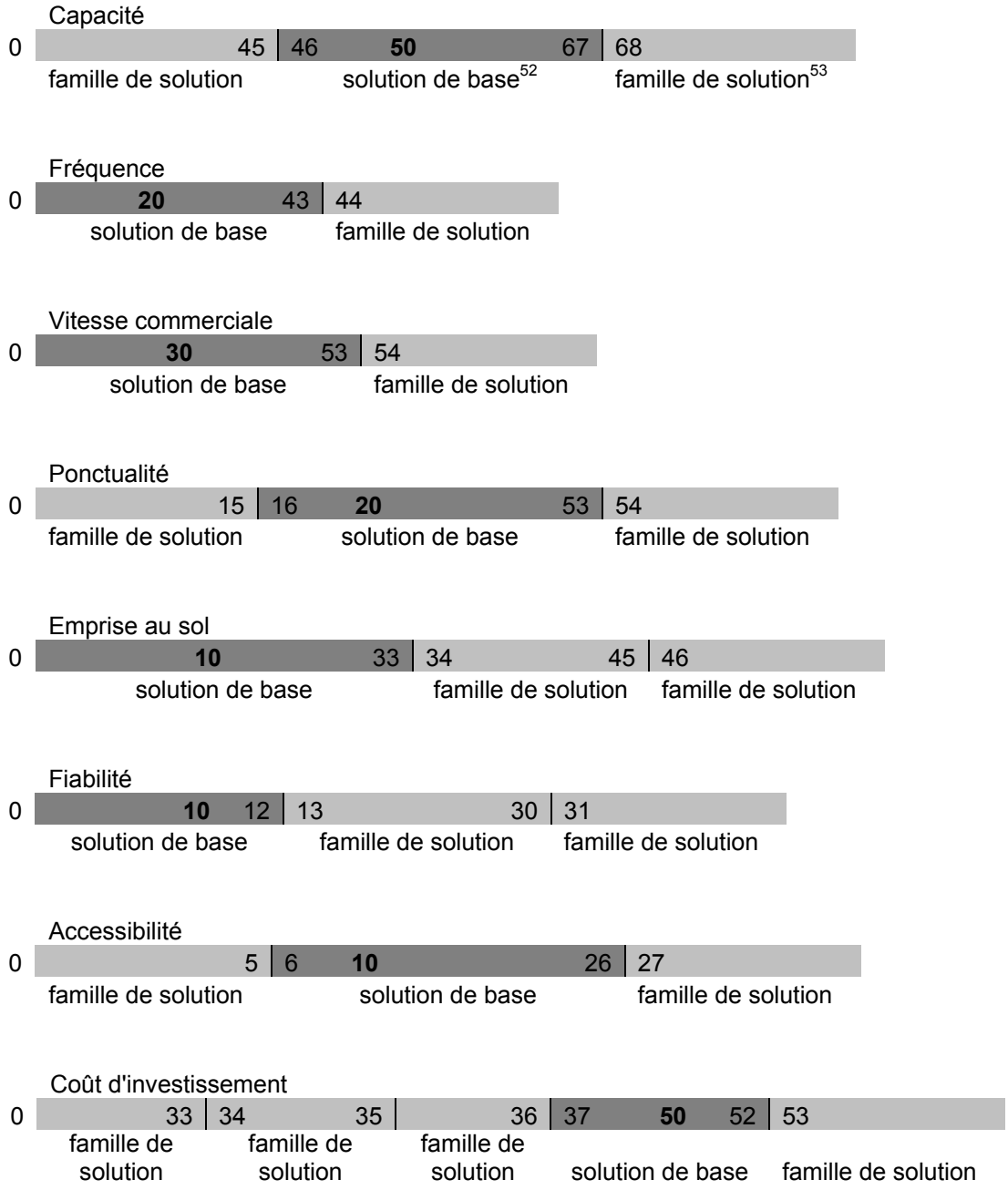
Figure 84: Résultat d'ELECTRE III avec les bases de données réelles (poids de référence)

Ce résultat nous donne les informations suivantes :

- Le tramway occupe la tête du classement,
- Le TVR est au deuxième rang,
- Le Translohr se situe au milieu du classement,
- Le CIVIS et trolleybus considérés comme un même système se situent au quatrième,
- L'autobus occupe le dernier classement.

Test de robustesse

Pour vérifier la sensibilité du résultat en fonction des critères nous avons effectué un test de robustesse. À titre d'exemple, le schéma concernant la capacité montre que lorsque nous varions le poids de la pondération entre 46 et 67 avec un poids de référence 50, le résultat reste identique (solution de base). Pour un poids inférieur à 45 et supérieur à 68, le résultat change légèrement mais demeure une solution globalement acceptée (famille de solution).



[52] La solution identique qui se trouve dans **Figure 83**.

[53] Les solutions avec une légère modification mais presque identiques que la solution de base.

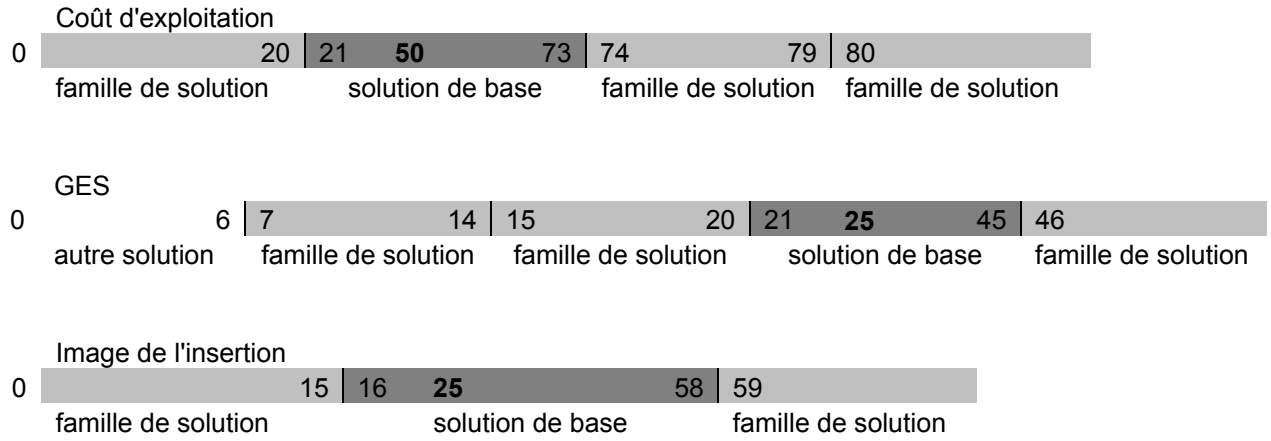


Figure 85: Test de robustesse

Après avoir effectué le test de robustesse, nous avons constaté que la solution de base (**Figure 84**) présente une stabilité modérée par rapport à la variation des poids des critères et une stabilité forte à la variation des différents seuils[54]. Donc, on peut considérer que notre pondération du poids de référence est raisonnable car le résultat reste au moins dans la même « famille de solution » dont la solution de base :

- Le Tramway se situe toujours au premier rang (en tête du classement),
- Le TVR et le Translohr se partagent souvent, selon plusieurs combinaisons, le deuxième rang mais se situent rarement au premier rang avec le tramway,
- Le CIVIS et le trolleybus sont considérés souvent comme un même système et se situent au troisième rang du classement,
- L'autobus articulé se situe dans la plupart des cas au dernier rang du classement.

Par conséquent, nous acceptons cette pondération comme référence pour l'ensemble de notre recherche. Pourtant, en plus de ce poids de référence, nous appliquerons aussi plusieurs changements de poids tout au long de cette recherche pour comparer les différents systèmes de transport dans différents contextes et enjeux divergents.

[54] Les trois seuils ont été testés et restent toujours dans la solution de base.

6.1.7.2. Introduction du poids 1

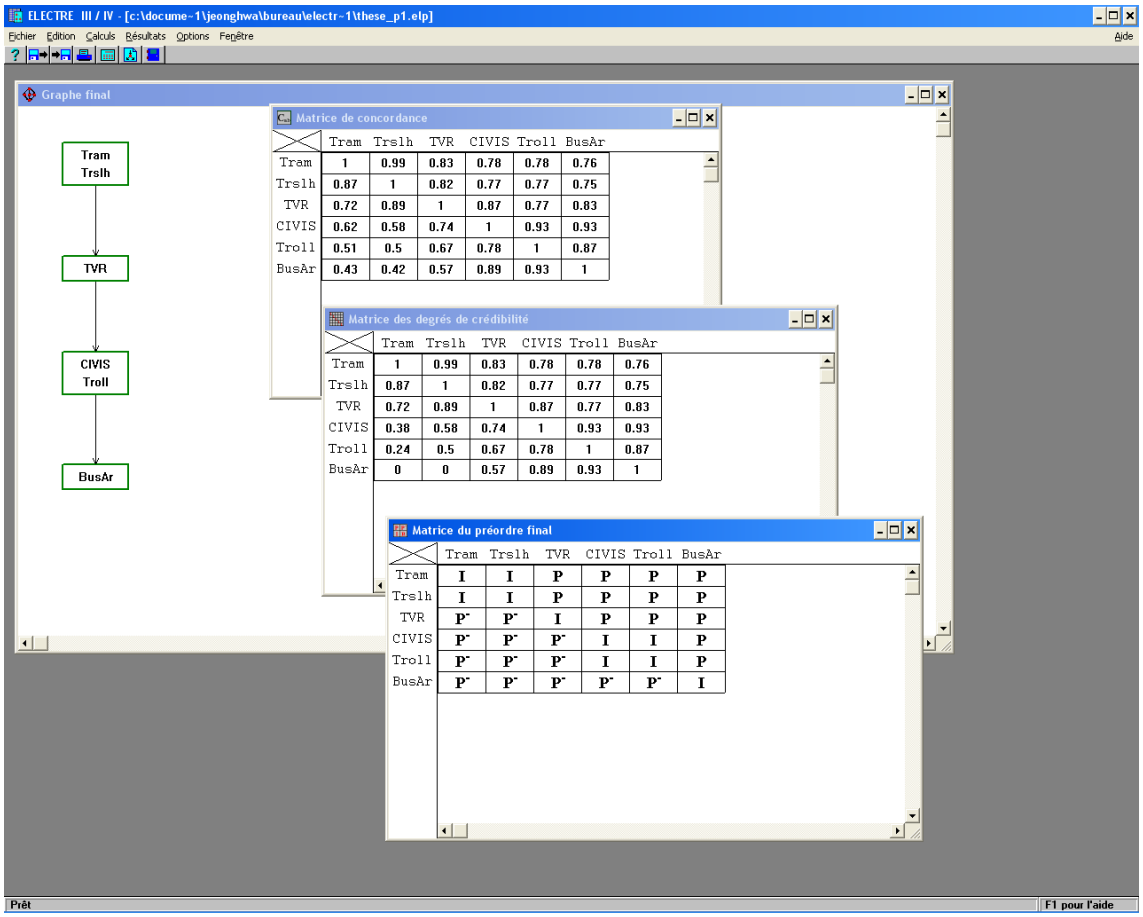


Figure 86: Résultat d'ELECTRE III avec les bases de données réelles (poids 1)

Le résultat obtenu par la méthode Electre III en appliquant le poids 1, nous montre que les systèmes Tramway et Translohr sont « supérieurs » et considérés comme « même système » suivi successivement des systèmes TVR, CIVIS/Trolleybus considérés comme « même système » et l'autobus articulé.

Comme indiqué ci-dessus dans la partie 4 du présent chapitre traitant de la pondération, dans ce cas, nous favorisons les critères de performances.

6.1.7.3. Introduction du poids 2

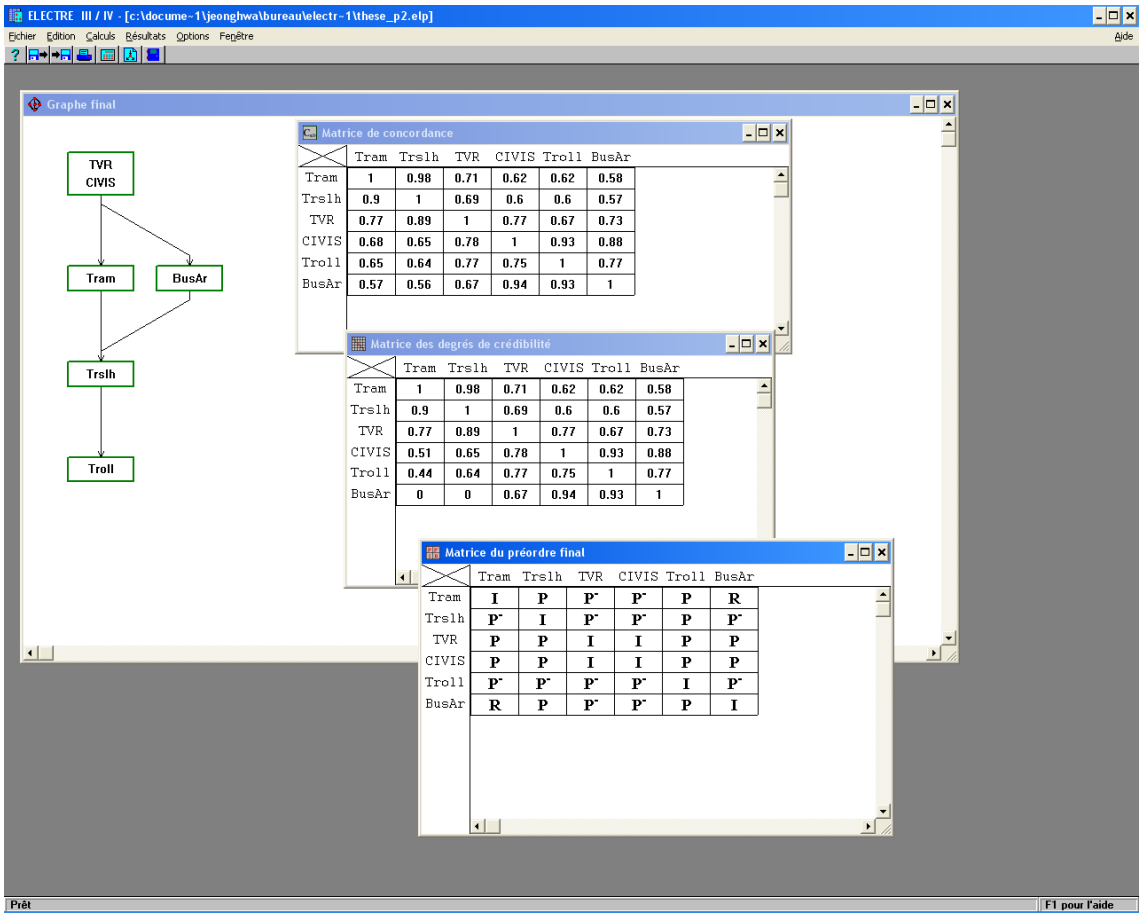


Figure 87: Résultat d'ELECTRE III avec les bases de données réelles (poids 2)

Le résultat obtenu en appliquant le poids 2, nous montre que le TVR et CIVIS considérés comme « même système » surclassent les autres systèmes, suivis en deuxième niveau du tramway et de l'autobus articulé non comparables, puis successivement du Translohr et du Trolleybus. Ce résultat est vraisemblable parce que l'on privilégie les critères du coût et le TVR et le CIVIS sont les systèmes de transport considérés relativement moins cher par rapport aux tramways avec relativement un bon service.

6.1.7.4. Introduction du poids 3

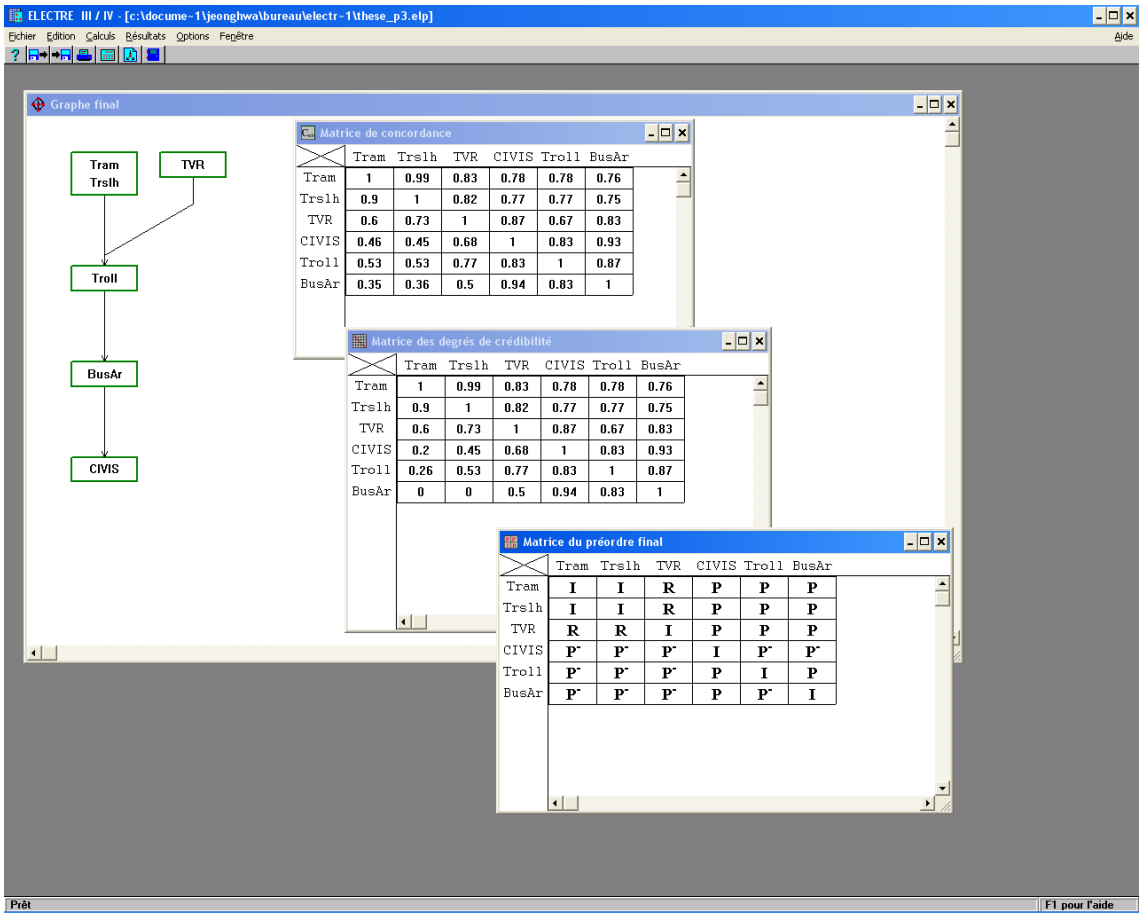
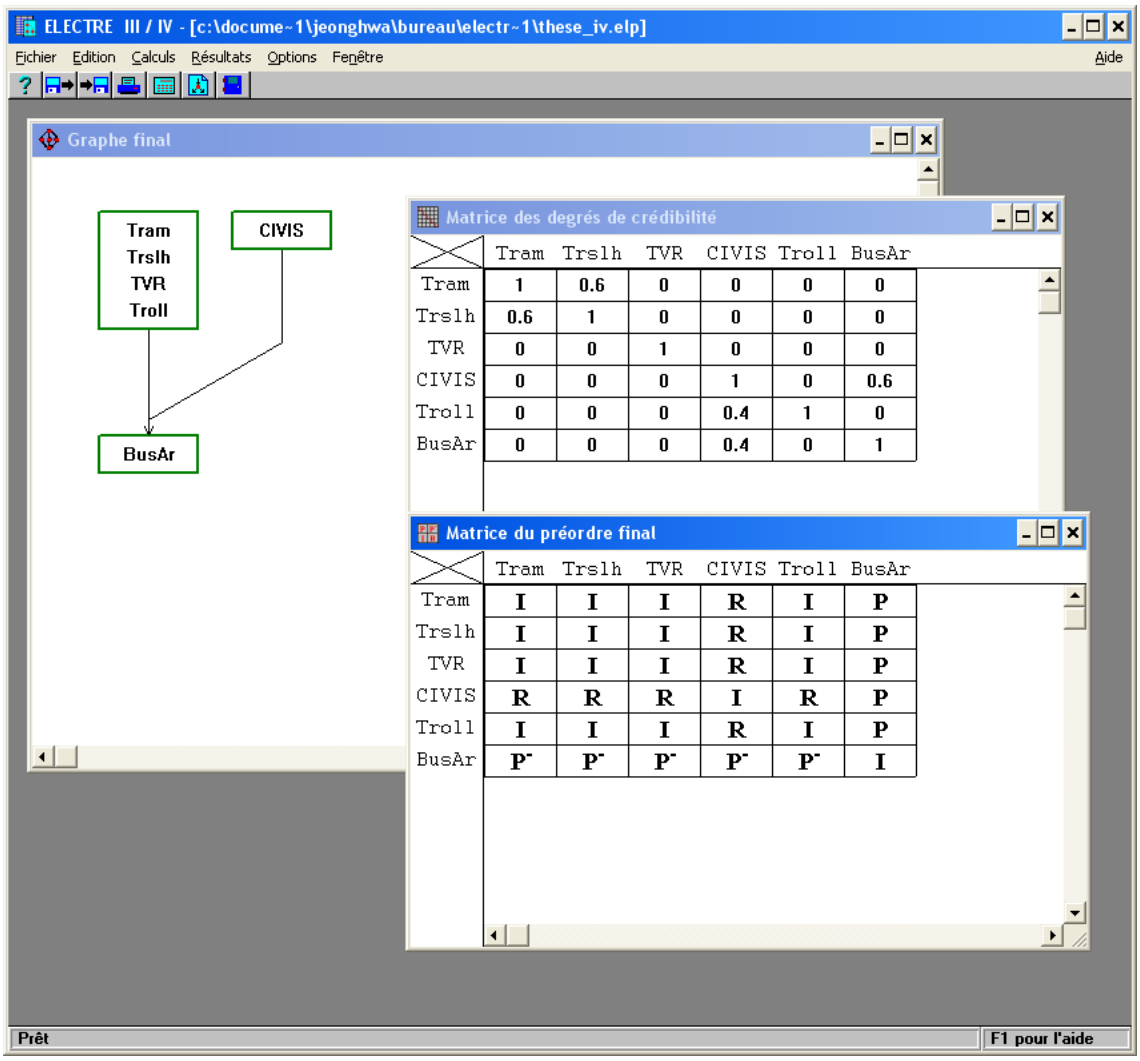


Figure 88: Résultat d'ELECTRE III avec les bases de données réelles (poids 3)

Le résultat obtenu nous montre que le Tramway et Translohr considérés comme « même système », le TVR non comparable avec les deux systèmes précédents, surclassent successivement le Trolleybus, l'autobus articulé et le CIVIS.

6.1.7.5. Analyse par la méthode Electre IV



	Tram	Trslh	TVR	CIVIS	Troll	BusAr
Tram	1	0.6	0	0	0	0
Trslh	0.6	1	0	0	0	0
TVR	0	0	1	0	0	0
CIVIS	0	0	0	1	0	0.6
Troll	0	0	0	0.4	1	0
BusAr	0	0	0	0.4	0	1

	Tram	Trslh	TVR	CIVIS	Troll	BusAr
Tram	I	I	I	R	I	P
Trslh	I	I	I	R	I	P
TVR	I	I	I	R	I	P
CIVIS	R	R	R	I	R	P
Troll	I	I	I	R	I	P
BusAr	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻	P⁻	I

Figure 89: Résultat d'ELECTRE IV avec les bases de données réelles

Le classement général donne l'autobus articulé en site propre surclassé par tous les autres systèmes. Ce résultat montre que le tramway, Translohr, TVR et trolleybus peuvent être considéré comme « même système » et sont incomparables avec le CIVIS. Ce résultat ne nous apporte rien car il indique simplement le plus mauvais choix et non le meilleur que nous recherchons. Ainsi au vu de la matrice des degrés de crédibilité, ce résultat ne nous paraît pas crédible car nous n'atteignons que 0,6 et 0,4 comme degrés.

Par ailleurs, *a priori*, ELECTRE IV n'est pas la méthode la plus adéquate pour le cas précis de notre étude (Maystre, Pictet et al. 1994). Donc nous n'utilisons dès maintenant que la méthode ELECTRE III pour la suite de notre recherche.

6.2.Établissement des scenarii

La figure ci-dessous montre le raisonnement suivi pour comparer des scenarii de cette partie. À partir des hypothèses, d'abord, nous pouvons obtenir les informations concernant le coût d'exploitation. Ensuite, nous essayons de trouver les résultats (choix des systèmes) en appliquant plusieurs scenarii choisis.

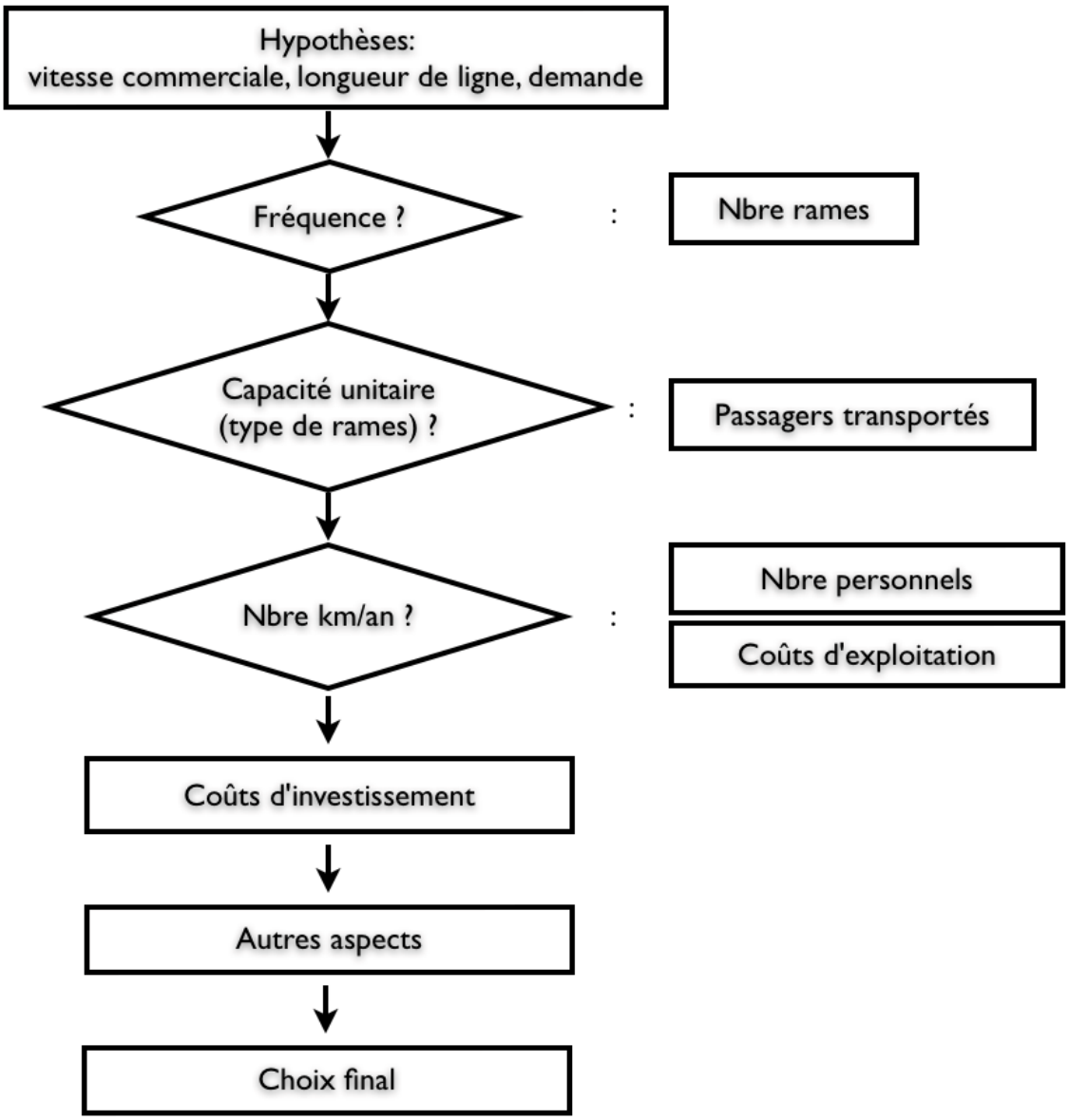


Figure 90: Raisonnement sur l'établissement des scenarii
(Source : auteur)

Les coûts d'investissement ont été relativement bien communiqués par les AOT par rapport aux coûts d'exploitation, donc nous allons utiliser ces coûts d'investissement connus comme un input pour notre analyse de scenarii. Au contraire, en ce qui concerne le coût d'exploitation, nous allons les calculer en utilisant trois facteurs principaux : la fréquence, le type de rames et le nombre de kilomètre par an, comme le montre la figure

ci-dessus. À partir du résultat du calcul, nous allons pouvoir compléter les matrices des performances pour notre recherche, car même si les coûts d'exploitation sont souvent disponibles, ils ne garantissent point l'exactitude des informations. C'est la raison pour laquelle, nous avons essayé de les calculer. Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- La longueur de ligne : 30 km (2x15),
- Temps de battement en terminus : 10 minutes,
- Taux de réserve : 10 %,
- Nombre de sous-stations : 10 (tous les 1,5 km) pour les modes qui utilisent la traction électrique,
- Nombre des jours ouvrables : 253 (samedi : 52, dimanche : 60),
- Amplitude de fonctionnement : 20 (JO), 19 (samedi), 18 (dimanche),
- Heure de pointe : 4 heures par jour,
- Temps de préparation du véhicule : 40 minutes (2x20),
- Temps de travail consacré par agent : 1 500 heures/an.

En ce qui concerne les scenarii, pour être le plus complet possible, nous allons faire varier d'abord, la fréquence et ensuite, la vitesse commerciale et enfin les coûts d'exploitations obtenus par notre calcul. Tous ces facteurs sont les indicateurs importants qui influencent le fonctionnement des systèmes. Toutefois, il est à noter que les autres éléments de l'hypothèse de calcul pour le coût d'exploitation sont identiques.

Les différentes hypothèses des 4 scenarii étudiés dans cette recherche sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Capacité (M passagers/an)	5 à 10	10	13 à 25	5
Fréquence (minutes)	5	variable (3 à 4)	2	variable (5 à 10)
Vitesse commerciale (km/h)	20	18	25	18
Espacement entre stations (m)	500	333	500	333
coût d'exploitation (M€/an)	6 à 9	9 à 10	11 à 15	6

Tableau 49: Les hypothèses de chaque scenario

6.3.Scenario 1

6.3.1.Hypothèses

Pour le scenario 1, nous fixons le niveau de service plus ou moins équivalent pour tous les systèmes afin de comparer la différence liée à la capacité offerte et aux coûts engendrés :

- La fréquence à l'heure de pointe : 5 minutes (en heures creuses 10 minutes),
- La vitesse commerciale : 20 km/h,
- Nombre de stations : 30 (espacement moyenne 500 m).

Selon (Vuchic 2007), théoriquement, la vitesse commerciale 20 km/h est atteinte dans un contexte où la vitesse maximale d'une rame est supérieure à 30 km/h et l'espacement entre 2 stations est supérieur à 400 m. Notre hypothèse pour le scenario 1 est donc valable car toutes les rames ont la vitesse maximale supérieure à 30 km/h et l'espacement est de 500 m au-dessous des seuils annoncés par le Prof. Vuchic.

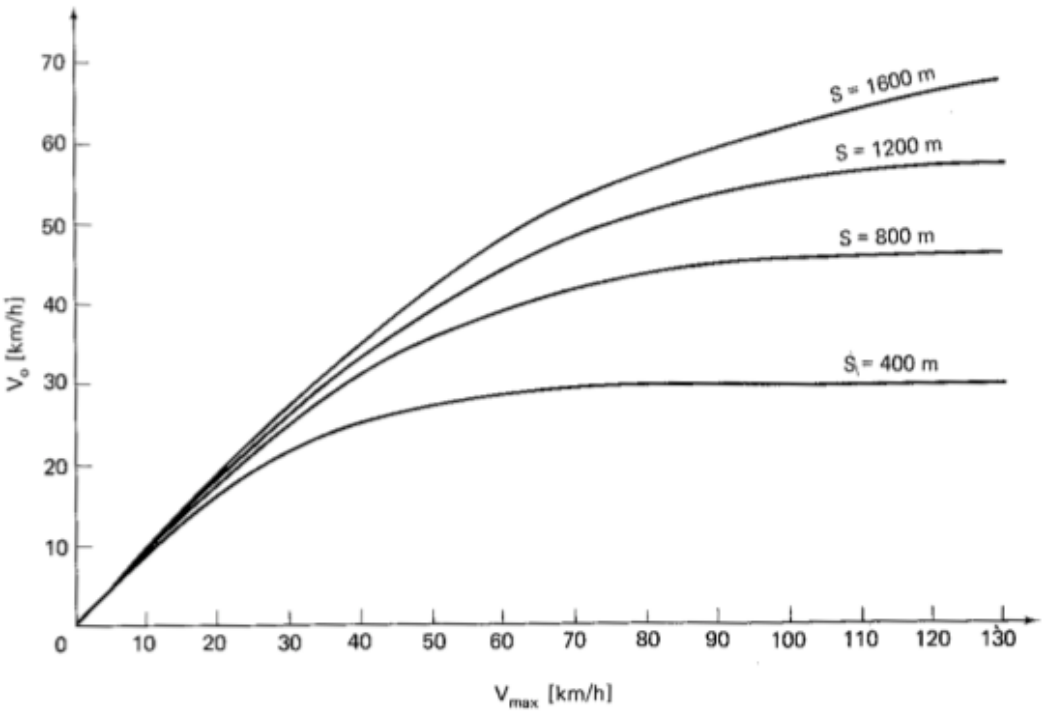


Figure 91: Vitesse commerciale en fonction de la vitesse maximale et l'espacement
(Source : Vuchic 2007)

Nota : Vitesse commerciale (V_0)

Avant d'entrer dans le détail du scenario 1, une chose est à noter, pour faciliter notre démarche concernant les coûts de maintenance liés aux matériels roulants du tramways

sur fer et sur pneu et plus particulièrement les coûts liés à l'usure des roues et des pneus qui sont similaires selon l'information donnée par Keolis. Nous traitons donc ces deux systèmes avec cette même hypothèse de coût d'exploitation.

2010	Tramway sur fer	Tramway sur pneu
Durée de vie (km)	200 000	50 000
prix unitaire d'une roue/d'un pneu (€)	1 898	633
Nombre de roues par rame	12	8
Coût par km (€/km)	0,11	0,10

Tableau 50: Comparaison des usures de roue et de pneu

6.3.1.1. Tramway 32m

Ayant établi toutes les hypothèses, nous trouvons le coût d'exploitation qui comprend le coût lié au personnel et, de la même manière, les coûts liés à l'énergie, à l'entretien et à la sous-traitance, aux autres achats/services extérieurs et aux pièces détachées. Le prix de l'électricité retenu est 0,0805 €/kWh (valeur 2010).

Les tableaux suivants montrent le cas du tramway de 32 m.

	Effectif	Nombre	Coût unitaire (€/an)	Coût total (€/an)
Exploitation	chef d'exploitation	1,0	70 000	70 000
	inspecteur	1,0	60 000	60 000
	régulateur	4,8	48 000	228 096
	formateur/qualité/sécurité	1,0	48 000	48 000
	encadrement/suivi de ligne (agents maîtrise)	3,7	48 000	175 852
	conducteurs	58,1	36 000	2 092 960
	agents de contrôle	0,0	36 000	0
	méthodes/gestion	1,0	48 000	48 000
	recouvrement des amendes	0,5	36 000	18 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	sous-total	71,6		2 758 908
Maintenance	chef du service technique	1,0	60 000	60 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	magasinier	0,5	36 000	18 000
Matériel Roulant	responsable matériel roulant	1,0	60 000	60 000
	contremaître	2,0	48 000	96 000
	méthodes/ordonnancement	2,0	48 000	96 000
	ouvrier/techniciens	21,2	36 000	762 880
Installations fixes	responsable installations fixes	1,0	60 000	60 000
	méthodes/ordonnancement	1,0	48 000	48 000
	ouvrier/techniciens	7,2	36 000	258 960
	suivi de la sous-traitance	1,0	48 000	48 000
	sous-total	38,4		1 525 840
Structure	directeur général	1	85 000	85 000

	responsable marketing/commercial	1	70 000	70 000
	responsable finances/comptabilité	1	70 000	70 000
	responsable informatique	1	70 000	70 000
	responsable ressources humaines	1	70 000	70 000
	employés	4	36 000	144 000
	secrétariat	2	36 000	72 000
	sous-total	11		581 000
	Total	**120,9**		**4 865 748**

Tableau 51: Coût d'exploitation estimé d'un tramway concernant le personnel

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2 758 908	0,30	1,69	30,90%
	Maintenance	1 525 840	0,17	0,94	17,09%
	Structure	581 000	0,06	0,36	6,51%
sous-total		4 865 748	0,53	2,99	54,50%
Énergie	Véhicules	445 584	0,05	0,27	4,99%
	Bâtiment	100 000	0,01	0,06	1,12%
sous-total		545 584	0,06	0,34	6,11%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	535 200	0,06	0,33	6,00%
	Voie	381 500	0,04	0,23	4,27%
	Stations	210 000	0,02	0,13	2,35%
	Ligne aérienne	120 000	0,01	0,07	1,34%
	Sous-stations	40 000	0,00	0,02	0,45%
	Courant faible, signalisation	90 000	0,01	0,06	1,01%
	Bâtiments-espaces verts	40 000	0,00	0,02	0,45%
sous-total		1 416 700	0,15	0,87	15,87%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	81 400	0,01	0,05	0,91%
	Marketing	100 000	0,01	0,06	1,12%
	Gardiennage	50 000	0,01	0,03	0,56%
	Dotation vestimentaire	63 130	0,01	0,04	0,71%
	Collecte de fonds	15 000	0,00	0,01	0,17%
	Autres charges	50 000	0,01	0,03	0,56%
sous-total		359 530	0,04	0,22	4,03%
Pièces détachées	Matériel roulant	1 139 600	0,12	0,70	12,77%
	Installations fixes	600 000	0,07	0,37	6,72%
sous-total		1 739 600	0,19	1,07	19,49%
TOTAL Coût d'exploitation		**8 927 162**	**0,97**	**5,48**	**100%**

Tableau 52: Coût d'exploitation estimé d'un tramway

En ce qui concerne l'émission du GES, les données sur le CO_2 se trouvent dans le tableau suivant et il est à noter que le prix de la tonne de CO_2 est 27,3 € :

Véhicule	Émission GES (gCO2/véhicule·km)	Émission total (tCO2/véhicule/an)	Coût total (€/an)	Coût total (€/voyage)
Tramway	0	0	0	0,000
Translohr	0	0	0	0,000
TVR	48	78	42 667	0,007
CIVIS	480	781	426 666	0,080
Trolleybus	0	0	0	0,000
Autobus	480	781	426 666	0,080

Tableau 53: Émission de CO2

6.3.1.2. Translohr 32m

Pour le Translohr la condition d'exploitation est considérée identique à celle du tramway sauf pour la maintenance des voies et la consommation d'énergie.

Il est à noter encore une fois que le Translohr est exploité actuellement dans une seule ville française, Clermont-Ferrand, donc le coût d'investissement du Translohr ne représente pas une moyenne parmi plusieurs réseaux mais seulement celui de la ligne de Clermont-Ferrand : s'agissant d'une innovation et d'un contrat avec l'AOT résultant d'un appel d'offres sans concurrence, les entreprises n'ont pas optimisé leur coût dans le souci de se préserver de tout imprévu durant la réalisation des travaux jusqu'à la mise en service.

De la même manière que celui du tramway, le coût d'exploitation du Translohr se présente ainsi :

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2 758 908	0,32	1,69	31,14%
	Maintenance	1 472 560	0,17	0,90	16,62%
	Structure	581 000	0,07	0,36	6,56%
sous-total		4 812 468	0,55	2,96	54,32%
Énergie	Véhicules	432 478	0,05	0,27	4,88%
	Bâtiment	100 000	0,01	0,06	1,13%
sous-total		532 478	0,06	0,33	6,01%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	535 200	0,06	0,33	6,04%
	Voie	381 500	0,04	0,23	4,31%
	Stations	210 000	0,02	0,13	2,37%
	Ligne aérienne	120 000	0,01	0,07	1,35%
	Sous-stations	40 000	0,00	0,02	0,45%
	Courant faible, signalisation	90 000	0,01	0,06	1,02%
	Bâtiments-espaces verts	40 000	0,00	0,02	0,45%
sous-total		1 416 700	0,16	0,87	15,99%

Autres achats et services extérieurs	Assurance	81 400	0,01	0,05	0,92%
	Marketing	100 000	0,01	0,06	1,13%
	Gardiennage	50 000	0,01	0,03	0,56%
	Dotation vestimentaire	62 094	0,01	0,04	0,70%
	Collecte de fonds	15 000	0,00	0,01	0,17%
	Autres charges	50 000	0,01	0,03	0,56%
sous-total		358 494	0,04	0,22	4,05%
Pièces détachées	Matériel roulant	1 139 600	0,13	0,70	12,86%
	Installations fixes	600 000	0,07	0,37	6,77%
sous-total		1 739 600	0,20	1,07	19,63%
TOTAL Coût d'exploitation		**8 859 740**	**1,02**	**5,44**	**100%**

Tableau 54: Coût d'exploitation estimé d'un Translohr

6.3.1.3. TVR 25m

Pour calculer la consommation d'énergie électrique nous avons utilisé les informations communiquées par la CUGN (Communauté Urbaine de Grand Nancy) :

- La consommation d'énergie électrique est de 4,2 Kwh/véh·km (avec 300 circulations/semaine),
- La consommation de gasoil du TVR est de 163 l/100 km (avec 120 000 km/an/véhicule), tandis que la consommation de bus standard/articulé est de 50 l/100 km et 80 l/100 km,
- Le prix de carburant considéré est de 0,5 €/l (valeur 2010).

Après avoir appliqué ces informations, nous obtenons le coût d'exploitation du TVR :

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2 758 908	0,42	1,69	38,25%
	Maintenance	1 386 880	0,21	0,85	19,23%
	Structure	581 000	0,09	0,36	8,06%
sous-total		4 726 788	0,71	2,90	65,54%
Énergie	Véhicules	648 227	0,10	0,40	8,99%
	Bâtiment	100 000	0,02	0,06	1,39%
sous-total		748 227	0,11	0,46	10,37%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	19 200	0,00	0,01	0,27%
	Voie	0	0,00	0,00	0,00%
	Stations	210 000	0,03	0,13	2,91%
	Ligne aérienne	120 000	0,02	0,07	1,66%

	Sous-stations	40 000	0,01	0,02	0,55%
	Courant faible, signalisation	0	0,00	0,00	0,00%
	Bâtiments-espaces verts	40 000	0,01	0,02	0,55%
sous-total		429 200	0,06	0,26	5,95%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	81 400	0,01	0,05	1,13%
	Marketing	100 000	0,02	0,06	1,39%
	Gardiennage	50 000	0,01	0,03	0,69%
	Dotation vestimentaire	60 428	0,01	0,04	0,84%
	Collecte de fonds	15 000	0,00	0,01	0,21%
	Autres charges	50 000	0,01	0,03	0,69%
sous-total		356 828	0,05	0,22	4,95%
Pièces détachées	Matériel roulant	651 200	0,10	0,40	9,03%
	Installations fixes	300 000	0,05	0,18	4,16%
sous-total		951 200	0,14	0,58	13,19%
TOTAL Coût d'exploitation		**7 212 243**	**1,09**	**4,43**	**100%**

Tableau 55: Coût d'exploitation estimé d'un TVR

6.3.1.4. CIVIS 18m

En ce qui concerne le CIVIS, la consommation d'énergie est de 0,7 l/km/véhicule. Donc le coût d'exploitation estimé pour le CIVIS est :

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2 758 908	0,51	1,69	43,54%
	Maintenance	1 134 400	0,21	0,70	17,90%
	Structure	581 000	0,11	0,36	9,17%
sous-total		4 474 308	0,84	2,75	70,60%
Énergie	Véhicules	569 800	0,11	0,35	8,99%
	Bâtiment	100 000	0,02	0,06	1,58%
sous-total		669 800	0,13	0,41	10,57%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	19 200	0,00	0,01	0,30%
	Voie	0	0,00	0,00	0,00%
	Stations	210 000	0,04	0,13	3,31%
	Ligne aérienne	0	0,00	0,00	0,00%
	Sous-stations	0	0,00	0,00	0,00%
	Courant faible, signalisation	0	0,00	0,00	0,00%
	Bâtiments-espaces verts	40 000	0,01	0,02	0,63%
sous-total		269 200	0,05	0,17	4,25%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	81 400	0,02	0,05	1,28%
	Marketing	100 000	0,02	0,06	1,58%
	Gardiennage	50 000	0,01	0,03	0,79%
	Dotation vestimentaire	57 619	0,01	0,04	0,91%
	Collecte de fonds	15 000	0,00	0,01	0,24%
	Autres charges	50 000	0,01	0,03	0,79%
sous-total		354 019	0,07	0,22	5,59%
Pièces détachées	Matériel roulant	569 800	0,11	0,35	8,99%
	Installations fixes	0	0,00	0,00	0,00%
sous-total		569 800	0,11	0,35	8,99%
TOTAL Coût d'exploitation		**6 337 127**	**1,18**	**3,89**	**100%**

Tableau 56: Coût d'exploitation estimé d'un CIVIS

6.3.1.5. Trolleybus 18m

La Consommation d'énergie du trolleybus est de 4 kWh/km. Le coût d'exploitation du trolleybus est :

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2 758 908	0,51	1,69	39,41%
	Maintenance	1 300 240	0,24	0,80	18,58%
	Structure	581 000	0,11	0,36	8,30%
sous-total		4 640 148	0,87	2,85	66,29%
Énergie	Véhicules	524 216	0,10	0,32	7,49%
	Bâtiment	100 000	0,02	0,06	1,43%
sous-total		624 216	0,12	0,38	8,92%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	19 200	0,00	0,01	0,27%
	Voie	0	0,00	0,00	0,00%
	Stations	210 000	0,04	0,13	3,00%
	Ligne aérienne	120 000	0,02	0,07	1,71%
	Sous-stations	40 000	0,01	0,02	0,57%
	Courant faible, signalisation	0	0,00	0,00	0,00%
	Bâtiments-espaces verts	40 000	0,01	0,02	0,57%
sous-total		429 200	0,08	0,26	6,13%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	81 400	0,02	0,05	1,16%
	Marketing	100 000	0,02	0,06	1,43%
	Gardiennage	50 000	0,01	0,03	0,71%
	Dotation vestimentaire	58 743	0,01	0,04	0,84%
	Collecte de fonds	15 000	0,00	0,01	0,21%
	Autres charges	50 000	0,01	0,03	0,71%
sous-total		355 143	0,07	0,22	5,07%
Pièces détachées	Matériel roulant	651 200	0,12	0,40	9,30%
	Installations fixes	300 000	0,06	0,18	4,29%
sous-total		951 200	0,18	0,58	13,59%
TOTAL Coût d'exploitation		**6 999 907**	**1,31**	**4,30**	**100%**

Tableau 57: Coût d'exploitation estimé d'un trolleybus articulé

6.3.1.6. Autobus articulé 18m type BHNS

La consommation d'énergie de l'autobus articulé est équivalente à celle du CIVIS. Le coût d'exploitation estimé de l'autobus est :

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2 758 908	0,51	1,69	44,24%
	Maintenance	1 115 680	0,21	0,69	17,89%
	Structure	581 000	0,11	0,36	9,32%
sous-total		4 455 588	0,83	2,74	71,44%
Énergie	Véhicules	569 800	0,11	0,35	9,14%
	Bâtiment	100 000	0,02	0,06	1,60%
sous-total		669 800	0,13	0,41	10,74%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	19 200	0,00	0,01	0,31%
	Voie	0	0,00	0,00	0,00%
	Stations	210 000	0,04	0,13	3,37%
	Ligne aérienne	0	0,00	0,00	0,00%
	Sous-stations	0	0,00	0,00	0,00%
	Courant faible, signalisation	0	0,00	0,00	0,00%
	Bâtiments-espaces verts	40 000	0,01	0,02	0,64%
sous-total		269 200	0,05	0,17	4,32%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	81 400	0,02	0,05	1,31%
	Marketing	100 000	0,02	0,06	1,60%
	Gardiennage	50 000	0,01	0,03	0,80%
	Dotation vestimentaire	57 255	0,01	0,04	0,92%
	Collecte de fonds	15 000	0,00	0,01	0,24%
	Autres charges	50 000	0,01	0,03	0,80%
sous-total		353 655	0,07	0,22	5,67%
Pièces détachées	Matériel roulant	488 400	0,09	0,30	7,83%
	Installations fixes	0	0,00	0,00	0,00%
sous-total		488 400	0,09	0,30	7,83%
TOTAL Coût d'exploitation		**6 236 643**	**1,16**	**3,83**	**100%**

Tableau 58: Coût d'exploitation estimé d'un autobus articulé

2010	Capacité annuelle	Fréquence (minutes)	Vitesse commerciale (km/h)	Ponctualité (% de site propre)	Emprise au sol (GLO) (m)	Fiabilité	Accessibilité	Coûts d'investissement (M€/km)	Coûts d'exploitation (€/an)	GES (tCO2/an)	Image de l'insertion (0-10)
Tramway 32m	10 206 000	5	20	90	5,85	9	1	27,41	8 927 162	0	9
Translohr	8 675 100	5	20	90	5,46	8	1	24,27	8 859 740	0	9
TVR	6 633 900	5	20	90	6,14	7	1	16,51	7 212 243	78,144	7
CIVIS	5 358 150	5	20	80	6,8	8	1	7,42	6 337 127	781,44	6
Trolleybus	5 358 150	5	20	70	6,8	9	0	10,1	6 999 907	0	6
Autobus articulé	5 358 150	5	20	70	6,8	9	0	5,93	6 236 643	781,44	5
Poids	50	20	30	20	10	10	10	50	50	25	25
Seuil d'indifférence	10%	1	10%	10%	10%	1	0	10%	10%	15%	1
Seuil de préférence	20%	2	20%	20%	20%	2	1	30%	20%	30%	3
Seuil de veto	50%		50%	50%	30%				50%		4

Tableau 59: Matrice de performance avec des hypothèses : scenario 1

6.3.2. Résultat

Comme indiqué précédemment le scénario 1 fixe le même niveau de service du point de vue de la fréquence (5 minutes) et de la vitesse commerciale (20 km/h). De plus, l'espacement entre les stations est de 500 m soit 30 stations pour 15 km.

Rang	Poids de référence	Poids 1	Poids 2	Poids 3	Rang
1	Tramway	Tramway	TVR, CIVIS/Autobus	Tramway	1
2	Translohr	Translohr, TVR	Tramway	Translohr, TVR	2
3	TVR	CIVIS/Trolleybus	Translohr	CIVIS/Trolleybus	3
4	CIVIS/Trolleybus/Autobus	Autobus	Trolleybus	Autobus	4

Tableau 60: Rangs de chaque système selon le scenario 1

La méthode ELECTRE III nous permet de classer, à partir de l'affectation des poids :

- Poids de référence : le tramway au premier rang et le Tranlohr au deuxième rang,
- Poids 1 : le tramway au premier rang, le Translohr et le TVR au deuxième rang,
- Poids 2 : le TVR et le CIVIS/l'autobus au premier rang, le tramway au deuxième rang,
- Poids 3 : le tramway au premier rang, le Translohr et le TVR au deuxième rang, comme celui de poids 1.

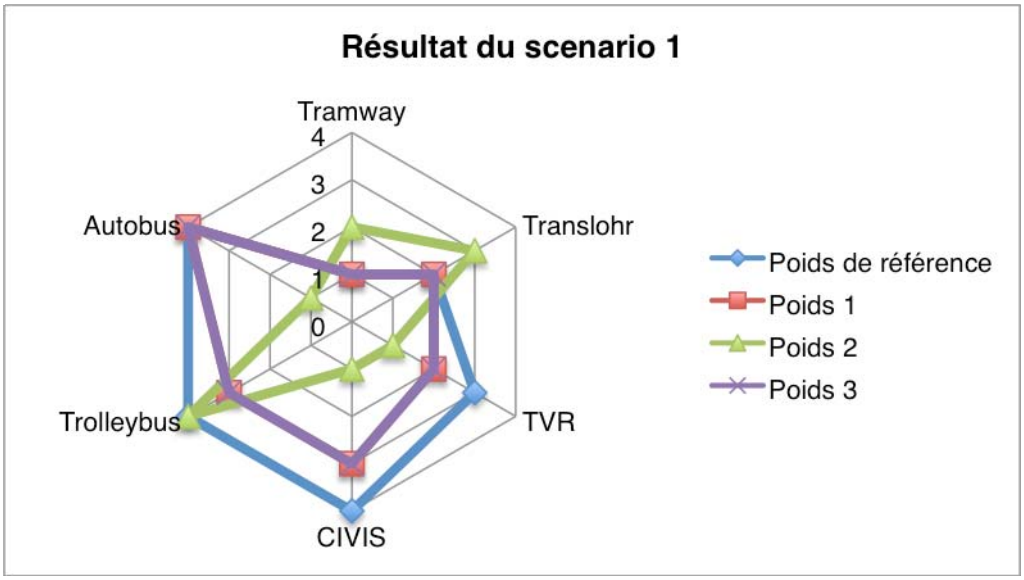


Figure 92: Résultat du scenario 1

Dans ce premier scenario, le système tramway se classe 3 fois sur 4 en première position. Le TVR, le CIVIS et l'autobus se classent 1 fois en première position.

Donc on peut conclure que, quand le niveau de service est plus ou moins identique, le tramway pourrait être considéré comme le meilleur système de transport car il transporte beaucoup plus de gens avec un même nombre de véhicules. Cependant, si les coûts deviennent trop importants pour la ville, le TVR et le CIVIS/autobus pourraient être une solution adéquate au lieu du tramway. Néanmoins, dans ce cas, comme les coûts sont importants il serait mieux de choisir le CIVIS ou l'autobus plutôt que le TVR jugé plus cher que ces 2 systèmes. Autrement dit, le type de BHNS peut être une solution convenable dans le contexte de ce scenario 1 (fréquence identique à 5 minutes).

Dans ce qui suit, nous présentons ces résultats de manière détaillée.

6.3.2.1. Résultat du poids de référence

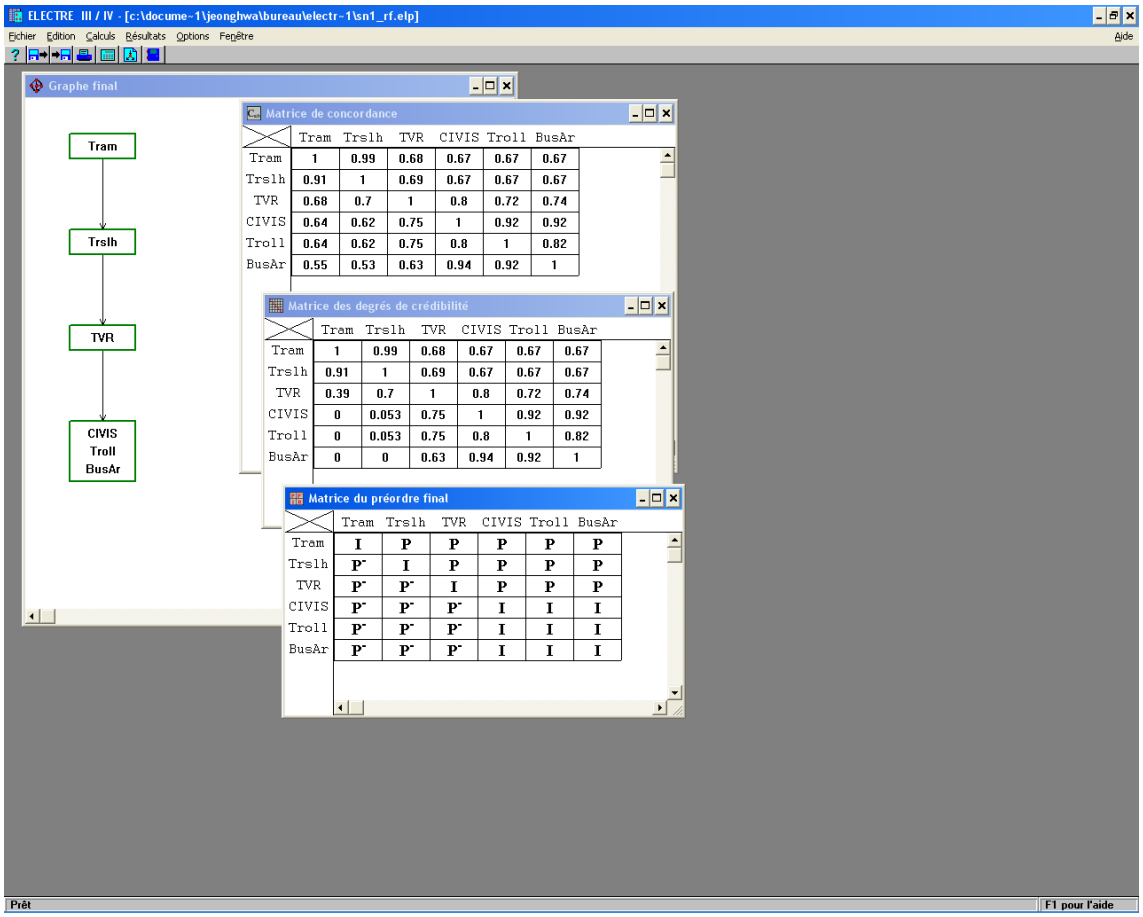


Figure 93: Résultat d'ELECTRE III, scenario 1 (poids de référence)

Ce résultat nous montre que le tramway occupe la tête du classement, le Translohr le deuxième rang, le TVR le troisième rang et les autres systèmes le dernier rang.

6.3.2.2. Résultat du poids 1

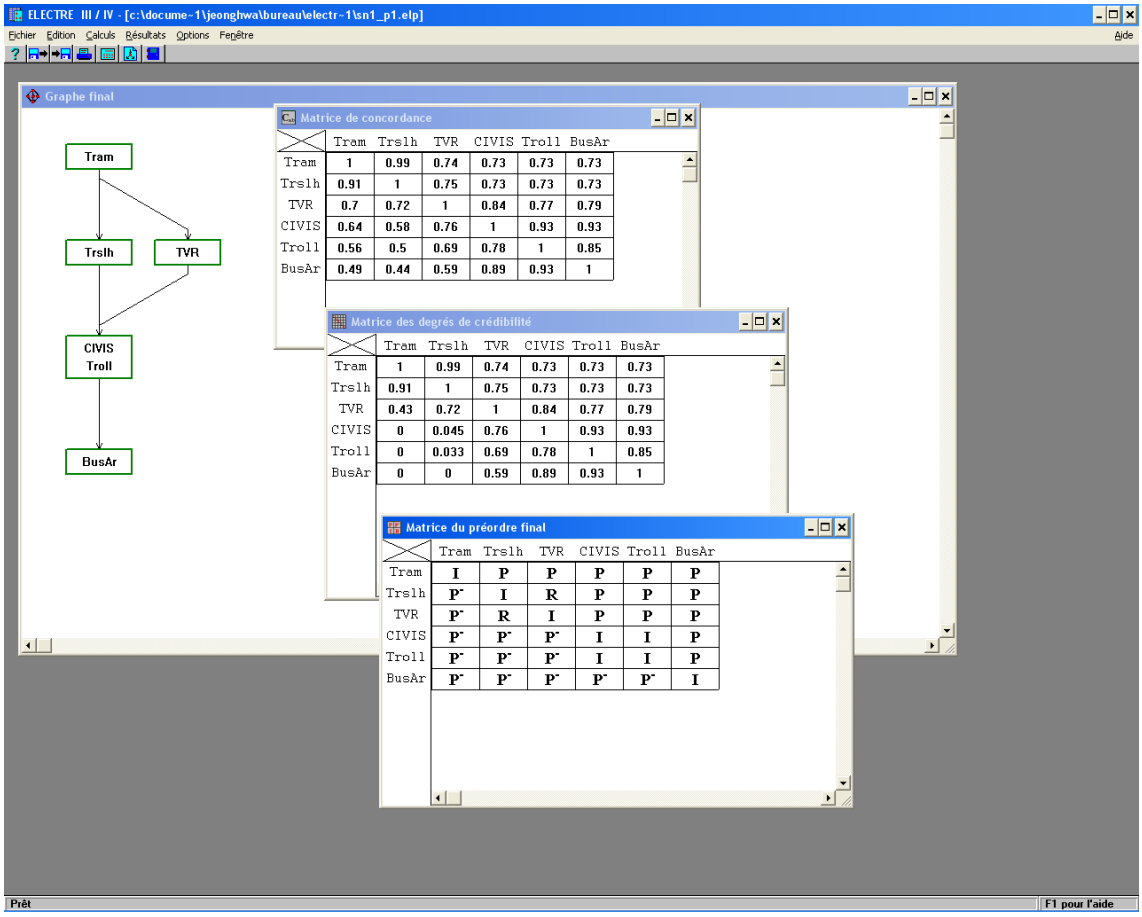


Figure 94: Résultat d'ELECTRE III, scenario 1 (poids 1)

Dans la **Figure 94**, le tramway se situe au-dessus du Translohr et du TVR considérés comme incomparables entre eux qui sont au deuxième niveau, suivi au troisième niveau du CIVIS et du trolleybus considérés « même système », puis de l'autobus articulé.

6.3.2.3. Résultat du poids 2

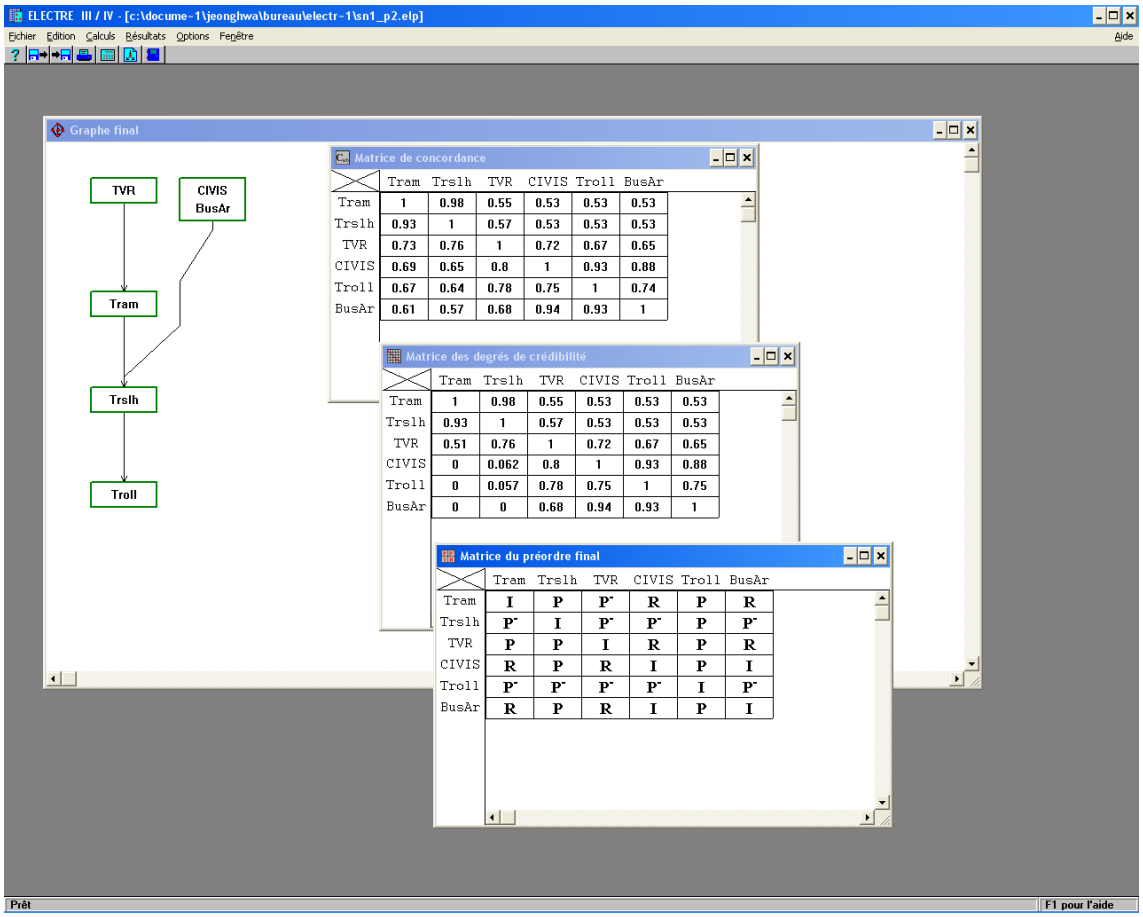


Figure 95: Résultat d'ELECTRE III, scenario 1 (poids 2)

Le TVR surclasse le tramway et successivement le Translohr et le trolleybus. En parallèle, le CIVIS et l'autobus articulé sont considérés comme « même système », surclassant le Translohr suivi du trolleybus.

Par contre, le CIVIS et l'autobus articulé ne sont pas comparables avec le TVR ni le tramway dans ce scenario qui privilège les critères des coûts.

6.3.2.4. Résultat du poids 3

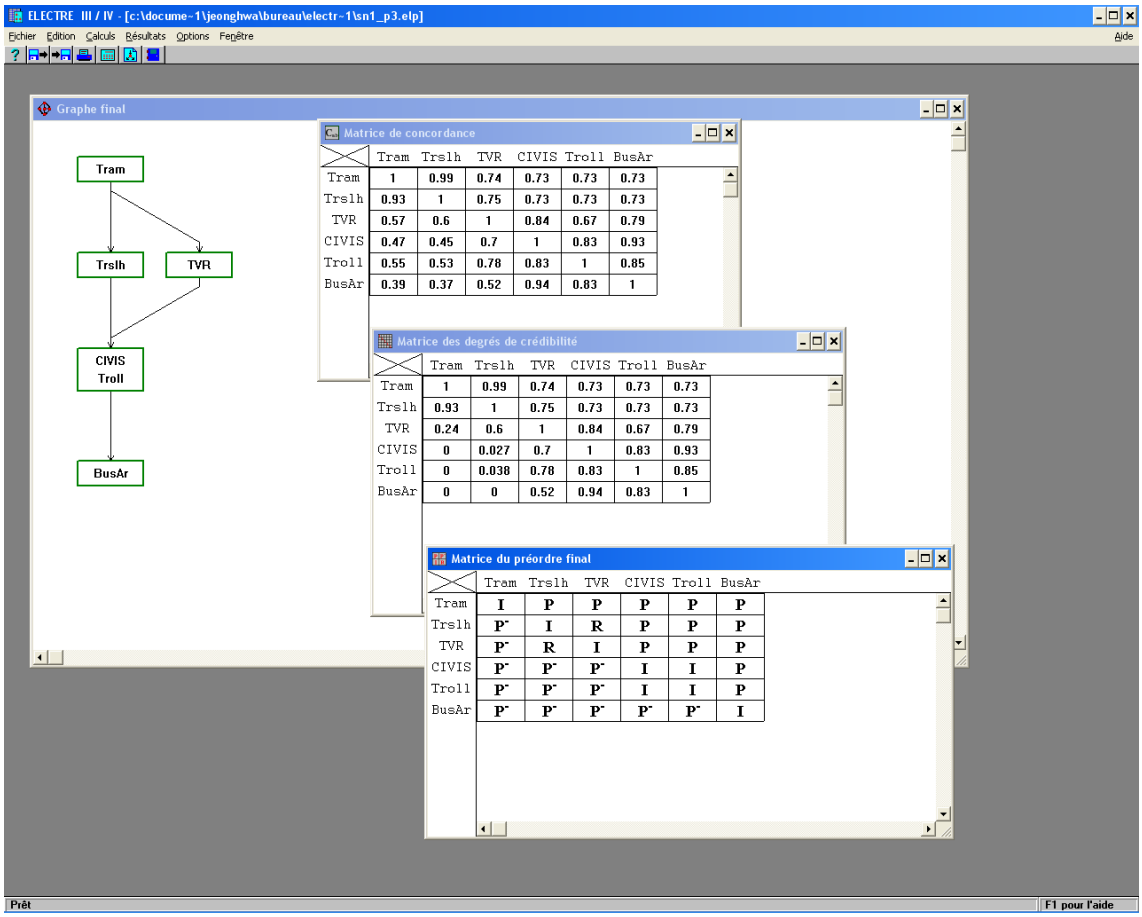


Figure 96: Résultat d'ELECTRE III, scenario 1 (poids 3)

Résultat identique à celui obtenu avec le poids 1, autrement dit, le tramway occupe le premier rang du classement et l'autobus articulé le dernier.

6.4. Scenario 2

6.4.1. Hypothèses

Comme fixé dans le scenario 1, les caractéristiques de la ligne et les autres hypothèses de calcul sont identiques sauf :

- Vitesse commerciale 18 km/h,
- Les fréquences à l'heure de pointe sont variables, selon les modes,
- L'espacement des stations est de 333m, soit un nombre de 45 stations qui influencent le coût de maintenance,
- GES,
- Coût d'exploitation.

La matrice de performance pour le scenario 2 se trouve dans la **Tableau 61**.

En ce qui concerne les coûts d'exploitation, la décomposition des éléments de coût et la façon de les calculer sont identiques par rapport à ce que nous avons utilisé dans le scenario 1. Comme la vitesse commerciale, la fréquence et l'espacement sont modifiés, l'offre de service est modifiée, donc le coût de personnel est aussi changé. Le calcul du coût d'exploitation est fait en appliquant ces changements. Le détail de ces éléments est reporté en annexe.

2010	Capacité annuelle	Fréquence (minutes)	Vitesse commerciale (km/h)	Ponctualité (% de site propre)	Emprise au sol (GLO) (m)	Fiabilité	Acces sibilité	Coûts d'investissement (M€/km)	Coûts d'exploitation (€/an)	GES (tCO2/an)	Image de l'insertion (0-10)
Tramway 32m	12 757 500	4,0	18	90	5,85	9	1	27,41	10 680 885	0,00	9
Translohr	12 393 000	3,5	18	90	5,46	8	1	24,27	11 547 330	0,00	9
TVR	11 056 500	3,0	18	90	6,14	7	1	16,51	10 417 178	128,94	7
CIVIS	8 930 250	3,0	18	80	6,8	8	1	7,42	9 501 745	1 376,74	6
Trolleybus	8 930 250	3,0	18	70	6,8	9	0	10,1	10 173 126	0,00	6
Autobus articulé	8 930 250	3,0	18	70	6,8	9	0	5,93	9 348 351	1 376,74	5
Poids	50	20	30	20	10	10	10	50	50	25	25
Seuil d'indifférence	10%	1	10%	10%	10%	1	0	10%	10%	15%	1
Seuil de préférence	20%	2	20%	20%	20%	2	1	30%	20%	30%	3
Seuil de veto	50%		50%	50%	30%				50%		4

Tableau 61: Matrice de performance avec des hypothèses : scenario 2

6.4.2. Résultat

Dans ce scenario 2, les fréquences ont été adaptées pour transporter un nombre équivalent de passagers (4 minutes pour le tramway, 3,5 pour le Translohr et 3 pour les autres systèmes) : soit un nombre de passagers de 10 millions environ par an. De toute façon, il est à noter que le seuil de 3 minutes de fréquence pour un système de transport de surface ne peut être diminué au risque de créer un phénomène de queue préjudiciable à la bonne exploitation du système. Par exemple, les systèmes routiers en site propre de petites capacités dit BHNS ne pourront pas dépasser cette offre de transport. Au delà, le choix devient évident il se porte soit sur les tramways sur fer soit sur pneus d'autant qu'ils sont modulables. Dans notre étude nous nous limitons néanmoins aux véhicules de tramway de 32 mètres pour pouvoir les « comparer » aux systèmes routiers.

Rang	Poids de référence	Poids 1	Poids 2	Poids 3	Rang
1	Tramway	Tramway	Tramway, CIVIS/Autobus	Tramway	1
2	Translohr/TVR	Translohr/TVR	Translohr/TVR	Translohr, TVR	2
3	CIVIS	Autobus	Trolleybus	Autobus	3
4	Trolleybus	CIVIS/Trolleybus		Trolleybus	4
5	Autobus			CIVIS	5

Tableau 62: Rangs de chaque système selon le scenario 2

La méthode ELECTRE III nous permet de classer, à partir de l'affectation des poids :

- Poids de référence : le tramway au premier rang, le Translohr/le TVR au deuxième rang,
- Poids 1 : le tramway au premier rang, le Translohr/le TVR au deuxième rang,
- Poids 2 : le tramway et le CIVIS/l'autobus au premier rang, le Translohr/le TVR au deuxième rang,
- Poids 3 : le tramway au premier rang, le Translohr et le TVR au deuxième rang, résultat identique à celui du poids 1.

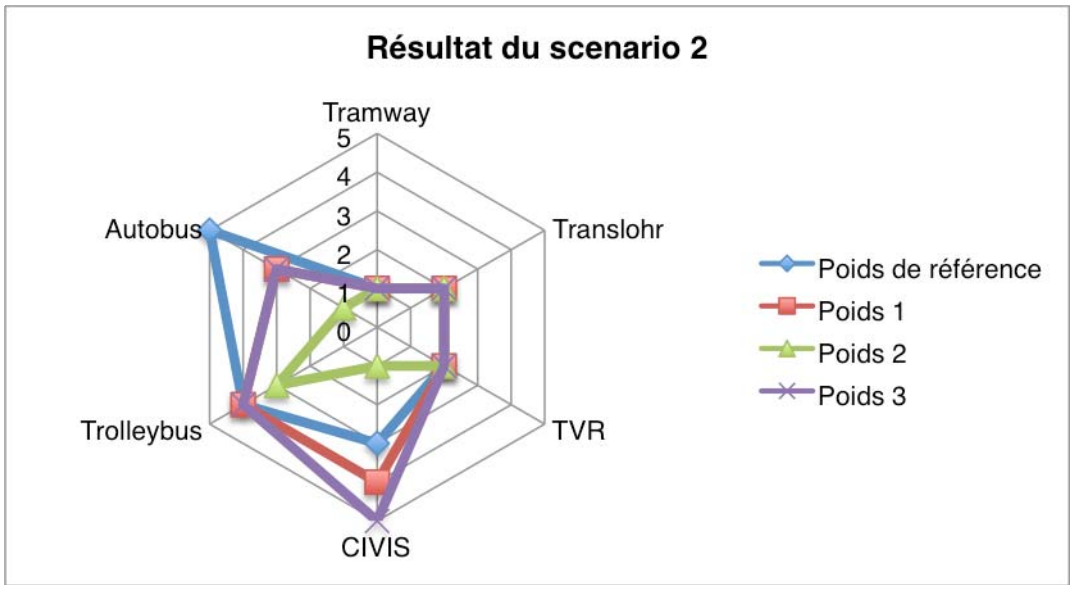


Figure 97: Résultat du scenario 2

Nous avons trouvé, dans ce deuxième scenario, que le système tramway se classe toujours en première position. Le Translohr et le TVR se classent toujours en deuxième position. Le CIVIS et l'autobus occupent une fois le premier rang mais avec le tramway, les trois sont au même niveau.

Donc on peut conclure que, quand nous voulons transporter plus ou moins le même nombre de passagers (autour de 10 millions de passagers par an) en changeant la cadence de service, le tramway pourrait être considéré comme le meilleur système de transport suivi par le Translohr et le TVR, car il nécessite moins de véhicules par rapport aux autres systèmes. Même si les coûts deviennent importants, le tramway garde cet avantage vis-à-vis du CIVIS et de l'autobus.

Il est à noter qu'en aucun cas le Translohr ni le TVR ne surclassent le tramway. De plus, le CIVIS et l'autobus, dans trois quarts des cas, ne sont pas considérés comme une « bonne » solution dans le contexte du scenario 2, c'est-à-dire en vue d'une capacité autour de 10 millions de passagers par an.

Par conséquent, il est vivement recommandé, pour des villes qui veulent un système de transport en site propre pour transporter plus de 10 millions de passagers par an, de penser, d'abord, au système de tramway.

6.4.2.1. Résultat du poids de référence

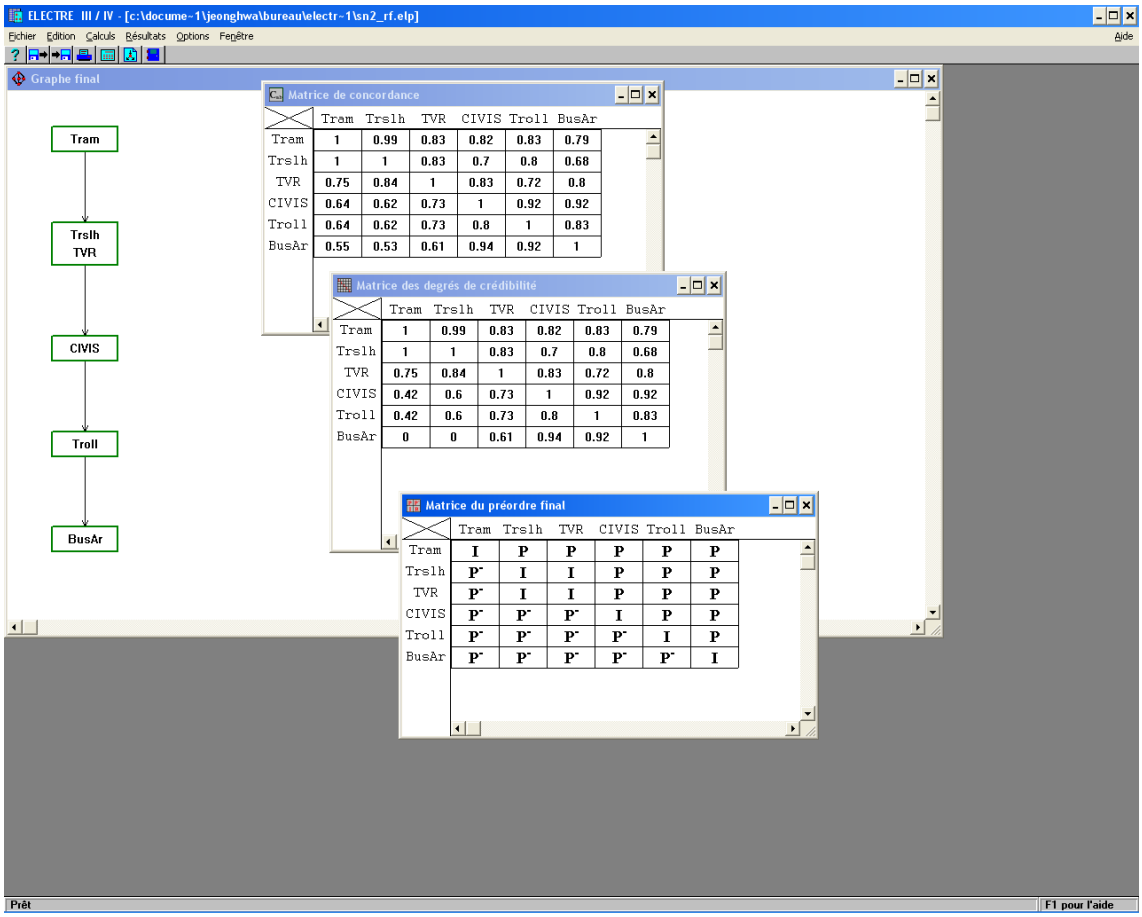


Figure 98: Résultat d'ELECTRE III, scenario 2 (poids de référence)

Ce résultat nous donne les informations suivantes :

- Le Tramway occupe la tête du classement,
- Le Translohr et le TVR sont au deuxième rang,
- Le CIVIS se situe au milieu du classement,
- Le Trolleybus se situe au quatrième rang,
- L'Autobus occupe le dernier rang du classement.

6.4.2.2. Résultat du poids 1

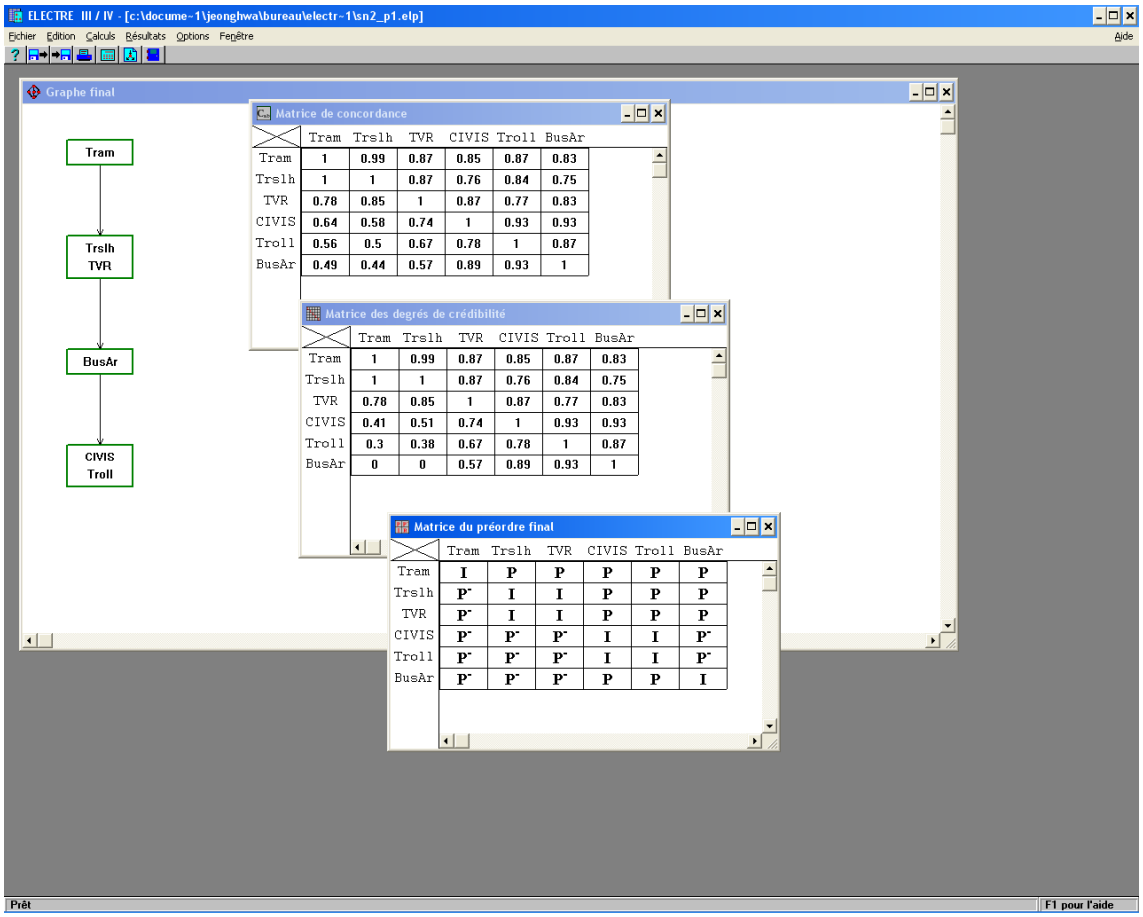


Figure 99: Résultat d'ELECTRE III, scenario 2 (poids 1)

Le résultat obtenu montre que le tramway surclasse le Translohr et le TVR considérés comme « même système », suivi du CIVIS, de l'autobus articulé, suivi lui-même du trolleybus articulé.

6.4.2.3. Résultat du poids 2

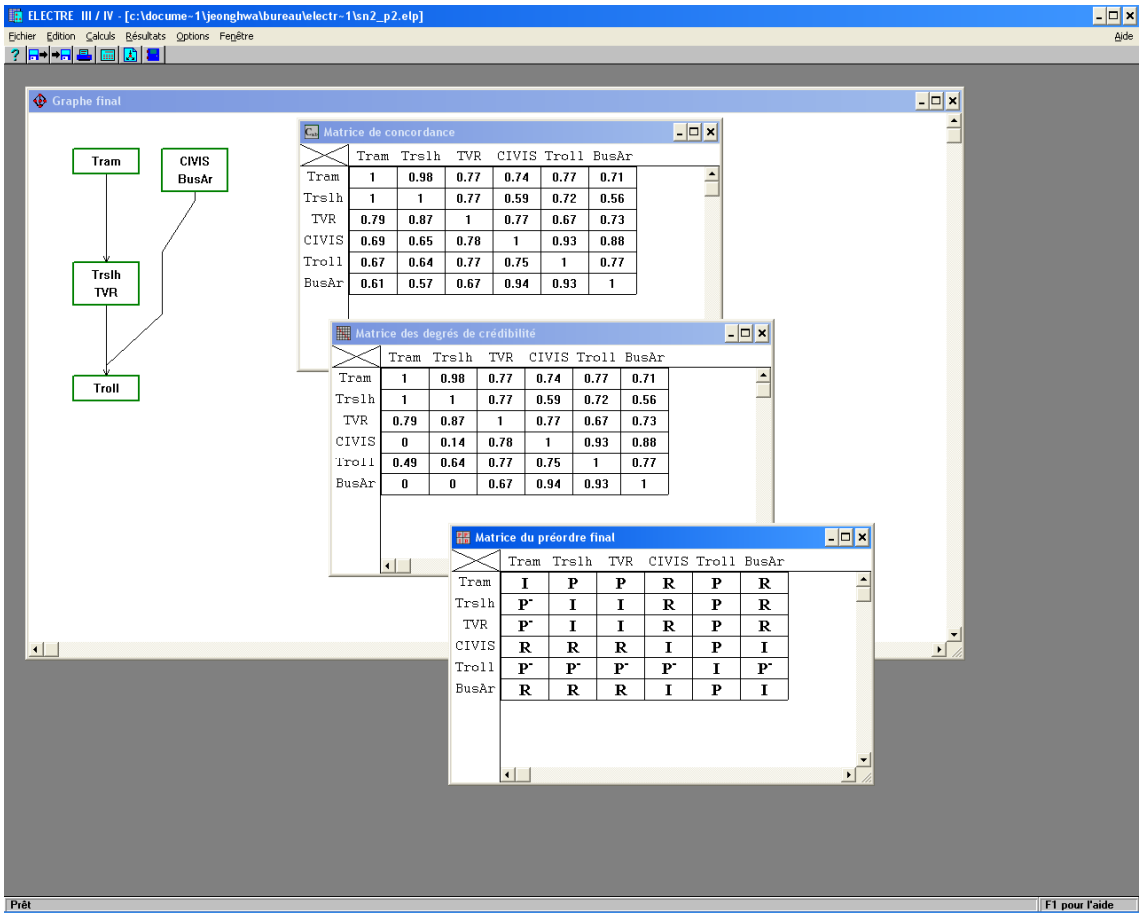


Figure 100: Résultat d'ELECTRE III, scenario 2 (poids 2)

Le résultat obtenu montre que le Tramway se situe au premier rang, suivi au 2ième rang du Translohr et du TVR considérés comme même système lui-même suivi du trolleybus au 3ième rang. En parallèle au Tramway, le CIVIS et l'autobus articulé considérés comme « même système », sont au premier rang surclassant le trolleybus.

6.4.2.4. Résultat du poids 3

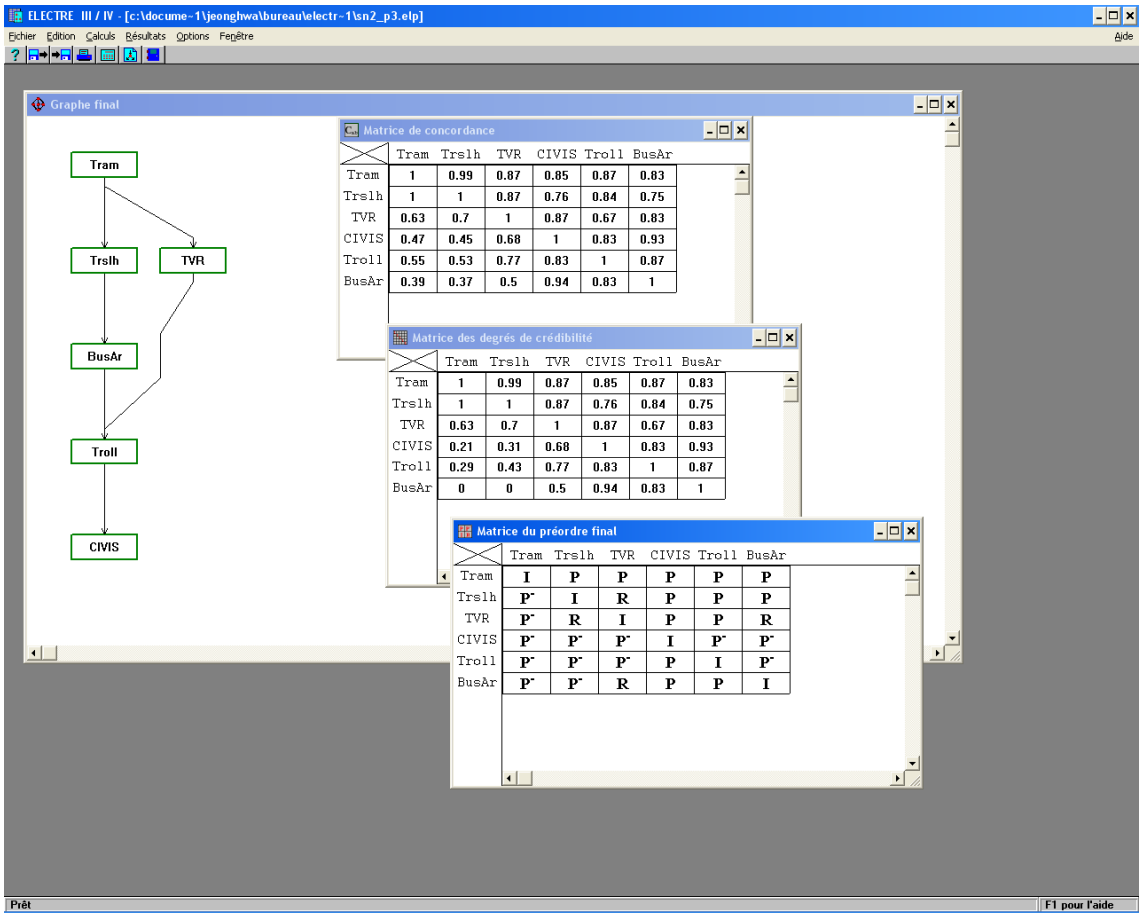


Figure 101: Résultat d'ELECTRE III, scenario 2 (poids 3)

Dans ce cas le tramway surclasse le Translohr suivi successivement de l'autobus articulé lequel est suivi du trolleybus articulé puis du CIVIS.

En parallèle au Translohr on trouve au 2ième rang le TVR considérés comme systèmes différents suivi du Trolleybus au 4ième rang puis du CIVIS au 5ième rang.

6.5.Scenario 3

6.5.1.Hypothèses

Dans le scenario 3, nous supposons que tous les systèmes de transport empruntent le site propre intégral 100% séparé des autres trafics. Les autres conditions sont identiques au scenario 1 sauf :

- Capacités annuelles variables selon des modes,
- Vitesse commerciale 25 km/h,
- La fréquence à l'heure de pointe est 2 minutes,
- Espacement entre stations est 500m,
- Coût d'exploitation.

La matrice de performance pour le scenario 3 se trouve à la **Tableau 63**.

2010	Capacité annuelle	Fréquence (minutes)	Vitesse commerciale (km/h)	Ponctualité (% de site propre)	Emprise au sol (GLO) (m)	Fiabilité	Accessibilité	Coûts d'investissement (M€/km)	Coûts d'exploitation (€/an)	GES (tCO2/an)	Image de l'insertion (0-10)
Tramway 32m	25 515 000	2	25	90	5,85	9	1	27,41	14 977 242	0,00	9
Translohr	21 687 750	2	25	90	5,46	8	1	24,27	14 889 343	0,00	9
TVR	16 584 750	2	25	90	6,14	7	1	16,51	12 044 145	200,24	7
CIVIS	13 395 375	2	25	80	6,8	8	1	7,42	11 072 112	2 002,44	6
Trolleybus	13 395 375	2	25	70	6,8	9	0	10,1	11 790 855	0,00	6
Autobus articulé	13 395 375	2	25	70	6,8	9	0	5,93	10 844 441	2 002,44	5
Poids	50	20	30	20	10	10	10	50	50	25	25
Seuil d'indifférence	10%	1	10%	10%	10%	1	0	10%	10%	15%	1
Seuil de préférence	20%	2	20%	20%	20%	2	1	30%	20%	30%	3
Seuil de veto	50%		50%	50%	30%				50%		4

Tableau 63: Matrice de performance avec des hypothèses : scenario 3

6.5.2. Résultat

En utilisant le matériel roulant jusqu'aux limites de sa capacité (fréquence 2 minutes, vitesse commerciale 25 minutes), nous estimons pouvoir réduire le coût d'exploitation au kilomètre parcouru dans ce scenario 3. Mais il est à noter encore une fois que ce niveau de service n'est pas possible pour les modes de surface dans la pratique.

Nous testons les systèmes aux limites en introduisant le site propre intégral par exemple en aérien sur viaduc pour pouvoir augmenter la vitesse commerciale à 25 km/h et en réduisant l'intervalle à 2 minutes. Le surcoût du viaduc et éventuellement d'une signalisation adaptée nécessaires est équivalent pour chaque système, il n'est donc pas calculé ni appliqué pour cette comparaison.

Rang	Poids de référence	Poids 1	Poids 2	Poids 3	Rang
1	Tramway	Tramway	Tramway, CIVIS/Autobus	Tramway/Translohr, TVR	1
2	Translohr, TVR	Translohr, TVR	TVR	Trolleybus	2
3	CIVIS/Trolleybus	CIVIS/Trolleybus	Translohr	Autobus	3
4	Autobus	Autobus	Trolleybus	CIVIS	4

Tableau 64: Rangs de chaque système selon le scenario 3

La méthode ELECTRE III nous permet de classer, à partir de l'affectation des poids :

- Poids de référence : le tramway au premier rang, le Translohr et le TVR au deuxième rang,
- Poids 1 : le tramway au premier rang, le Translohr et le TVR au deuxième rang,
- Poids 2 : le tramway et le CIVIS/l'autobus au premier rang, le TVR au deuxième rang,
- Poids 3 : le tramway/le Translohr et le TVR au premier rang, le trolleybus au deuxième rang.

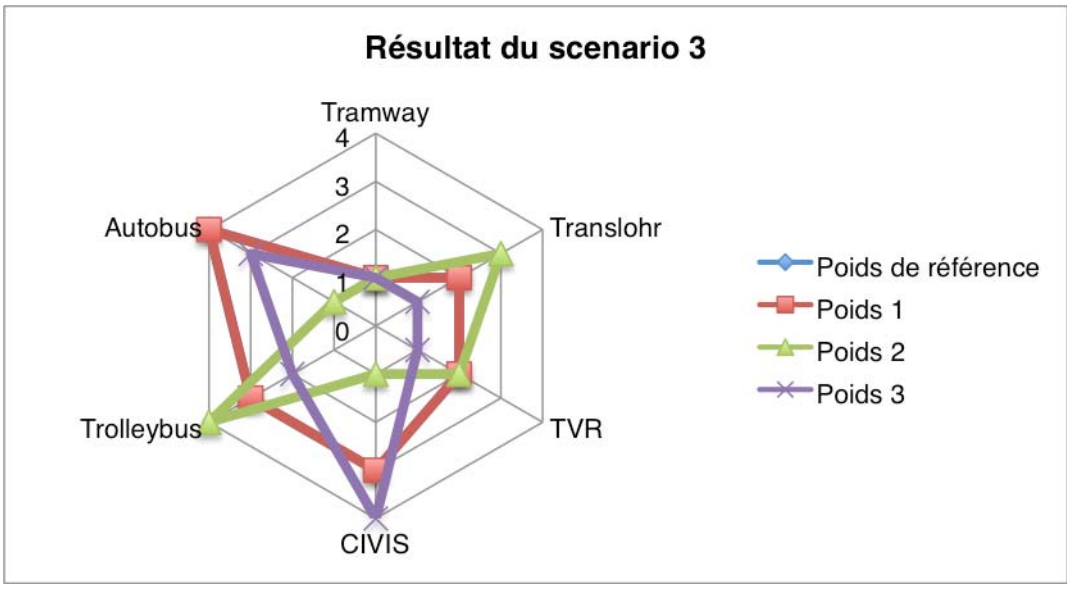


Figure 102: Résultat du scenario 3

Nous avons trouvé, dans ce troisième scenario, que le système tramway se classe toujours en première position. Le Translohr, le TVR, le CIVIS et l'autobus se classent une fois en première position. Le CIVIS, le trolleybus et l'autobus occupent, de temps en temps le dernier rang.

Donc on peut conclure que, quand nous voulons utiliser le système de transport au maximum , le tramway pourrait être considéré comme le meilleur système de transport car il offre plus de capacité, presque 2 fois plus que les modes routiers, avec relativement un moindre coût d'exploitation, bien entendu il a une bonne note pour les autres critères. Même si les coûts deviennent importants, le tramway garde son avantage vis-à-vis du CIVIS et de l'autobus. Cependant, nous avons remarqué qu'à la différence du scenario 1, le CIVIS et l'autobus surclassent le TVR sous prétexte que le poids des coûts devient plus important.

De plus, il est à noter que le Translohr est considéré une fois avec le tramway comme un « même » système tandis que le TVR est incomparable avec ces 2 systèmes pour l'affectation du poids 3 (aspect d'environnement).

6.5.2.1. Résultat du poids de référence

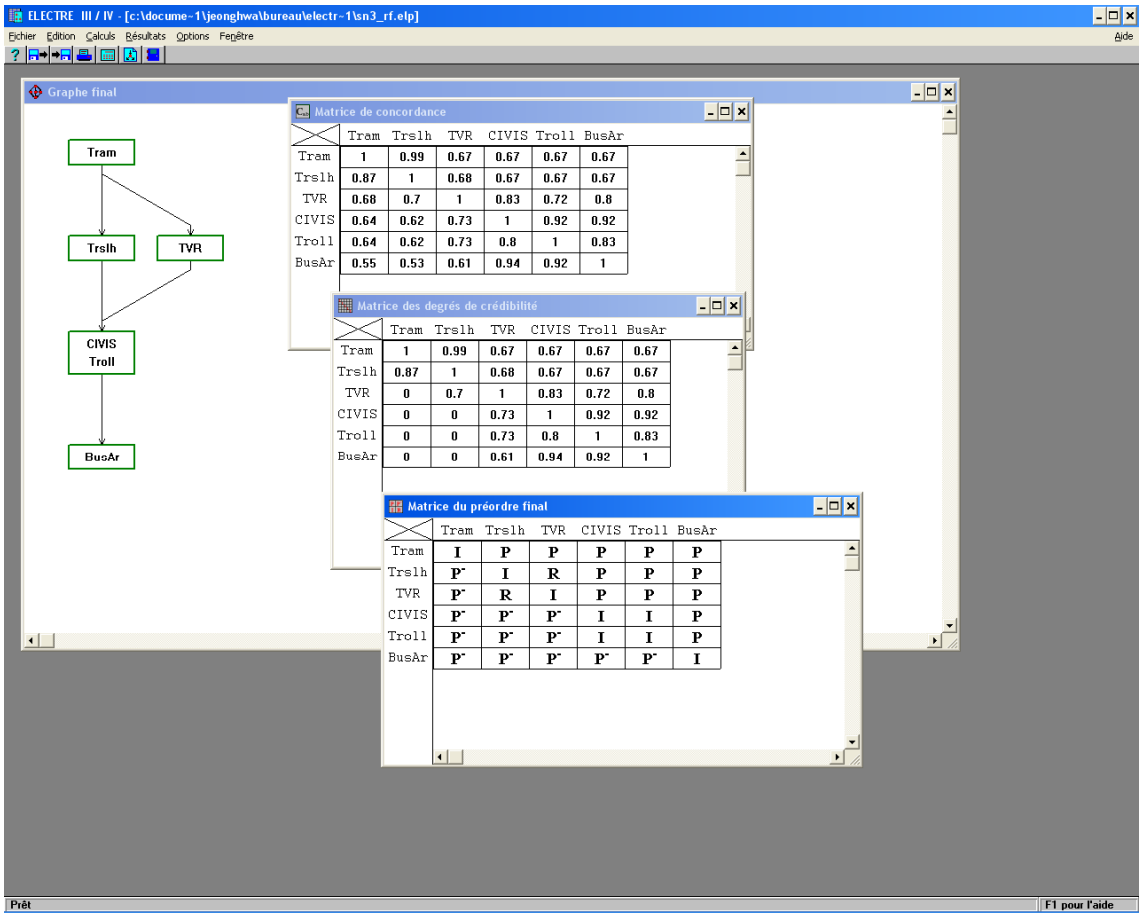


Figure 103: Résultat d'ELECTRE III, scenario 3 (poids de référence)

Dans ce cas le Tramway surclasse le Translohr au 2ième rang. Au 2ième rang on trouve aussi le TVR considéré comme « système différent », au 3ième rang on trouve le CIVIS et le trolleybus considérés comme « même système », enfin au 4ième rang on trouve l'Autobus articulé.

6.5.2.2. Résultat du poids 1

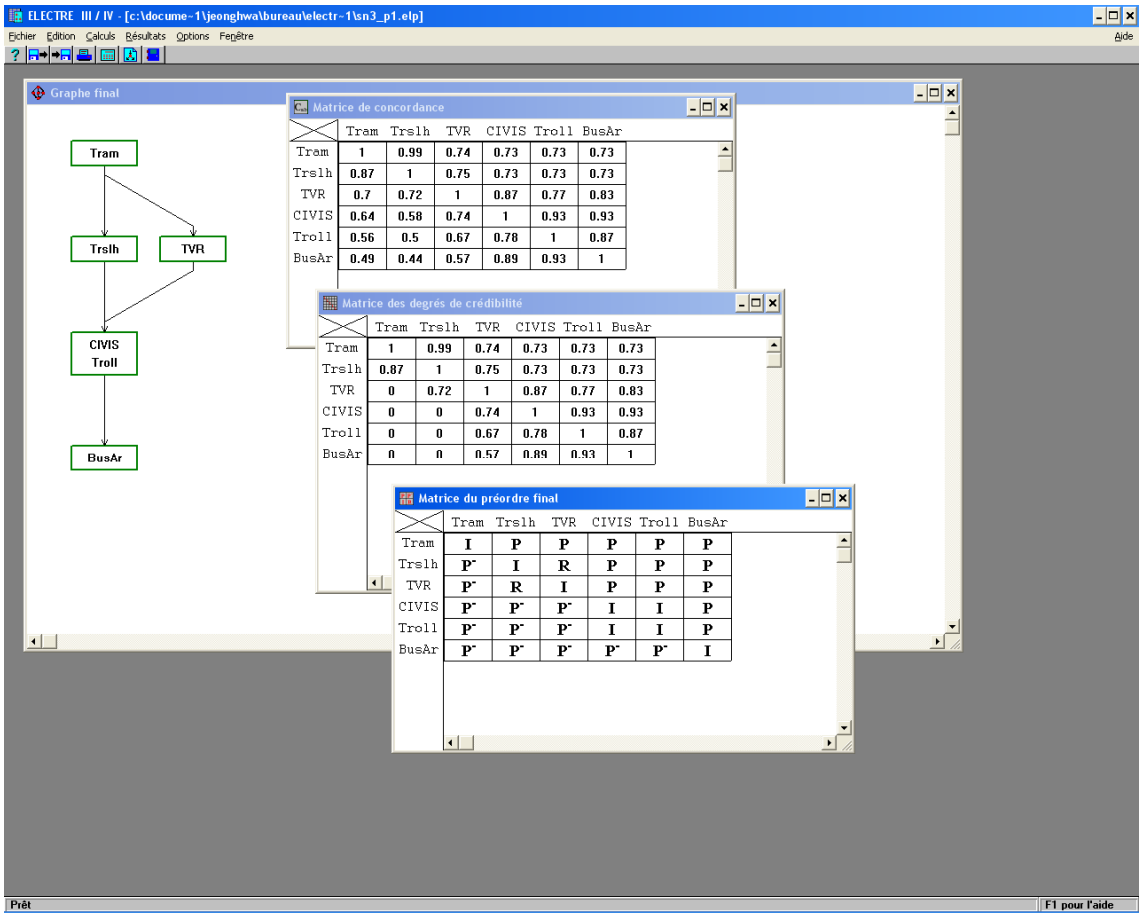


Figure 104: Résultat d'ELECTRE III, scenario 3 (poids 1)

Le résultat obtenu montre que le tramway surclasse le Translohr et le TVR considérés comme « système différent » au 2ième rang, suivi du CIVIS et du Trolleybus considérés comme « même système » au 3ième rang, lui-même suivi de l'autobus articulé au 4ième rang.

6.5.2.3. Résultat du poids 2

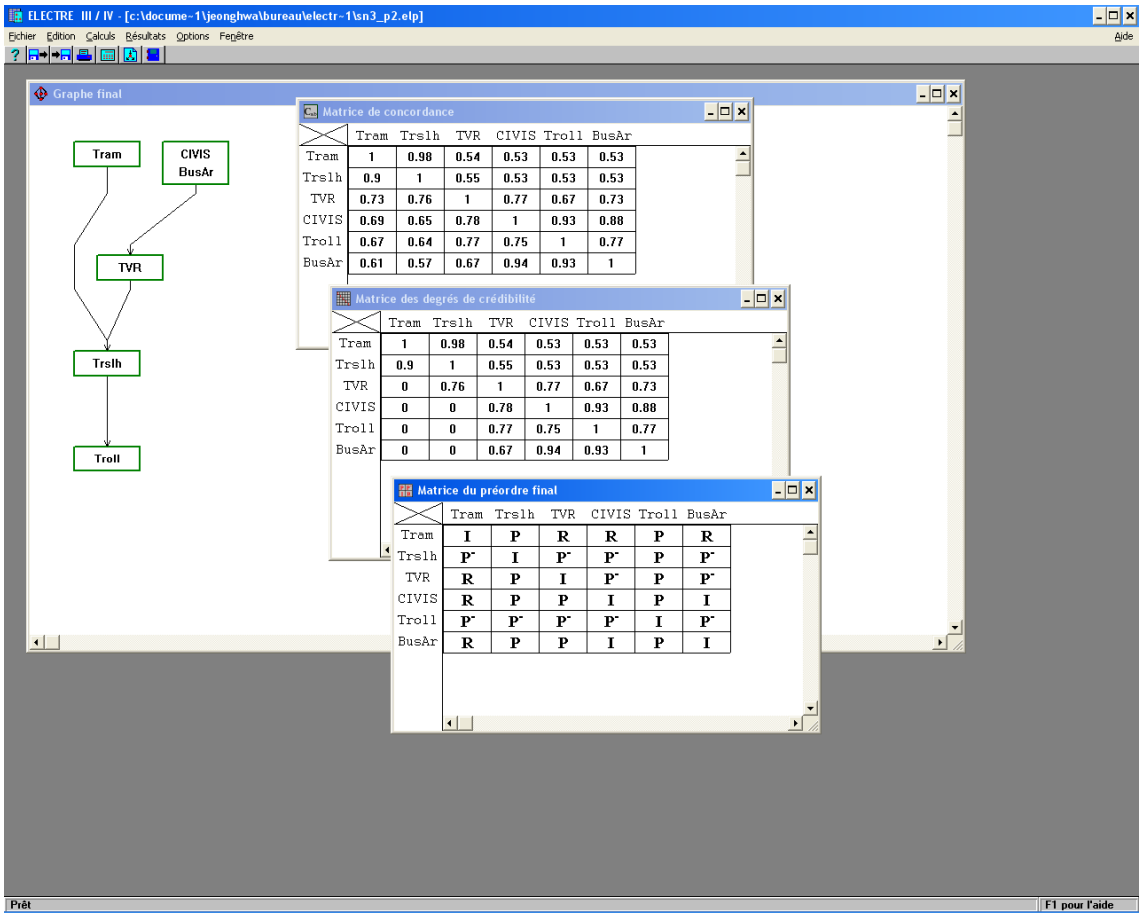


Figure 105: Résultat d'ELECTRE III, scenario 3 (poids 2)

Le résultat obtenu montre que le Tramway surclasse successivement le Translohr puis le trolleybus articulé. En parallèle au Tramway on trouve au 1er rang le CIVIS et l'Autobus articulé considéré comme « même système », suivi du TVR lequel est suivi du Translohr et enfin du trolleybus articulé.

6.5.2.4. Résultat du poids 3

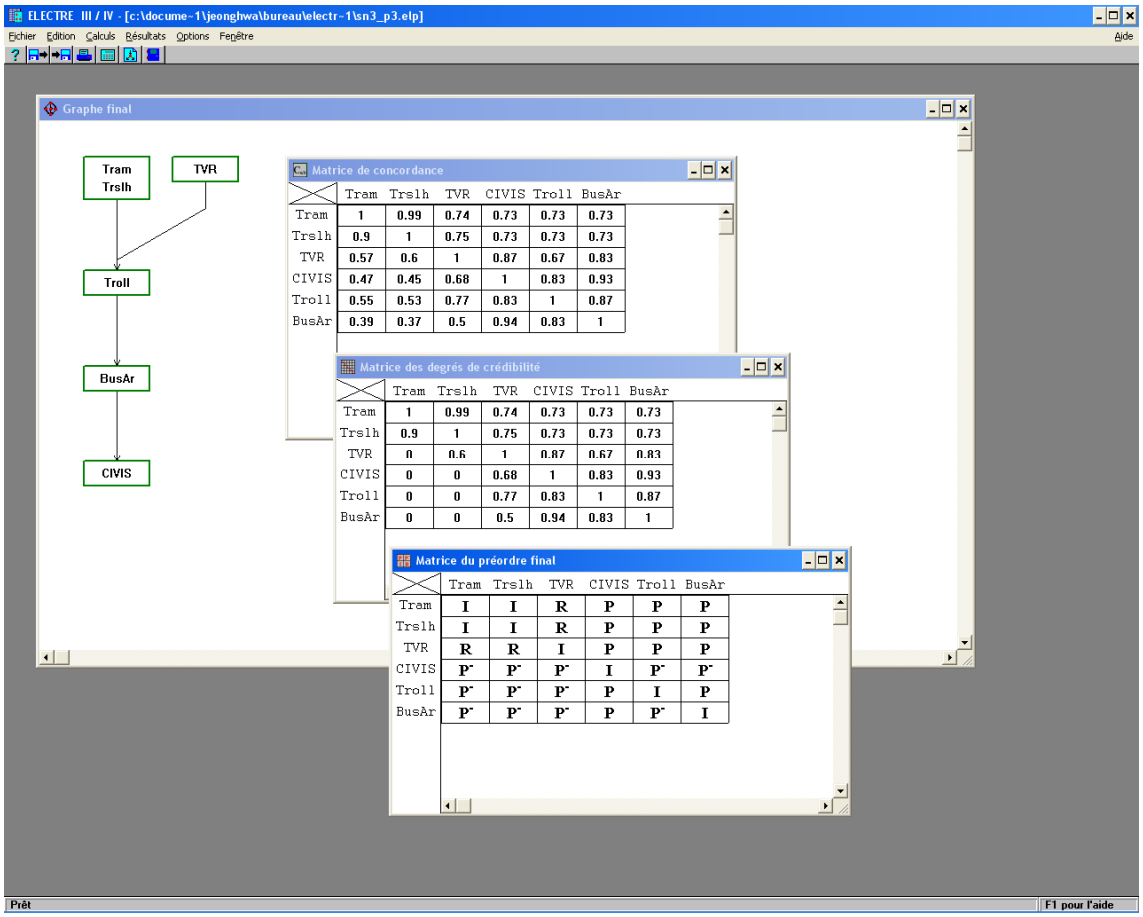


Figure 106: Résultat d'ELECTRE III, scenario 3 (poids 3)

Dans ce cas le tramway et le Translohr considérés comme « même système » se situent au 1er rang. En parallèle on trouve le TVR considéré comme « système différent ». On trouve au 2ième rang le trolleybus, suivi de l'Autobus articulé au 3ième rang et du CIVIS au 4ième rang.

6.6.Scenario 4

6.6.1.Hypothèses

Dans le scenario 4, nous supposons que tous les systèmes de transport offre la même capacité annuelle autour de 5 millions de places par an. Les autres conditions sont identiques à celles du scenario 1 sauf :

- Vitesse commerciale 18 km/h,
- Les fréquences à l'heure de pointe sont adaptées,
- Espacement entre stations est 333 m,
- GES,
- Coût d'exploitation.

La matrice de performance pour le scenario 3 se trouve à la **Tableau 65**.

2010	Capacité annuelle	Fréquence (minutes)	Vitesse commerciale (km/h)	Ponctualité (% de site propre)	Emprise au sol (GLO) (m)	Fiabilité	Acces sibilité	Coûts d'investissement (M€/km)	Coûts d'exploitation (€/an)	GES (tCO2/an)	Image de l'insertion (0-10)
Tramway 32m	5 103 000	10	18	90	5,85	9	1	27,41	6 735 842	0,00	9
Translohr	5 421 938	8	18	90	5,46	8	1	24,27	7 330 924	0,00	9
TVR	5 528 250	6	18	90	6,14	7	1	16,51	6 890 514	64,47	7
CIVIS	5 358 150	5	18	80	6,8	8	1	7,42	6 721 351	773,63	6
Trolleybus	5 358 150	5	18	70	6,8	9	0	10,1	7 369 094	0,00	6
Autobus articulé	5 358 150	5	18	70	6,8	9	0	5,93	6 621 681	773,63	5
Poids	50	20	30	20	10	10	10	50	50	25	25
Seuil d'indifférence	10%	1	10%	10%	10%	1	0	10%	10%	15%	1
Seuil de préférence	20%	2	20%	20%	20%	2	1	30%	20%	30%	3
Seuil de veto	50%		50%	50%	30%				50%		4

Tableau 65: Matrice de performance avec des hypothèses : scenario 4

6.6.2. Résultat

Nous réduisons la demande à 5 millions de passagers par an ce qui devrait favoriser les systèmes routiers par rapport aux tramways sur fer et sur pneus de plus grande capacité dans ce scenario 4. La vitesse commerciale est maintenue à 18 km par heure.

Rang	Poids de référence	Poids 1	Poids 2	Poids 3	Rang
1	Trolleybus	Tramway/Translohr	CIVIS	Trolleybus	1
2	Tramway/Translohr	TVR/CIVIS/Trolleybus	Tramway/Translohr, Autobus	Tramway/Translohr	2
3	CIVIS	Autobus	Trolleybus	TVR, CIVIS/Autobus	3
4	Autobus		TVR		4
5	TVR				5

Tableau 66: Rangs de chaque système selon le scenario 4

La méthode ELECTRE III nous permet de classer, à partir de l'affectation des poids :

- Poids de référence : le trolleybus au premier rang, le tramway/le Translohr au deuxième rang,
- Poids 1 : le tramway/le Translohr au premier rang, le TVR/le CIVIS/le trolleybus au deuxième rang,
- Poids 2 : le CIVIS au premier rang, le tramway/le Translohr et l'autobus au deuxième rang,
- Poids 3 : le trolleybus au premier rang, le tramway/le Translohr au deuxième rang.

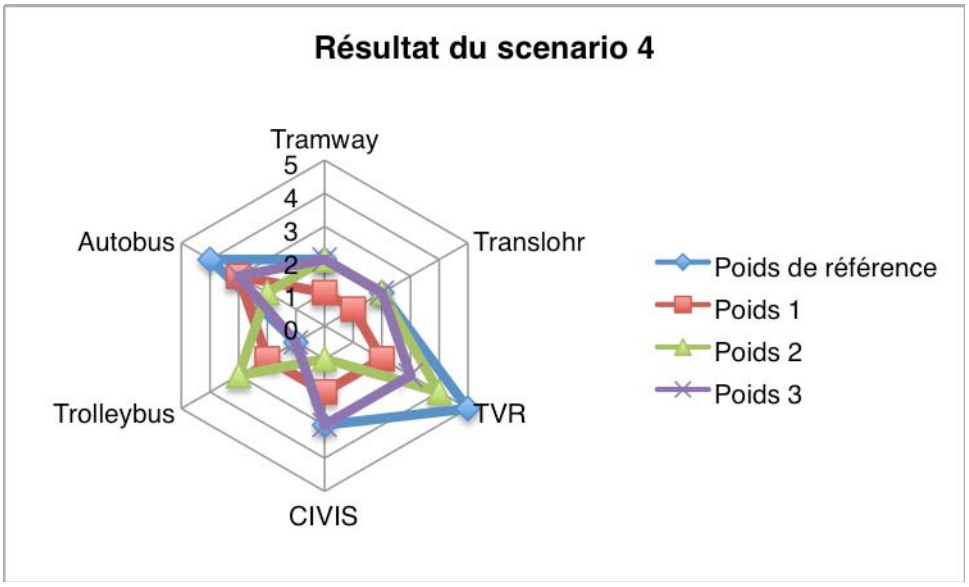


Figure 107: Résultat du scenario 4

Nous observons, dans ce quatrième scenario, non seulement que le résultat n'est pas tout à fait homogène avec les 3 autres scenarii mais aussi que le trolleybus se classe 2 fois en première position. Le Tramway, le Translohr et le CIVIS se classent une fois en première position. L'autobus censé apparaître au premier rang, n'occupe jamais ce rang. Il est monté une fois au deuxième rang, surclassé par le CIVIS dans l'application du poids 2. En outre, le tramway et le Translohr sont souvent considérés comme un « même » système.

Par contre le TVR reste une solution peu souhaitée. De plus, le tramway et le Translohr ne sont pas comparables avec l'autobus dans l'application du poids 2 (coûts) ni avec le trolleybus tandis que le TVR est au dernier rang.

Donc, en résumé, quand nous voulons transporter un nombre relativement faible de passagers (autour 5 millions de passagers par an), le trolleybus pourrait d'abord être retenu comme une bonne solution suivi par le tramway, le Translohr ou encore le CIVIS en fonction de l'importance des différents critères. Dans la même logique, le tramway ou le Translohr peuvent aussi devenir un bon choix selon des cas, ainsi que le CIVIS.

Aujourd'hui, la plupart des villes, notamment moyennes ou petites qui veulent implanter leur propre système de transport en site propre se trouvent dans ce contexte (autour 5 millions de passagers par an) où le choix est jugé considérablement difficile et délicat.

Toutefois comme nous montre le scenario 4, leur choix peut être justifiable tant qu'elles choisissent leur système de transport en site propre, « avec bon sens ». Dans un tel contexte, le choix du système de transport apparaît peu discriminant, sous réserve que la capacité nécessaire reste autour de 5 millions de passagers transportés / an.

6.6.2.1. Résultat du poids de référence

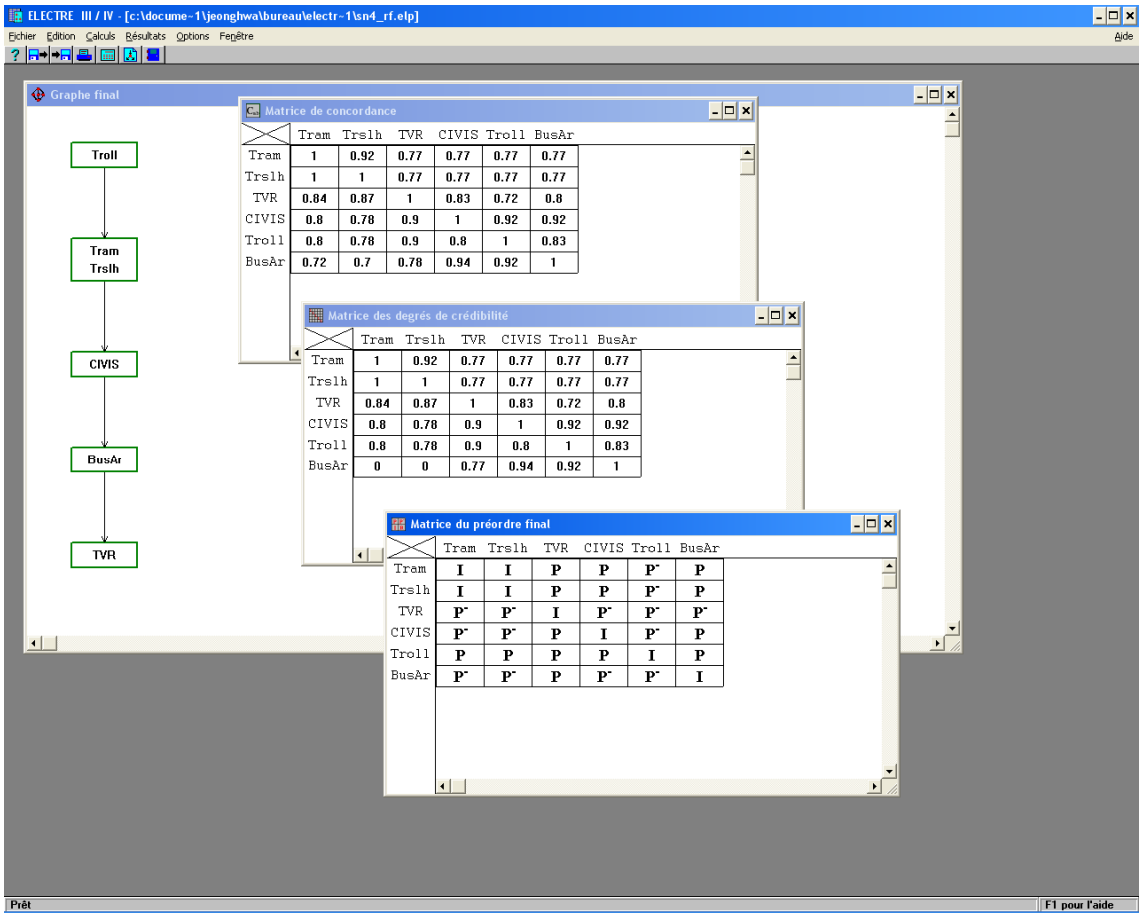


Figure 108: Résultat d'ELECTRE III, scenario 4 (poids de référence)

Dans ce cas le Trolleybus surclasse le Tramway et le Translohr considérés comme « même système » au 2ième rang, on trouve ensuite le CIVIS au 3ième rang, suivi de l'autobus articulé au 4ième rang suivi du TVR au 5ième rang.

6.6.2.2. Résultat du poids 1

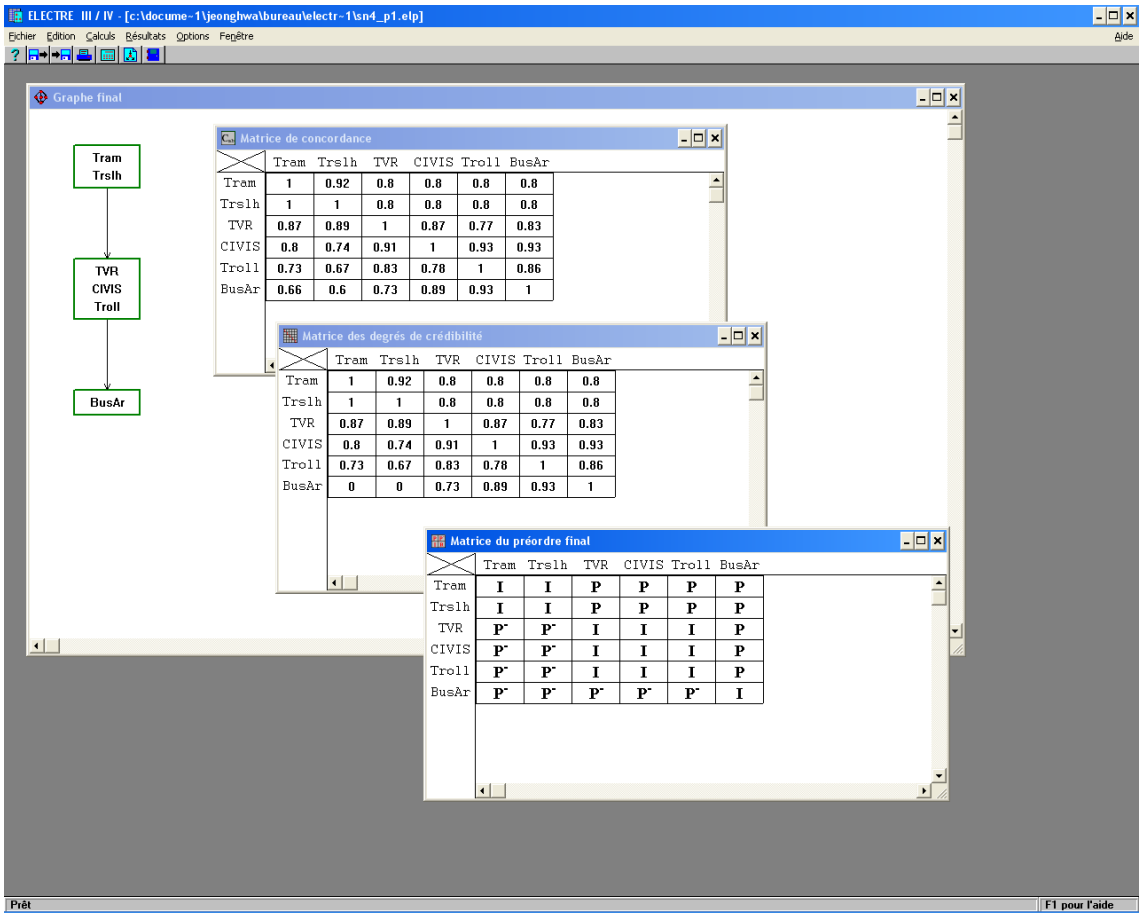


Figure 109: Résultat d'ELECTRE III, scenario 4 (poids 1)

Le tramway et le Translohr considérés comme « même système » surclassent le TVR, le CIVIS et le trolleybus articulé considérés tous trois comme un « même système » qui surclasse l'autobus articulé.

6.6.2.3. Résultat du poids 2

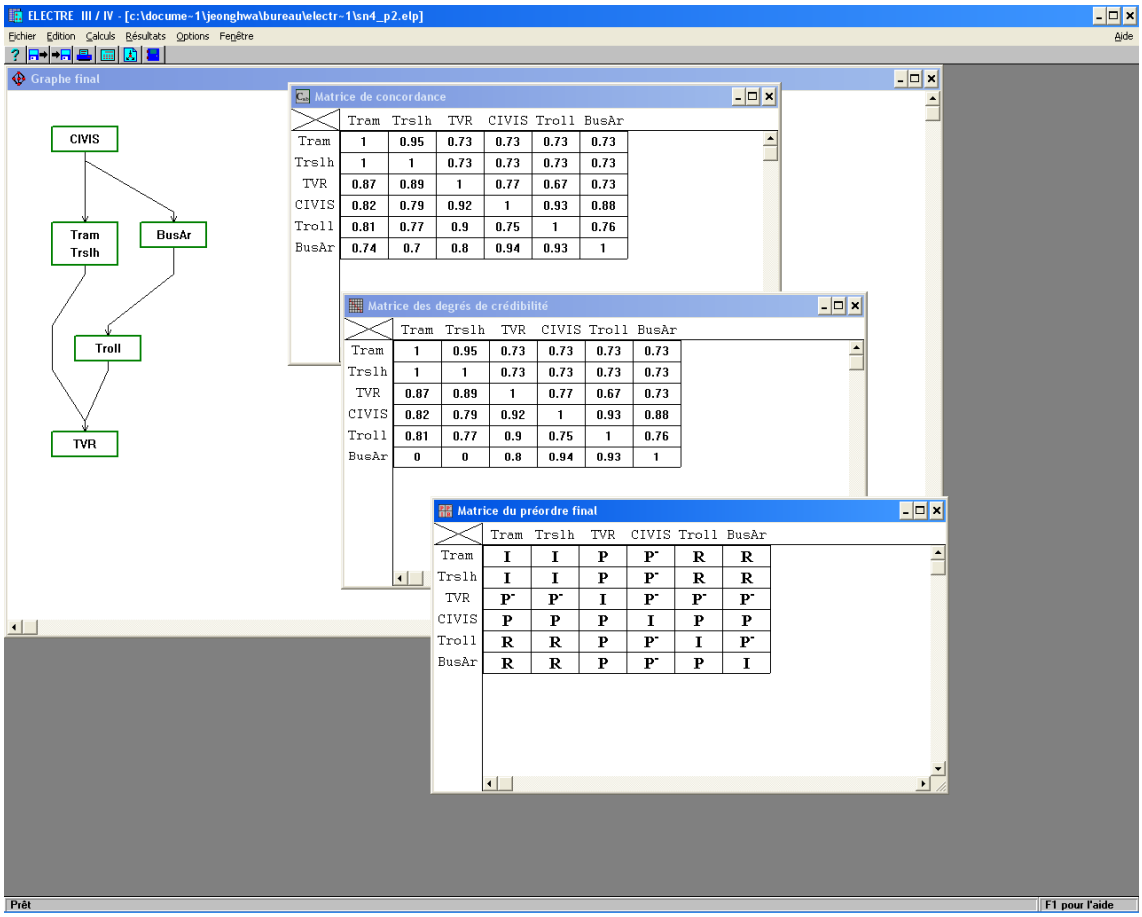


Figure 110: Résultat d'ELECTRE III, scenario 4 (poids 2)

Le CIVIS surclasse le tramway et le Translohr considérés comme un « même système qui surclasse le TVR. En parallèle le CIVIS surclasse l'autobus articulé suivi du trolleybus articulé lequel surclasse le TVR.

6.6.2.4. Résultat du poids 3

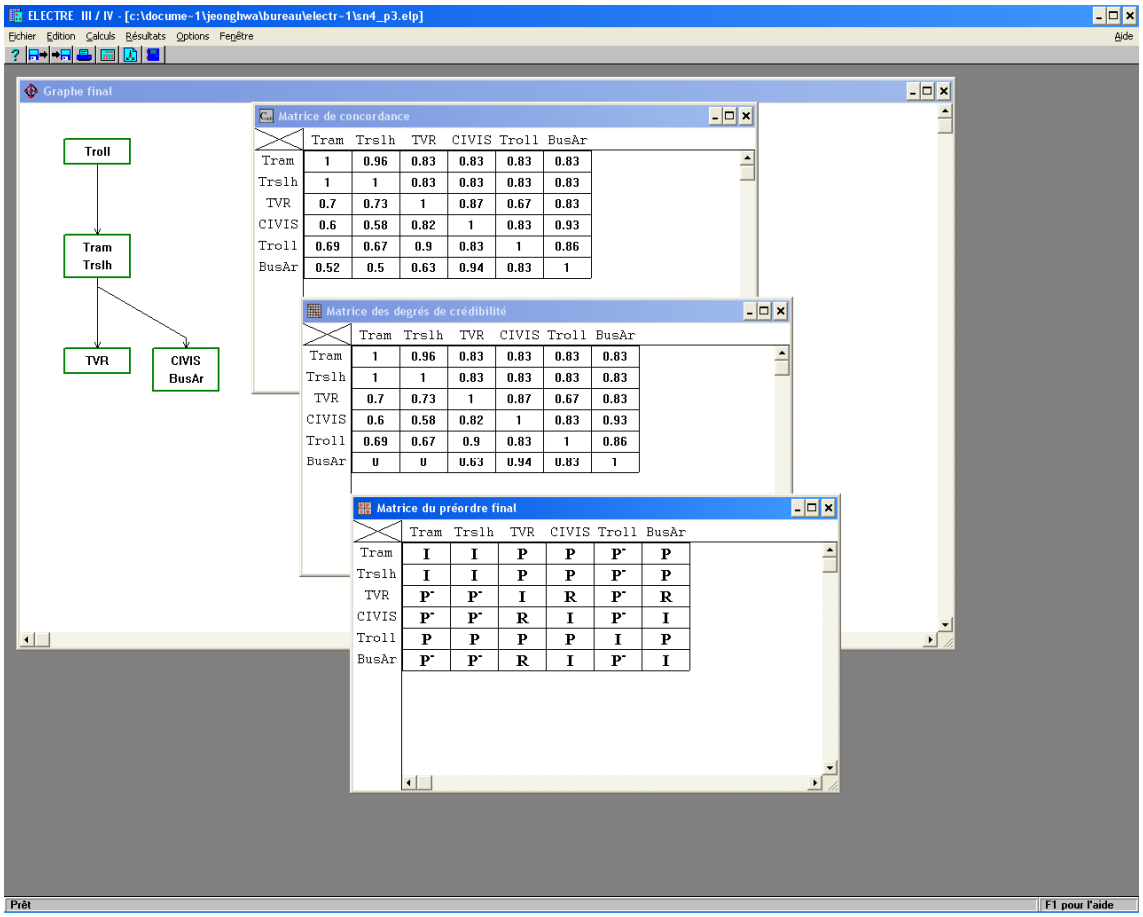


Figure 111: Résultat d'ELECTRE III, scenario 4 (poids 3)

Le trolleybus articulé surclasse le tramway et le Translohr considérés comme un « même système » qui surclasse le TVR d'une part et le CIVIS et l'autobus articulé considérés comme un « même système » d'autre part.

6.7.Synthèse des résultats : données réelles et analyse des 4 scenarii

Dans cette partie, nous tentons de synthétiser et de finaliser toutes les analyses des résultats obtenus auparavant.

Scenario	Poids	Tramway	Translohr	TVR	CIVIS	Trolleybus	Autobus
Données réelles	Référence	1	3	2	4	4	5
	1	1	1	2	3	3	4
	2	2	3	1	1	4	2
	3	1	1	1	4	2	3
Scenario 1 : 5', 20 km/h, 500 m	Référence	1	2	3	4	4	4
	1	1	2	2	3	3	4
	2	2	3	1	1	4	1
	3	1	2	2	3	3	4
Scenario 2 : Capacité 10 M Fréq.adaptées, 333 m	Référence	1	2	2	3	4	5
	1	1	2	2	4	4	3
	2	1	2	2	1	3	1
	3	1	2	2	5	4	3
Scenario 3 : 2', 25 km/h, 500 m	Référence	1	2	2	3	3	4
	1	1	2	2	3	3	4
	2	1	3	2	1	4	1
	3	1	1	1	4	2	3
Scenario 4 : Capacité 5 M Fréq.adap, 18 km/h, 333 m	Référence	2	2	5	3	1	4
	1	1	1	2	2	2	3
	2	2	2	4	1	3	2
	3	2	2	3	3	1	3

Tableau 67: Résultats des analyses comparatives

Nous constatons les résultats suivants, après avoir décompté le nombre de rangs qui se présentent le plus souvent, classés d'une manière simple et synthétique :

- le système du tramway : premier rang 15 fois et deuxième rang 5 fois,
- le système du Translohr : premier rang 4 fois et deuxième rang 12 fois,
- le système du TVR : premier rang 4 fois et deuxième rang 12 fois,
- le système du CIVIS : premier rang 5 fois et troisième rang 8 fois,
- le système du trolleybus : troisième rang 7 fois et quatrième 8 fois,
- le système de l'autobus : troisième rang 6 fois et quatrième 7 fois.

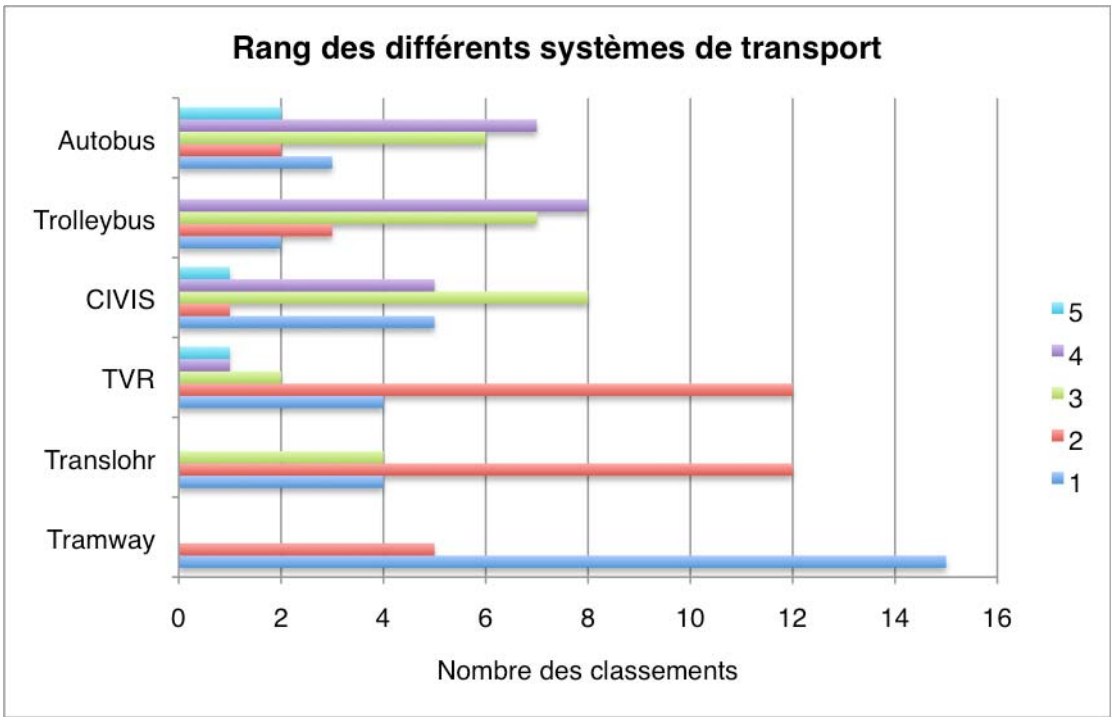


Figure 112: Répartition des rangs des systèmes selon les scenarii

Si l'on examine simplement les rangs 1 et 2 selon les cas, les modes de transport guidé se situent largement en tête : sur le total de 20 possibilités, les premiers positionnements de rang 1 sont donc pour le système tramway 15 fois, le CIVIS 5 fois, le Translohr et TVR 4 fois. Les meilleurs positionnements de rang 2 sont pour le Translohr et le TVR 12 fois, le tramway 5 fois. Parallèlement, les meilleurs positionnements de rang 3 sont pour le CIVIS 8 fois, le trolleybus 7 fois et l'autobus 6 fois.

Rang	Tramway	Translohr	TVR	CIVIS	Trolleybus	Autobus
1	15	4	4	5	2	3
2	5	12	12	1	3	2
3	0	4	2	8	7	6
4	0	0	1	5	8	7
5	0	0	1	1	0	2

Tableau 68: Classement des systèmes de transport

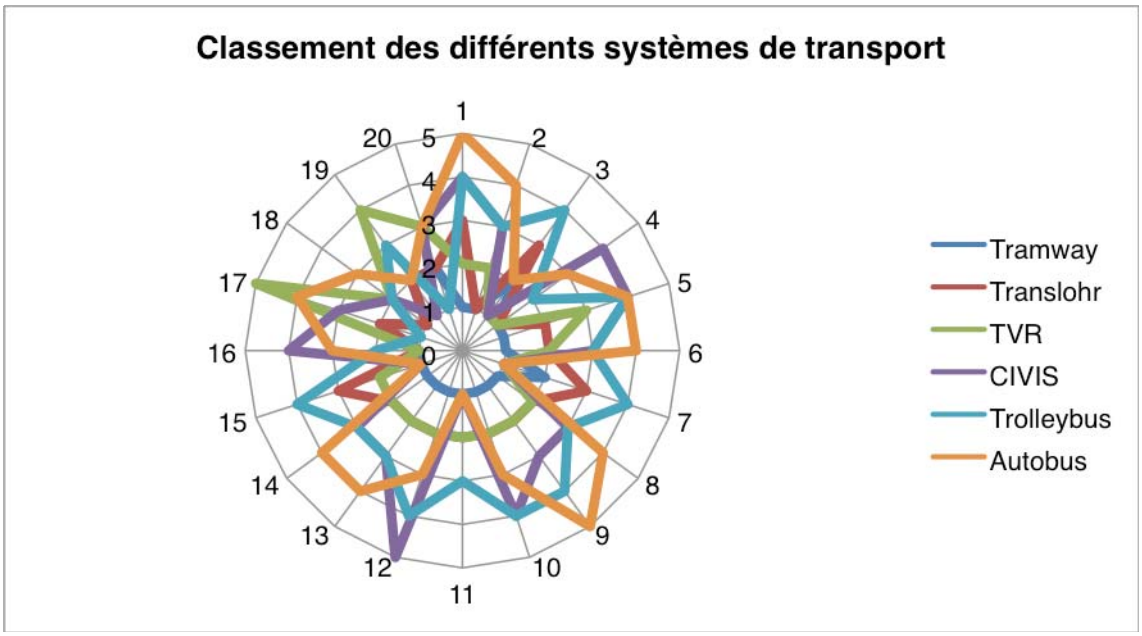


Figure 113: Classement des 6 différents systèmes de transport

La **Figure 113** est une synthèse des rangs de chaque système selon les 20 résultats, qui montre que plus nous approchons du centre du « radar » plus le rang du système est élevé. Par exemple, la trace du tramway est très proche du centre et relativement homogène et ronde tandis que celle de l'autobus est très éloignée du centre et pas homogène ou voire très fluctuante. Donc, selon cette figure, nous pouvons conclure la quasi dominance des systèmes physiquement guidés : le tramway, le Translohr et le TVR.

6.8.Conclusion et commentaire

Si l'on regarde les 4 types de transport en site propre jugés plus performants et adéquats au terme de ce travail, comme nous montre la **Figure 114**, on constate, d'abord, la supériorité du tramway dans presque tous les cas. Le Translohr, si nous laissons de côté le TVR compte tenu des difficultés précédemment évoquées, se situe au même rang dans presque un tiers des cas. Par contre, le CIVIS a des rangs pas très homogènes et doit être retenu avec beaucoup de prudence comme une solution du système de transport en site propre.

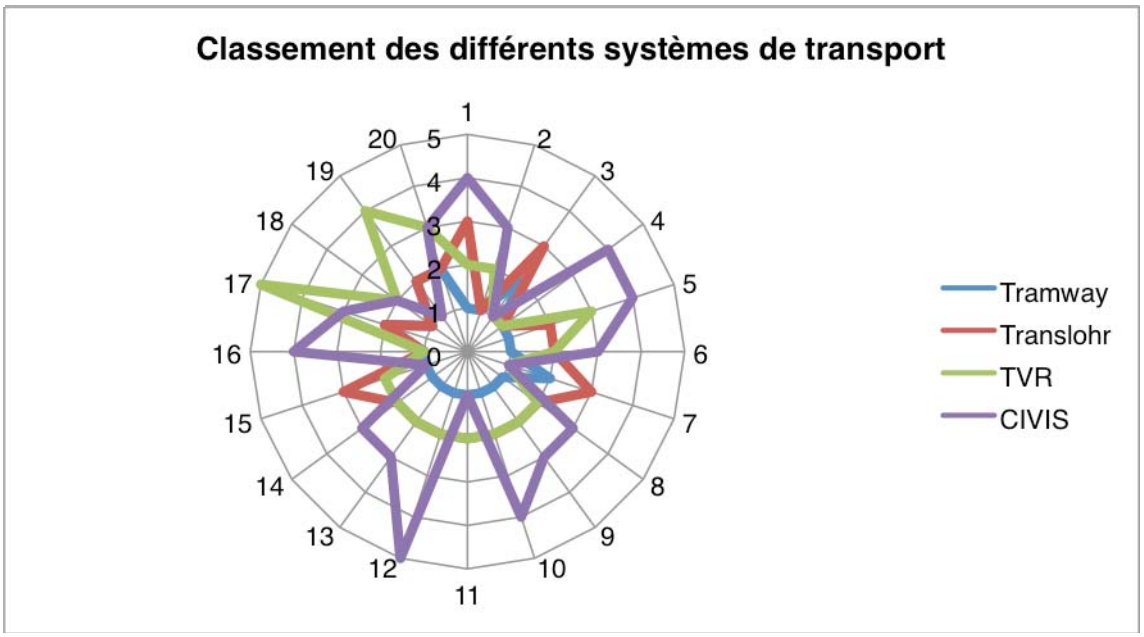


Figure 114: Classement des 4 différents systèmes de transport

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Cas	5,6,7,8	9,10,11,12	13,14,15,16	17,18,19,20
Capacité (M passagers/an)	5 à 10	10	13 à 25	5
Fréquence (minutes)	5	variable (3 à 4)	2	variable (5 à 10)
Vitesse commerciale (km/h)	20	18	25	18
Espacement entre stations (m)	500	333	500	333
coût d'exploitation (M€/an)	6 à 9	9 à 10	11 à 15	6

Tableau 69: Récapitulatif des conditions de chaque scenario

Par ailleurs, il y a quelques cas précis ayant les résultats assez homogènes : le résultat du scenario 2, application du poids 1, du poids 2 et du poids 3.

D'après le résultat du scenario 2, nous trouvons le tramway au premier rang, le Translohr et le TVR au deuxième rang, donc dans le contexte d'une offre de 10 millions

de passager par an, nous devrons penser d'abord au tramway et après, au Translohr ou au CIVIS mais pas à d'autres systèmes.

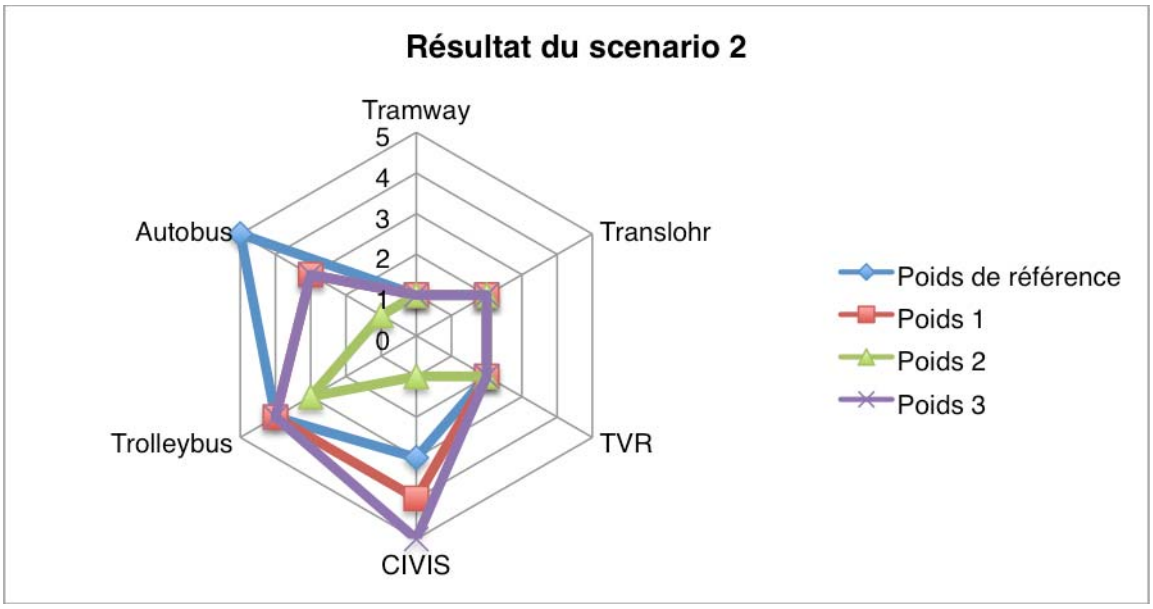


Figure 115: Résultat du scenario 2

Selon le résultat de l'application du poids 1 (performances), il est évident que l'on choisit d'abord le tramway au moment de la décision d'un système de transport en site propre et après le Translohr ou le TVR en tant que deuxième option.

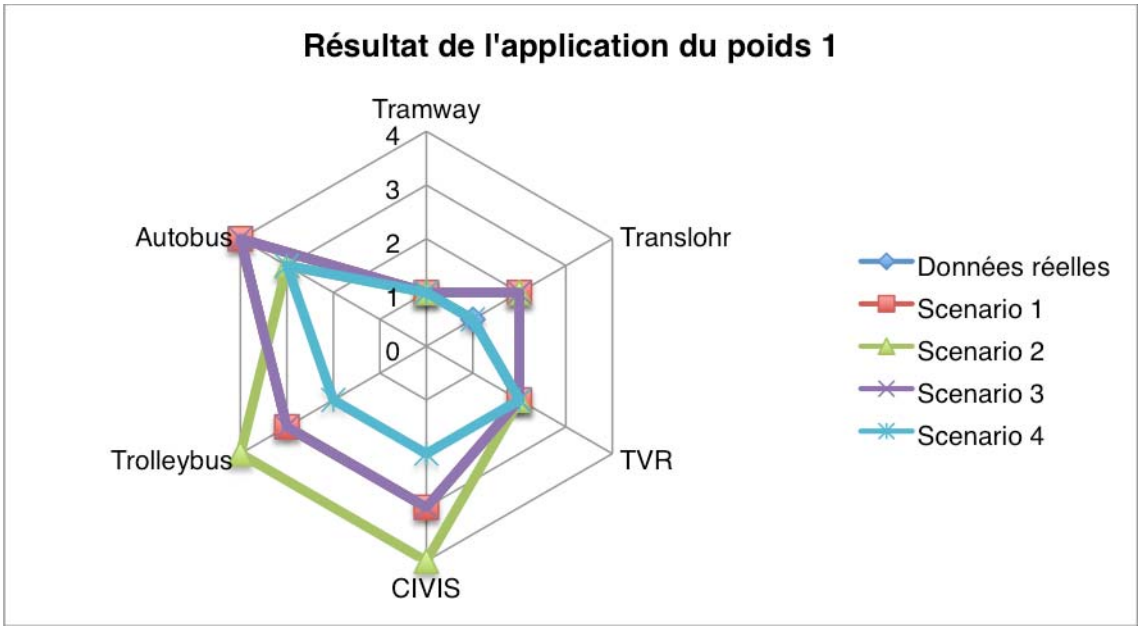


Figure 116: Résultat de l'application du poids 1

Le résultat de l'application du poids 2 (coûts) nous montre la dominance du système CIVIS suivi soit par le tramway soit par l'autobus. Donc certaines villes qui n'ont pas assez de financement faire le choix d'un système ferroviaire peuvent être fondées à opter soit le CIVIS soit l'autobus en site propre. Le tramway ne reste qu'en tant que deuxième option mais non une solution à privilégier ni prioritaire dans ce cas.

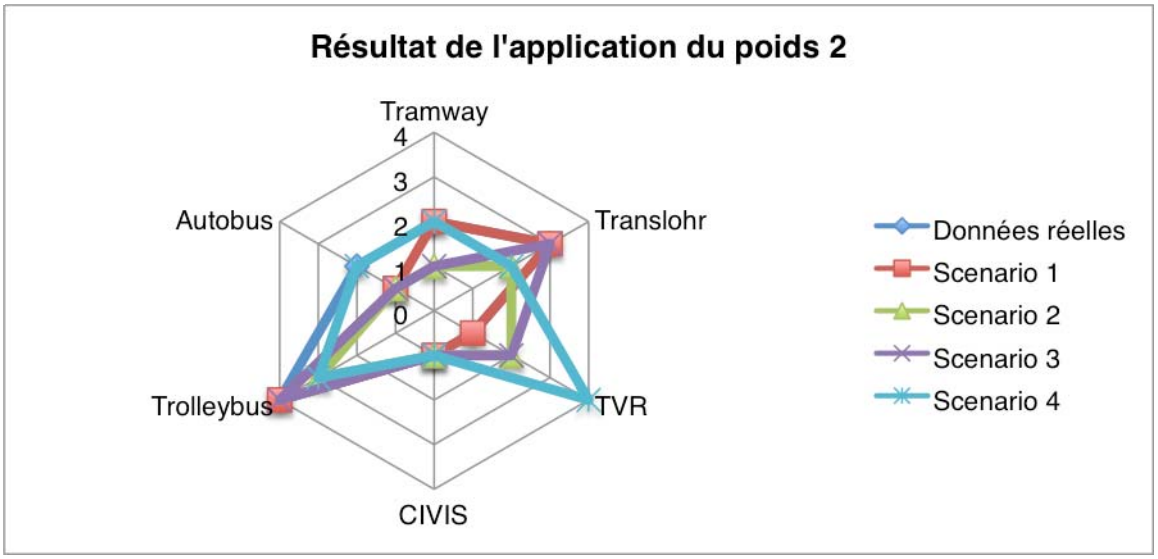


Figure 117: Résultat de l'application du poids 2

Le résultat de l'application du poids 3 (environnement) porte sur le choix plutôt favorable au tramway ou au Translohr suivi du TVR, ce qui nous semble tout à fait logique parce qu'ils utilisent l'électricité comme l'énergie de traction (avec l'hypothèse qui serait évidemment à affiner que les émissions de GES associées à l'exploitation sont alors négligeables). Si les autres systèmes utilisaient une énergie ayant le même niveau d'émission de gaz à effet de serre, il est vraisemblable que ce résultat en serait modifié.

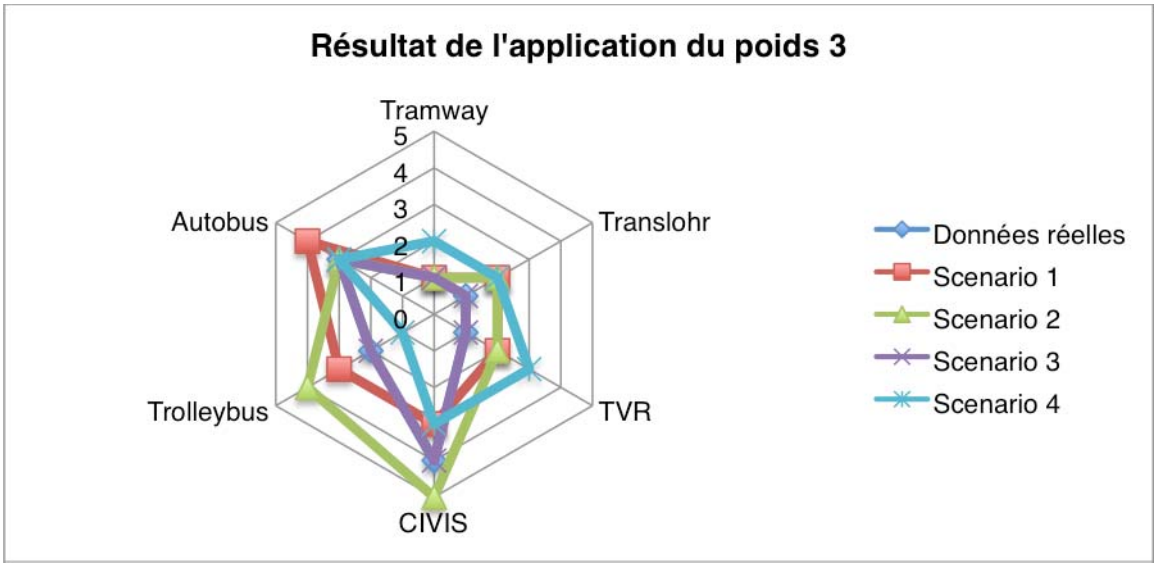


Figure 118: Résultat de l'application du poids 3

Cette analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface effectuée selon différents scenarii et affectés de différends poids, nous a permis de constater que les systèmes intermédiaires entre le tramway classique et l'autobus ont un rôle à jouer dans la gamme des systèmes de transport proposée au choix des AOT pour répondre à la demande de transport des différents réseaux.

Même si le tramway classique occupe une place privilégiée dans la majorité des scenarii affectés des différents poids, le CIVIS, le Translohr et même le trolleybus ont leur place selon un contexte particulier soit d'après la configuration du réseau, soit d'après le niveau de la demande, soit enfin en tenant compte du niveau du coût d'investissement et d'exploitation.

Ces résultats nous encourage à proposer chaque fois qu'un projet de système de transport de surface est souhaité, de passer en revu la gamme des systèmes, d'effectuer l'analyse avec les différentes contraintes du moment et dans une perspective de moyen-long terme afin d'effectuer le meilleur choix pour l'ensemble des citadins.

CONCLUSION

CONCLUSION

Les objectifs de cette recherche ont porté, d'une part sur la présentation des différents systèmes guidés de surface qui structurent les réseaux de transport public et d'autre part sur leur comparaison qui, à travers la méthode multicritère ELECTRE III et ses résultats, permettra d'aider à choisir le système le mieux adapté à différents contextes donnés au regard du développement durable.

Les principaux résultats obtenus peuvent être rappelés ci-après :

L'analyse effectuée selon les données d'exploitation actuellement disponibles en France, nous permet de confirmer la « supériorité » des modes de transport physiquement guidé de surface (le tramway et le Translohr principalement) dans tous les cas d'affectation des poids sauf dans le cas où il y a des contraintes considérables ou exceptionnelles de coût (versement transport, VT très limité) :

- Pour l'affectation du poids de référence, le tramway au premier rang, le TVR au deuxième rang,
- Pour l'affectation du poids 1 (performances), le tramway et le Translohr au premier rang, le TVR au deuxième rang,
- Pour l'affectation du poids 2 (coûts), le TVR et le CIVIS sont au premier rang, le tramway et l'autobus sont au deuxième rang,
- Pour l'application du poids 3 (environnement), le tramway/le Translohr et le TVR sont au premier rang, le trolleybus au deuxième rang.

Rappelons que, s'agissant du TVR, ce qui est ici validé, c'est plus le concept de système intermédiaire que sa réalisation concrète dans le cas précis du système exploité à Nancy et à Caen.

L'analyse effectuée selon les différents scenarii dits « vraisemblables » (n°1 et n°2) dans lesquels on a fait varier la fréquence, la vitesse commerciale et la distance d'inter-stations et auxquels ont été affectés des poids identiques au cas précédent, nous a permis de constater que pour ces scenarii se rapprochant d'une exploitation très urbaine comme le scenario n°2 (Vc= 18km/h esp : 333m) et à un degré moindre le scenario n°1 (fréq. 5', Vc= 20 km/h, esp=500m) affectés du poids 1, le tramway se positionne toujours au premier rang, et qu'il est encore bien placé dans le scénario 1 affecté du poids 2 (TVR, CIVIS/autobus au premier rang). Cependant, il est à noter que le Translohr et le TVR se placent relativement souvent au deuxième rang.

L'analyse effectuée selon le scenario 3 dit « extrême » qui pousse l'exploitation à ses limites (fréquence 2', Vc : 25 km/h, espacement : 500m) nous montre d'abord, que le tramway répond bien à tous les cas, et ensuite que le CIVIS et l'autobus peuvent être un bon choix lorsqu'on privilégie les coûts d'investissement et d'exploitation car ils apparaissent au premier rang accompagnés du tramway. De plus, le trolleybus se situe une fois au deuxième rang tandis que le tramway reste aussi un bon choix accompagné du Translohr et du TVR dans l'affectation du poids 3 :

- Pour l'affectation du poids de référence, le tramway au premier rang, le Translohr et le TVR au deuxième rang,
- Pour l'affectation du poids 1, le résultat est identique au cas de l'affectation du poids de référence,
- Pour l'affectation du poids 2, le tramway et le CIVIS/l'autobus au premier rang, le TVR au deuxième rang,
- Pour l'application du poids 3, le tramway/le Translohr et le TVR sont au premier rang, le trolleybus au deuxième rang.

L'analyse effectuée selon le scenario 4 dit « sous-utilisé » nous donne des résultats relativement différents aux précédents qui permettent aux systèmes intermédiaires, notamment le trolleybus et le CIVIS, d'occuper une meilleure place par rapport aux systèmes physiquement guidés.

- Pour l'affectation du poids de référence, le trolleybus au premier rang, le tramway et le Translohr au deuxième rang,
- Pour l'affectation du poids 1, le tramway/le Translohr au premier rang, le TVR/le CIVIS/le trolleybus au deuxième rang,
- Pour l'affectation du poids 2, le CIVIS au premier rang, le tramway/le Translohr et l'autobus au deuxième rang,
- Pour l'application du poids 3, le trolleybus au premier rang, le tramway/le Translohr au deuxième rang.

En résumé, à partir de deux scenarii (n°1 et n°2) affectés du poids 1 privilégiant les performances nous pouvons dire que le tramway est le meilleur choix mais que le Translohr peut être un aussi bon choix selon scenario n°4.

De la même façon, lorsqu'on privilégie les gaz à effet de serre en affectant le poids 3, le tramway reste toujours un bon choix (scenarii n°1 et n°2) mais aussi le trolleybus pour des demandes de transport relativement faible (scenario n°4), par exemple, quelques villes moyennes suisses et les villes de Limoges, St Etienne et Lyon l'ont bien adopté depuis des dizaines d'années.

Pour les 4 scenarii y compris le cas réel affectés du poids 2 (coûts), nous avons constaté que les systèmes intermédiaires (TVR et CIVIS) deviennent les plus intéressants ainsi que l'autobus en site propre. Nous pouvons donc dire qu'un des objectifs initiaux des systèmes intermédiaires est atteint en termes d'économie des coûts d'investissement et d'exploitation. Les villes moyennes qui ont des contraintes de faible capacité financière

peuvent mettre la priorité sur ces types de système lors du choix du transport public en TCSP.

Néanmoins, cette analyse nous a permis de confirmer les possibilités du tramway mais aussi de constater que d'autres systèmes peuvent rivaliser avec le tramway comme le Translohr et pour quelques scenarii spécifiques le TVR, le CIVIS, le trolleybus et l'autobus.

Par ailleurs, le Translohr classé et homologué parmi les systèmes de tramway, peut concurrencer le tramway dans quelques cas notamment lorsqu'on met en avant les performances et l'aspect environnemental. Toutefois, il est à noter qu'actuellement en France, une seule ville exploite ce système dont les données ne peuvent être ni représentatives ni moyennes car elles manquent d'effet de série dans la production de matériel roulant et de retour d'expérience de son exploitation. Donc, le Translohr devrait pouvoir être optimisé au fur et à mesure et éventuellement concurrencer tous les autres systèmes. Le fait toutefois qu'il soit produit par un seul industriel peut pour certaines AOT constituer une difficulté.

Au final, cette analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface effectuée selon différents scenarii et affectés de différends poids, nous a permis de constater que les systèmes intermédiaires entre le tramway classique et l'autobus ont un rôle à jouer dans la gamme des systèmes de transport proposée au choix des AOT pour répondre à la demande de transport des différents réseaux.

Même si le tramway moderne occupe une place privilégiée dans la majorité des scenarii affectés des différents poids, le CIVIS, le Translohr, le TVR et même le trolleybus ont leur place selon un contexte particulier soit d'après la configuration du réseau, soit d'après le niveau de la demande soit du niveau du coût d'investissement et d'exploitation. C'est la raison pour laquelle il ne faut pas considérer l'apparition d'un nouveau système de transport (systèmes intermédiaires) comme un concurrent supplémentaire du tramway ou de l'autobus/trolleybus, mais comme une réponse complémentaire à une demande différente.

Arrivant aux termes de cette recherche, il convient en même temps de souligner la difficulté de l'étude comparative que nous avons entreprise. Nous sommes conscients en particulier des biais que peuvent introduire certaines de nos hypothèses, notamment celles qui ont trait à la définition des poids des différents critères retenus. Il aurait été plus satisfaisant par exemple de déterminer ces poids au travers d'une enquête auprès des autorités organisatrices, mais nous avons manqué de temps pour cela. Dans cet esprit, on pourrait tout à fait défendre l'idée que le poids des critères liés à l'environnement et à l'insertion urbaine pourrait être davantage mis en valeur. Les critères permettant de « mesurer » l'insertion urbaine mériteraient en outre d'être approfondis. Le terme même d'insertion peut être discuté : dès lors qu'on souhaite prendre en compte des effets de long terme, les opportunités présentées par tel ou tel système comme outil pour l'aménagement urbain serait par exemple à prendre en compte.

En clair, le travail ici présenté ne prétend pas apporter sur ce difficile sujet des conclusions générales et définitives. Il se veut plus une contribution pour faire progresser un débat qui reste ouvert. Quoiqu'il en soit, les résultats de cette recherche

nous encouragent à recommander, chaque fois qu'un projet de système de transport de surface est à l'étude sur un réseau, de passer en revue la gamme des systèmes et d'effectuer l'analyse avec les différentes contraintes du lieu et dans une perspective de moyen et de long terme afin d'effectuer le meilleur choix pour l'ensemble des acteurs.

ANNEXE

ANNEXE

Bibliographie

Documents scientifiques (ouvrages et articles)

Barry, M. (1991). *Through the Cities, the revolution in Light Rail*, éditions Colour books, Francfort press, Dublin, 255 p.

An, J.H. and F. Kühn (2010). *Appropriate conditions for adopting new public transit systems: a comparative analysis of guided surface systems*, CODATU 2010, Buenos Aires, Argentina, 14 p.

An, J.H. and F. Kühn (2010). *Choosing an appropriate technology for guided surface transit systems: a comparative analysis of 6 surface transit systems*, WCTR proceeding 2010, Lisbon, Portugal, 17 p.

An, J-H (2007). *Evaluation socio-économique de l'utilisation dynamique d'une voie auxiliaire : le cas du tronc commun A4-A86 dans le Val-de-Marne*, master's thesis under direction of Mr. S. Cohen, in GRETIA (Génie des Réseaux de Transport et Informatique Avancée) at INRETS, Arcueil, France.

An, J.H. and F. Kühn (2008), *Urban Transport in France: the tramway revival*, INRETS-LTN, paper presented in Civil Engineering National Seminar, Jakarta, Indonesia, 27 p.

Baupin, D. (2007). *Tout voiture, No future*, édition Brodard et Taupin, mars 2007, 305 p.

Bergeron, R. (2003). *Le nouveau Tramway: Contribution à la réflexion en cours concernant un possible retour du tramway dans les rues de Montréal*, Agence métropolitaine de transport (AMT).

Blancon, C. (2008). *Le retour du tramway en France : un premier bilan des trois premières lignes de tramway en Île de France*, dans la revue générale des chemins de fer, mars 2008, p15-19.

Boiteux, Marcel et al. (2001). *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances*, Commissariat général du plan, La Documentation Française, Paris, juin 201, 328p.

Boiteux, Marcel (1994). *Transports: pour un meilleur choix des investissements*, Commissariat général du plan, La Documentation Française, Paris, novembre 1994, 132p.

Boucheret, J-M. (2004). *Briefing: The CIVIS optically-guided urban transport system*, Proc Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer, 157 (1), 13-15.

Bouyssou, D., D. Dubois, et al. (2006). *Concepts et méthodes pour l'aide à la décision 3: analyse multicritère*, Hermes Science, 2006.

Brans, J. P., P. Vincke, et al. (1986). *How to select and how to rank projects: The Promethee method*, European Journal of Operational Research 24(2): 228--238.

Brundtland, G. H. (1987). *Notre avenir à tous*, CMED (Commission Mondiale sur l'Environnement et le Dévelopment), 1987.

CERTU (2002). *Évaluation des transports en commun en site propre: Recommandations pour l'évaluation socio-économique des projets de TCSP*. Collection Références, Certu, 2002.

CERTU (2009a). *Bus à Haut Niveau de Service: BHNS*, Certu, 2009.

CERTU (2004). *Plates-formes de tramway, Pathologie et conception: Matériaux modulaires*, Certu, 2004.

CERTU (2000). *L'offre française en matière de transports publics: De la desserte urbaine à la desserte régionale*, Certu, 200.

CERTU (1999). *Nouveaux systèmes de transports guidés urbains*, Certu, 1999.

Charnes, A. and W. Cooper (1961). *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*. New York, Wiley, 1961.

Clement, L. (1995). *Offre intermédiaire et organisation hiérarchique des réseaux de transports collectifs urbains, le cas de l'agglomération lyonnaise*, thèse d'Université pour le doctorat de sciences économiques, option économie des transports sous la direction de M. Buisson, Université Lumière Lyon II, 1995.

Courant, R. (1982). *Le temps des tramways*, édition du Calvi.

CST (2005). *Defining Sustainable Transportation*, Centre for Sustainable Transportation, 2005.

Dahl, H. (2004). *Use and optimization of public transport vehicles, aspects of bimodal systems in urban areas*, report for International Management project at the MBA Technology management Program, August 2004, 50 p.

Debrincat, L. and A. Meyère (1998). *L'aide multicritère à la décision: Des potentialités pour l'évaluation des projets de transport collectif en Île-de-France*, METROPOLIS. 106-107: 57-67.

De la Morsanglière, H., Dupuy, X. (1991). *Les axes prioritaires pour autobus à Montpellier*, Transports urbains n°72, septembre 1991.

Dobias, D. (1998). *Urban Transport in France*, in JRTR 16, June 1998, p20-25.

Doyon, F. (1994). *L'analyse décisionnelle multicritère en gestion intégrée des ressources forestières: méthodes, cas et comparaisons*, thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal.

Duthion, B., Gelbmann-Ziv, B. et Guyon, G. (2000). *Transport collectif interurbain de voyageurs, approche terrestre*, édition Celse, collection Transport et Logistique du CNAM, 127 p.

ECMT (2004). *Assessment and Decision Making for Sustainable Transport*, European Conference of Ministers of Transportation, 2004.

Edwards, W. (1971). *Social utilities. S. S. S. 6*, Engineering Economist, p119-129.

Festa, P., L. Grandinetti, et al. (2010). *An Approximate e-Constraint Method for the Multi-objective Undirected Capacitated Arc Routing Problem: Experimental Algorithms*, Springer Berlin / Heidelberg: p214-225.

Flavell, R. B. (1976). *A New Goal Programming Formulation*, Omega, 1976.

Gardner, G., Rutter, J., Kuhn, F. (1994). *The performance and potential of light rail transit in developing cities*. In TRL Project Report N° PR69, TRL, Crowthorne.

GART (1996). *Fonctions et pertinence des systèmes de transport intermédiaire (entre l'autobus et le tramway)*, ADEME et GART, 1996.

Giannoulis, C. and Ishizaka, A. (2010). *A Web-based decision support system with ELECTRE III for a personalised ranking of British universities*, Decision Support Systems 48(3): 488--497.

Godon, P., Crespolini, C. (1995). *Métrobus, Un métro léger pour l' agglomération rouennaise: de l'idée à la mise en service*, livre, édition Vie du Rail, Août 1995, 190 p.

Grava, S. (2004). *Urban Transportation Systems: Choices for Communities*, McGraw-Hill, New York, 2004.

Grillet-Aubert, A. (2005). *La voirie pas à pas*, dans l'ouvrage Déplacements Architectures du transport : territoires en mutation, éditions Recherches/Ipraus, 2005, p 155-172.

Guitouni, A. and J.-M. Martel (1998). *Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method*. European Journal of Operational Research 109(2): 501-521.Gardner, G., Cornwell, P.R., Cracknell, J.A. (1991). Performance of high-capacity bus systems, Transport Research Laboratory, TRL Research Report 329, 1991.

Guyon, G. (2000). *Transport collectif urbain de voyageurs, évolution, techniques et organisation*, édition Celse, collection Transport et Logistique du CNAM, 139 p.

Hass-Klau, C., Crampton, G. (2002). *Future of urban transport - learning from success & weakness: light rail*. Brighton: Environmental & Transport Planning, 2002.

Hass-Klau, C, G Crampton, G Weidauer and V Deutsch (2000). *Bus or light rail: making the right choice - a financial, operational and demand comparison of light rail, guided buses, busways and bus lanes*. Brighton: Environment and Transport Planning, 2000.

Hesse, R. (2002). *Using modularity to tailor transit systems. Proc Seminar on the Planning and Management of Public Transport Systems*, European Transport Conference, Homerton College, Cambridge, 9-11 September 2002. London: Association for European Transport.

Hue, R. (2004). *Strategic justification of three existing modes of transportation in Rouen*, in JRTR 38, March 2004, p17-21.

Hwang, C. R. and Yoon, K. (1981). *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. New York, Springer-Verlag Berlin Heildelberg, 1981.

Hylen, B., Tim, P. (2002). *Making Tracks –Light Rail in England and France*, Swedish National Road and Transport Research Institute, march 2002, 95 p

Ijiri, Y. (1965). *Management Goals and Accounting for Control*. Amsterdam, North Holland, 1965

Jacquet-Lagreze, E., R. Meziani, et al. (1987). *With an interactive assessment of a piecewise linear utility function*, European Journal of Operational Research 31(3): 350-357.

Karagiannidis, A. and Moussiopoulos, N. (1997). *Application of ELECTRE III for the integrated management of municipal solid wastes in the Greater Athens Area*, European Journal of Operational Research 97(3): 439--449.

Keeney, R. and H. Raifa (1976). *Decision with Multiobjectives, Preferences and Value Trade-Offs*. New York, 1976.

Knutton, M. (2005). *LRT in France*, in IRJ March 2005, 6p.

Koch, U. (1986). *Development and operation of dual-mode bus systems in Germany*, Proc IME Int Conf 'The Bus 86', 9-10 September 1986, Institution of Mechanical Engineers. London: Mechanical Engineering Publications.

Kuhn, F. (2002). *Bus rapid or light transit for intermediate cities ?*, in CODATU 2002 in Lomé, 10 p.

Kuhn, F. (2000). *São Paulo: un challenge pour l'autobus et les systèmes intermédiaires*, les Cahiers de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région d'Île de France, n° 128, les Transports dans les grandes Métropoles, réflexions actuelles tome 2, Paris, novembre 2000, p29-44.

Kuhn, F. (1998). *L'émergence des systèmes de transport urbain intermédiaire*, communication à Codatu VIII au Cap 21-25 septembre 1998, in Urban Transport Policy, a sustainable development tool, édition Freeman & Jamet, Balkema, Rotterdam, 1998, p381-390.

Kuhn, F. (1987). *Les transports urbains guidés de surface, situation actuelle et perspectives*, synthèse INRETS n°4, 84p, Arcueil, mars 1987.

Kuhn, F., Dutra Michel F., Inrets-Cresta. (1993). *Le métro léger et l'autobus en site propre, comparaison des performances d'exploitation des deux systèmes*, décembre 1993.

Kuhn, F., Soulas C. (2001). B*etween bus and light rail, emergence of intermediate urban systems*, paper presented at WCTR in Seoul, 2001,17 p.

Larroque D., Margairaz M., Zembri P., *Paris et ses transports XIXe et XXe siècles, deux siècles de décisions pour la ville et sa région*, Edtions Recherche, 2002, Paris.

Le Tourneur, M. (2004). *Le Développement du Tramway en France*, au Congrès ATEC, Direction des TAM (Transports de l'Agglomération de Montpellier), Paris, ppt 18p, 3 juin 2004

Leyva-Lopez, J. C. and Fernandez-Gonzalez, E. (2003). *A new method for group decision support based on ELECTRE III methodology*, European Journal of Operational Research 148(1): 14--27.

Litman, T. (2009). *Well Measured: Developing Indicators for Comprehensive and Sustainable Transport Planning*, Victoria Transport Policy Institute, 2009.

Litman, T. (2008). *Sustainable Transportation Indicators*, Transportation Research Board, 2008.

Litman, T. and D. Burwell (2006). *Issues in Sustainable Transportaion*, International Journal of Global Environmental Issues 6(4): 331-347.

Malterre, P. (1982). *Du tramway au métro léger*, éditions AFAC.

Malterre, P. et SEMVAT (1981). *Expériences étrangères et évolution des tramways et métros légers*, dans Transport Public, décembre 1981.

Maystre, L. Y., J. Pictet, et al. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE: Description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*, Presses Polytechniques et Universitaires Romades, Lausanne, 1994.

Midgley, P., Bigey, M. et RATP (1977). *Autobus en site propre: géométrie, insertion, exploitation*, édition SEPI 2ième trimestre 1977, Paris, 276 p.

Midgley, P., Bigey, M. (1976). *L'autobus en site propre*, Transports urbains n°34, March 1976.

Moquet, J.C., RATP & al. (1993). *Considération sur l'économie de l'autobus : acquisition, fonctionnement, durée d'utilisation*, 50e Congrès UITP, Sydney, 1993.

Morrison, A. (1989). *The Tramways of Brazil a 130-year Survey*, Bonde Press New York, 1989, 195 p.

Mousseau, V. and L. Dias (2004). *Valued outranking relations in ELECTRE providing manageable disaggregation procedures*, European Journal of Operational Research 156(2): 467--482.

Muffat, M. (1998). *Les systèmes de transport intermédiaire: état comparatif des recherches menées au sein du PREDIT*, TEC n° 148, août 1998, Paris, p32-38.

Muller, G. (1994). *L'année du tramway*, édition Ronald Hirlé.

Niemann, K. (1996). *New city bus concepts: duo buses, diesel-electric buses with electric single-wheel drive*. In Proc IME Conference 'Bus and Coach

96', Institution of Mechanical Engineers, London, 16-17 October 1996. London: Mechanical Engineering Publications, p3-13.

Norese, M. F. (2006). *ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localisation of waste-treatment plants*, Land Use Policy 23(1): 76--85.

Offner, J.-M. (1993). *Les « effets structurants » du transport : mythe politique, mystification scientifique*, L'Espace géographique(3): 233--242.

Orselli, J. (2004). *Les nouveaux Tramways*, Paradigme publications universitaires, Orléans, France.

Papadopoulos, A. and A. Karagiannidis (2008). *Application of the multi-criteria analysis method Electre III for the optimisation of decentralised energy systems*, Omega 36(5): 766--776.

Passalacqua, A. (2009). *L'autobus et Paris : souplesse, espace public et mobilité de 1900 aux années 1970*, Thèse de doctorat, Histoire, Université Paris VII, Paris.

Powell, D. (1996). *Electronic guidance for passenger-carrying vehicles*. In Proc IME Conf 'Bus and Coach 96', Institution of Mechanical Engineers, 16-17 October 1996. London: Mechanical Engineering Publications, p81-91.

Quinet, E. (1998). *Des progrès dans l'évaluation des projets de transports urbains*. METROPOLIS. n°106-107: 29--30.

Rahon, J-P. (1993). *Un désir nommé tramway*, les transports urbains de St Etienne.

Rambaud. F. (1998). *Présentation comparative de nouveaux systèmes guidés français*, communication à Codatu VIII au Cap 21-25 September 1998, in Urban Transport Policy, a sustainable development tool, édition Freeman & Jamet, Balkema, Rotterdam 1998, p397-401.

RATP (1977). *Autobus en site propre*, étude réalisée avec Peter Midgley, Freeman Fox et CETE d'Aix en Provence, 104 p.

RATP, SOFRETU. (1983). *Politique et Planification des Transports en commun Urbains*, Direction du Développement, septembre 1983.

Raviot, J.P.(1995). L*e site propre pour autobus du TVM*, visite technique du 51ième Congrès UITP Paris, 1er juin 1995.

Robert, J. (1992). *Les tramways parisiens*, 3e édition, Annexes Articles connexes : Tramway d'Île-de-France, Société des transports en commun de la région parisienne, 1992

Robert, J. (1967). *Notre Métro*, éditions OMNES & Cie, Paris 9ième, 304 p.

Rogers, L. (1997), *The international market for Trolleybus*, in conference TRB, Washington, January 1997.

Roger S, M. and M. Bruen (1998). *A new system for weighting environmental criteria for use within ELECTRE III*, European Journal of Operational Research 107(3): 552--563.

Roussat, N., C. Dujet, et al. (2009). *Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis*, Waste Management 29(1): 12--20.

Roy, B. (2010). *Robustness in operational research and decision aiding: A multi-faceted issue*, European Journal of Operational Research 200(3): 629--638.

Roy, B. (1989). *Main sources of inaccurate determination, uncertainty and imprecision in decision models*, Mathematical and Computer Modelling 12(10-11): 1245--1254.

Roy, B. (1985). *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*, Economica, Paris, 1985.

Roy, B. (1984). *Aids for multicriteria decisions*, European Journal of Operational Research 15(1): 15--16.

Roy, B. and Bouyssou, D. (1986). *Comparison of two decision-aid models applied to a nuclear power plant siting example*, European Journal of Operational Research 25(2): 200--215.

Roy, B. and Damart S. (1998). *L'analyse Coûts-Avantages, outil de concertation et de légitimation*. METROPOLIS. n°108-109: 7--16.

Roy, B. and Hugonnard, J.-C. (1982). *Ranking of suburban line extension projects on the Paris metro system by a multicriteria method*, Transportation Research Part A: General 16(4): 301--312.

Roy, B. and Slowinski, R. (2008). *Handling effects of reinforced preference and counter-veto in credibility of outranking*, European Journal of Operational Research 188(1): 185--190.

Roy, B. and Vanderpooten, D. (1997). *An overview on "The European school of MCDA: Emergence, basic features and current works*, European Journal of Operational Research 99(1): 26--27.

Roy, B. and Vincke, P. (1981). *Multicriteria analysis: survey and new directions*, European Journal of Operational Research 8(3): 207--218.

Ruhlmann, H. (1936). *Les chemins de fer urbains*, éditions Eyrolles, 186 p.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York, 1980.

Salminen, P., Hokkanen, J., et al. (1998). *Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems*, European Journal of Operational Research 104(3): 485--496.

Scharlig, A. (1996). *Pratiquer Electre et Prométhée*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1996.

Scharlig, A. (1985). *Décider sur Plusieurs Critères: Panorama de l'Aide à la Décision Multicritère*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1985, 304 p.

Sephton, P.J., Tebb, R.G.P. (1992). *Putting the bus back on the rails - the guided bus route to rapid transit. In Proc IME Int Conf 'Bus 92: the Expanding Role of Buses 115 towards the Twenty-first Century'*, Institution of Mechanical Engineers, London, 17-19 March 1992. London: Mechanical Engineering Publications, p239-248.

Shanian, A., Milani, A.S., et al. (2008). *A new application of ELECTRE III and revised Simos' procedure for group material selection under weighting uncertainty*, Knowledge-Based Systems 21(7): 709--720.

Soulas, C. (2000a). *Bimodalité énergie appliquée aux transports collectifs urbains: captation / énergie embarquée*, Générale de l'Électricité REE N° 6, Paris, juin 2000, p54-60.

Soulas, C. (2000b). *Synthèse des systèmes guidés urbains*, communication au colloque PROPELEC, La Rochelle, 22 september 2000.

Takeda, E. (2001). *A method for multiple pseudo-criteria decision problems*, Computers & Operations Research 28(14): 1427--1439.

Tamiz, M., D. Jones, et al. (1998). *Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art*, European Journal of Operational Research 111(3): 569-581.

Taplin, M. (2010). *136 new tramways in three décades… and 50 more on the way*, article in Tramways & Urban Transit, n°866, February 2010.

Taplin, M. (1996). *Light rail in Europe*, édition Ian Allan publishing.

Tebb, R. (interview by BAIN, R.) (2002). *Kerb guided bus: is this affordable LRT ?*. Traffic Engineering & Control, February 2002, p51-55.

Teng, J.-Y. and Tzeng G.-H. (1994). *Multicriteria Evaluation for Strategies of Improving and Controlling Air Quality in the Super City: a Case Study of Taipei City*, Journal of Environmental Management 40(3): 213--229.

Timmermans (1986). *An approach to Vendor Performance Evaluation*, Journal of Purchasing and Materials Management, 1986.

Topp, H.H. (1999). *Innovation in tram and light rail systems*. Proc Institution of mechanical Engineers Part F: J Rail and Rapd Transit, 123 (F3), 133-141.

Urbin, G. (1983). *Un siècle de transports publics dans le Valenciennois*, pour la Semurval, édition Dridé, 115 p.

Vidalenc, É. (2008). *Efficacités énergétique et environnementale des modes de transport*, ADEME, Paris, 2008.

Vincke, P. (1989). *L'aide Multicritère à la décision*, Editions de l'Université de Bruxelles, 1989, 179 p.

Vuchic, Vulkan R. (2007). *Urban Transit Systems and Technology*, Willey, New York, 2007.

Vuchic, Vukan R. (1981). *Urban public transportation : systems and technology, book*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 673 p.

Zopounidis, C. and P. M. Pardalos (2010). *Handbook of Multicriteria Analysis*, Springer, 2010.

Documents techniques

Alexis, P. (1985). *Sites propres en Ile de France*, Transports urbains n°57.

Amarcande, CERTU. (2005). I*mpacts du tramway sur le commerce dans différentes agglomérations françaises : monographies*, 155 p.

An, J.H. and F. Kühn (2009), *Effects of insertion and operation of a new guided surface transit system*, technical report of INRETS, Arcueil, France, 101 p.

An, J.H. and F. Kühn (2008), *Different Surface guided transit systems in France*, KRRI-INRETS joint seminar, Uiwang City, South Korea

Arevalo, Rey C. (2007). *Calcul des efforts au contact entre pneumatiques et bandes de roulement du Translohr : application et analyse des resultants dans un modèle de durée de vie de chaussée*, rapport de stage sdd H. Chollet et F. Kuhn, Inrets & LCPC, 2007, 65 p.

AURAN (1998). *Évaluation socio-économique du tramway : Synthèse des études*, Agence d'Étude Urbaines de l'Agglomération Nantaise.

Beaucire, F. (2006). *Transports collectifs urbains : quelle contribution au développement urbain durable et par quels moyens ?*, rapport n°6 de l' Institut Veolia Environnement, 49 p.

Bejui, P. et R. Courant (1985), *Les trolleybus français*, Presses et éditions ferroviaires, 1985

Bourget, C. et P. Labia (2010), *Mission de diagnostics et de prospective sur les réseaux de transports urbains de Caen et Nancy,* rapport d'expertise n° 006782-01, CGEDD, MEEDDM, juillet 2010.

CERTU (2009b). *Annuaire statistique 2009 - transport collectifs urbains: évolution 2003-2008*, Certu, GART, UTP, DTI.

CERTU (2006). *Matérialisation du Gabarit Limite d'Obstacle des transports guidés urbains : état des lieux et analyse des pratiques*, rapport d'étude du Certu, novembre 2006, 100p.

CERTU (2004). *Les modes de transports collectifs urbains : éléments de choix par une approche globale des systèmes*, livre à la demande du MELT, 166 p.

CERTU (2000). *L'offre française en matière de transports publics : de la desserte urbaine à la desserte régionale*, livre à la demande du MELT, 270 p.

CERTU, Nodin, P., Rambaud, F., Jean, M., Guellard, B., Tisserand, P-E., CODATU, Soulas, C., INRETS. (2000). *L'offre française en matière de transports publics de la desserte urbaine à la desserte régionale*, ouvrage commandé par la DTT, réalisé par le CERTU avec le concours de l'INRETS, juillet 2000, Lyon.

CERTU, Poyer, J., Rambaud, F., Charvin, R., Nouvier, J., Soulas, C., INRETS (1999), *Nouveaux systèmes de transports guidés urbains, présentation de quatre systèmes selon une grille commune*, ouvrage commandé par la DRAST, réalisé par le Certu avec le concours du Cete de Normandie-Centre et de l'INRETS, mars 1999, Lyon.

CETUR (1991). *Des mesures, des équipements et des aménagements pour améliorer la productivité externe des transports publics urbains*, mai 1991.

Chatagnon, R. (2007). *Etat des lieux du parc de Tramway en France fin 2007*, INRETS-LTE n°807, 71p.

Contrat de Plan Etat – Région Île-de-France 2000/2006. *Pour un aménagement durable de l'Île de France*, partie 1 p 11 to p 14.

Courant, R. (1982). *Le temps des tramways*, Editions du Cabri, 1982

Dark, J. (2001). *Can guided bus systems really get close to delivering light rail performance ?*, Local Transport Today, June 2001.

Debano, P. (1999). *Verkehr im Raum Nancy–Entwicklung und Perspektiven, Stadtverkehr International*, octobre 1999.

Direction générale de la Mer et des Transports, Certu, Gart, UTP (2006). *Transports collectifs urbains evolution 2000 – 2005*, annuaire statistique, 443 p.

EGIS Rail (2007a). *Normes de tracé, Tramway de Montpellier*, septembre 2007,13 p.

EGIS Rail (2007b). *Les types de pose de voie, Tramway de Montpellier,* septembre 2007,21 p.

Enver, F. (2008). *Tram de Reims: la première concession française en chantier*, dans Ville & Transports-MAGAZINE – 2/07/2008 p36-39.

Flash (1997). Tramway, métro, val, trolleybus en France, Edition Tram 2000, BRUXELLES

Frenois, M. et TCL (1981). Le mode trolleybus : coût actuel et perspectives d' évolution, dans Transport Public, décembre 1981.

Gaillard, C. et District de Nancy (1981). *Le trolleybus articulé bimode à Nancy : les raisons du choix*, dans Transport Public, décembre 1981.

GART (2008). *Liste des projets de TCSP*, Grenelle 2008-COMOP 7, 7p.

GART (2007). *Financement des transports publics urbains : quel bilan à fin 2007 ? Quelles perspectives ?*, rapport en collaboration avec Maires des grandes villes, Communautés urbaines de France et le Groupe Caisse d'Epargne, 24 p.

GART (1996). *Fonctions et Pertinence des Systèmes de Transport Intermédiaire*, réalisé par le GART, avec la participation de l'Ademe, le concours de Sofretu et la collaboration de l'INRETS, 158p, janvier 1996.

Gay, C. (1995). *Lille : Au fil des trams Lille-Roubaix-Tourcoing : Le Mongy*, La Regordane, 1995

Gazette des Communes, C-F, T. (2008). *Transports : les nouveaux tramways dopent l'intermodalité*, article du 04/02/2008, 8 p.

Griffon, J-M. et SEMITAG (1981). Le trolleybus : introduction générale, dans Transport Public, décembre 1981

Guetat, J-M., W. Lachenal, et G. Muller (1987). *Du Tram au Tag*, édition TAG.

Hoffmann, A. (2004). *How to overcome the 10 barriers to effective BRT planning*, Smart Urban Transport, June 2004.

Kuhn, F. (2002). *Autobus et Trolleybus en site propre*, rapport de synthèse, décembre 2002, (non publié) 39 p.

Kühn, F. and J.H. An (2008). *Different Tramways on tires systems in France*, technical report of INRETS, Arcueil, France, 52 p.

Kühn, F. and J.H. An (2008). *Vehicle characteristics, Geometry and Track types*, technical report of INRETS, Arcueil, France, 45 p.

Kühn, F and J.H. An (2008). *PHILÉAS and ÉVÉOLE Guided Transit Systems,* technical report of INRETS, Arcueil, France, 73 p.

Kuhn, F. and J.H. An (2008). *Effects of insertion and operation of a new guided surface transit system: Philéas and Evéole guided transit systems*, report to KRRI, July 08, INRETS-LTN, 61 p.

Lagarrique, L. (1956). *Cent ans de transports en commun dans la Région parisienne*, RATP, 1956

Moniteur (2008). *Tramway: histoire et place du tramway dans le paysage français des transports en commun*, dossier 23 p.

ORR (2006). *Guidance on Tramways*, railway safety publication 2, 71 p.

Robert, J. (1992). *Paris : Les tramways parisiens*, 1992

Robert, J. (1974). *Histoire des Transports dans les Villes de France*, compte d'auteur, 1974.

Silhol, J., C. Jullien (1997). *TVR: Transport sur Voie Réservée*, FNAUT-PACA.

STIF, *Annexe financière 1 par grands projets et par operations 2007 – 2013*

STP, Direction des investissements, note DR n°1235c (1998), *Création d'une ligne de tramway en rocade sud de Paris*, rapport final 32p, modifié en février 2000, on internet.

STRMTG (2007). *Guide d'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections tramways/voies routières*, les guides techniques du Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés, 13 p.

Sutton, D. et RATP (1981). *Les transports collectifs : aspects techniques et économiques*, dans Transport Public, décembre 1981

SYSTRA, Erea, La CUB, (2004). *Etude de faisabilité des extensions du réseau communautaire de TCSP (3ième phase)*, rapport annexe – etape 2, août 2004, 39 p.

TCRP (2003). *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. Washington D.C., TRB.

Transport Public (2008). *Le guide de l'Industrie des Transports Publics 2007-08*, 131p.

Tricoire, J. (2007). *Le bus, un réseau dans la ville*, RATP mémoire de l'entreprise, 119 p.

Veinberg, J., RATP. (1989). *Le tramway de Saint Denis à Bobigny*, article de la Revue Générale des Chemins de Fer n°4 d'April 1989, p 27 to p 44.

Ventejol, P., RATP. (2008). L*e retour du tramway en France : Renouveau et développement du tramway en Île de France*, la Revue Générale des Chemins de Fer, mars 2008, p 11-14.

UTP (1992). *Le partage de la rue*, atelier sites propres, Congrès 92, June 1992.

Zalkind, S. (2008). *Le retour du tramway en France : le renouveau du tramway*, la Revue Générale des Chemins de Fer, mars 2008, p 7-10.

Zalkind, S. (1998). *Le nouveau tramway du Val de Seine (TVS) ligne T2 de la RATP*, la Revue Gnérale des Chemins de Fer, p 53-58.

Des revues

Transports urbains revue du GETUM Groupement pour l'étude des transports urbains modernes 173 rue Armand Silvestre - 92400 COURBEVOIE

Chemins de fer régionaux et urbains, revue de la FACS-Unecto Gare de L'Est - cour souterraine, porte 9 75475 PARIS CEDEX 10 Tel : (33) 01 40 38 39 07 - Fax : (33) 01 40 38 41 39

La Vie du rail, 11 rue de Milan - 75009 PARIS Réseaux urbains de France Association France-passion des transports urbains correspondance internet c/o Jean-Michel BOUTILLEZ 4-15 square Pierre et Marie Curie 78120 RAMBOUILLET

Rail passion 11 rue de Milan - 75009 PARIS

Tram 2000 L'actualité depuis 1981 15 rue Abbé Jean Heymans B-1200 BRUXELLES – Belgique

Funimag La première revue Web sur les funiculaires et crémaillères (The first WWW magazine about funiculars)

Tramways & Urban Transit (ex Light Rail and Modern Tramway) Light Rail Transit Association Albany House, Petty France LONDON SW1H 9EA - GRANDE BRETAGNE

Blickpunkt Strassenbahn Arbeitsgemeinschaft Blickpunkt Strassenbahn e.V. Burgherrenstr. 2 D-12101 BERLIN - Allemagne

Des sites internet

http://www.lightrailnow.org/features/f_ncy001.htm

http://homepage.ntlworld.com/c.fuller1/Tvr.html

http://www.bombardier.com/en/1_0/1_2/1_2_2_2_1.jsp

http://www.nantesmetropole.fr/ligne4

TransLohr :
http://www.lohr.fr/transport-public-tech.htm

Phileas :
http://www.apts-phileas.com

Irisbus :
http://www.transbus.org/construc/irisbus_civis.html

CIVIS (TEOR à Rouen) :
http://www.agglo-de-rouen.fr

Tramway de Montpellier (lignes 3, 4 et 5) :
http://pagesperso-orange.fr/edouard.paris/ligne3.htm

http://extension-reseau.ratp.fr/tlag3/index/les_acteurs_et_le.html

http://www.lemoniteur.fr/archives/article.asp?id=5430:289&ds=2&p

http://www.reimsmetropole.fr/rubrique.php?id_rubrique=37

http://www.stif.info/les-developpements-avenir/les-projets-du-contrat-plan-etat-region-cper/rocade-tramway

http://www.trains-fr.org/facs/40tramb.htm

http://dictionnaire.sensagent.com/Tramways/fr-fr/#cite_note-2

http://membres.multimania.fr/sergerom/podj/histoire/histram.htm

http://fr.wikipedia.org/wiki/Bus_parisien

http://www.amtuir.org/06_htu_bus_100_ans/oa_1905_1913/oa_1905_1913.htm

http://www.autocadre.com/actualites/554-tramway-paris.html

Récapitulatif des systèmes de transport guidé de surface

Classification des 7 systèmes de transport en site propre

Matériel roulant	Guidage	Oui	Sur rail			x						
			Sur pneu	Matériel (mécanique)			x			x		
				Immatériel	Optique			x				
					Magnétique				x			
		Non									x	x
	Alimentation	Électricité		LAC	Un fil	x	x			x		
					Deux fils					x	x	
				Batterie					x			
		Énergie fossile		Gazole				x	x	x		x
				GNV				x				x
Infrastructure	Voirie	Site propre		Intégral		x	x					
				Partiel		x	x	x	x	x	x	x
		Site banal								x	x	x
Condition d'exploitation	Exploitation	Spécifique		Prioritaire aux carrefours		x	x	x	x			
				Systèmes d'information		x	x	x	x	x	x	x
		Non-spécifique									x	x
	Fonction	Urbain				x	x	x	x	x	x	x
		Inter-urbain				x					x	x
Type de Transport en Commun de Surface						Tramway sur fer	Tramway sur pneu	CIVIS	PHILEAS	TVR	Trolleybus	Autobus
						Tramway		BHNS			Autobus en site propre	

Caractéristiques générales des systèmes de transport guidé de surface étudiés

Véhicule: caractéristiques	Bus articulé / Trolleybus (site propre)	TVR (Bombardier)	TRANSLOHR (Lohr Industrie)	CIVIS (Irisbus)	PHILEAS (APTS)	TRAMWAY (Alstom)
Guidage	Non	Monorail (Mécanique)	Monorail (Mécanique)	Optique (Immatériel)	Magnétique (Immatériel)	Rails
Bimodalité	X	Oui	Non	Oui	Oui	Non
réversibilité	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
Nombre des modèles	2	1	4	2	2	3 to 9
Longueur (m)	18, 24	24,5	25, 32, 39, 46	12,18	18, 24,5, 26	22, 29,32, 41,43
Largeur (m)	2,55	2,50	2,20	2,55	2,54	2,30, 2,40, 2,65
Capacité unitaire (4 p/m^2)	150	200	178, 238, 298, 345	85, 159	140, 171,185	173, 253, 272, 350, 370[55]
Traction	Diesel/GNC ou hybride et électrique	Électrique Diesel-électrique	Électrique	Diesel/GNC ou électrique	Électrique par Diesel ou Gaz	Électrique
Ligne aérienne	Oui pour trolleybus	Oui	Oui	Oui/Non	Non	Oui
Infrastructure	Chaussée standard	Chaussée spéciale avec 1 rail/voie	Voie spécial avec 1 rail/voie	Chaussée spéciale avec bandes peintes	Chaussée spéciale avec aimants magnétiques	Voie ferroviaire
Capacité horaire (voyageurs/h/sens)	15 x 150 = 2250	140 x 15 = 3000	2 670 à 5 175	1 275 à 2 385	2 100 à 2 775	2 595 à 5 550

[55] Capacité pour une largeur de 2,40m.

Calcul du coût d'exploitation

I. Tramway 32 m pour le scenario 1

Hypothèses du calcul :

vitesse commerciale (km/h)	20	
longueur de ligne (km): 2*15 km	30	
temps de battement en terminus: 2*5 min.	10	
taux de réserve	10 %	
Nbre de stations	30	espacement (m) : 500
Nbre de sous-stations	10	chaque 1,5km

Calcul du temps de travail effectif :

(Fréquence : 5 min)	JO	Samedi	Dimanche
Jours ouvrables, samedis, dimanches (Nbre)	253	52	60
amplitude de fonctionnement (heures)	20	19	18
Heures de pointe	4	0	0
temps de travail hors HP	16	19	18
temps de préparation du véhicule (minutes): 2*20	40		
Temps de travail effectif / véh	5 229	1 023	1 120
Temps de travail effectif / véh en HP	1 349		
	65 780	10 227	11 200
Total temps de travail effectif	87 207		

Calcul de la capacité :

Fréquences (minutes)	2	3	4	5	6	7,5
Nbre rame sans tps.bat	45,0	30,0	22,5	18,0	15,0	12,0
Nbre rame avec tps.bat	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	13,3
Nbre rame avec tps.bat + réserve	55,0	36,7	27,5	22,0	18,3	14,7

	fréquence de JO est 2 fois plus que samedi et dimanche			
	capacité unitaire	200		
	fréquence	5	HP : 10	
	Nbre rame sans tps.bat	18		
	Nbre rame avec tps.bat	20		
	5	JO	Samedi	Dimanche
	05:00	1 200	0	0
	06:00	1 200	1 200	1 200
HP	07:00	2 400	1 200	1 200
HP	08:00	2 400	1 200	1 200
	09:00	1 200	1 200	1 200
	10:00	1 200	1 200	1 200
	11:00	1 200	1 200	1 200
	12:00	1 200	1 200	1 200
	13:00	1 200	1 200	1 200

	14:00	1 200	1 200	1 200
	15:00	1 200	1 200	1 200
	16:00	1 200	1 200	1 200
HP	17:00	2 400	1 200	1 200
HP	18:00	2 400	1 200	1 200
	19:00	1 200	1 200	1 200
	20:00	1 200	1 200	1 200
	21:00	1 200	1 200	1 200
	22:00	1 200	1 200	1 200
	23:00	1 200	1 200	1 200
	00:00	1 200	1 200	1 200
	01:00	1 200	1 200	0
	sous-total	30 000	24 000	22 800
	Nbre jours	253	52	60
	Total Capacité	7 590 000	1 248 000	1 368 000
	Total Capacité annuel	10 206 000		

Calcul de la km total :

Nbre véhicules	20	10	10
km parcouru/jour/véh	240	380	360
km parcouru/jour	4 800	3 800	3 600
km parcouru / an	1 214 400	197 600	216 000
Total km	1 628 000		

Calcul du nombre de personnel pour la conduite :

vitesse de production (vp) (=km totaux/temps de travail effectif) (km/h)	18,7
temps de travail consacré par agent (ttc) (heures/an)	1 500
Nbre conducteurs (=total km/vitesse de production/temps de travail consacré)	58,1
Nbre régulateurs (=(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)/ttc)	4,8
Nbre encadrement/suivi de ligne (=(hec*N_conducteur+(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)*hsl+lskm*ll)/ttc)	3,7
heures d'encadrement par conducteur (hec)	10
heure de suivi de ligne en temps réel par heure de fonctionnement (hsl)	0,5
heures de suivi en temps différé par km de ligne (hskm)	45
Nbre de formateurs	1
Nbre chef d'exploitation	1
Nbre inspecteur	1
méthodes et gestion du personnel	1
recouvrement des indemnités forfaitaires	0,5
secrétariat	0,5
Nbre total personnel pour la conduite	71,6

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance MR :

maintenance préventive			
fréquence (km)	heures/véhicule	Nbre opération/an	total heures
journalier	0,25	364	1 820
5 000	5	10	1 000
10 000	25	5	2 500
50 000	250	1	5 000
250 000	500	0,20	2 000
500 000	1 000	0,10	2 000
15 ans +	2 000	0,07	2 667
Total heures			16 987
maintenance curative			
items	heures/véhicule	total heures	
dépannages	200	4 000	
plats sur roues; reprofilages	25	500	
moteur de traction	15	300	
collisions	50	1 000	
vandalisme	15	300	
autres remises en état (équipements)	50	1 000	
essais en ligne	5	100	
électronique	5	100	
total heures	365	7 300	
Nbre pour maintenance MR (=total heures/ttc)	16,2		
responsable Matériel Roulant	1		
contremaîtres	2		
Méthodes - ordonnancement	2		
Nbre total pour maintenance MR	21,2		

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance IF :

Voies (15km/sens)	heures/km/an	heures/an
meulage	40	600
appareils de voie	40	600
parcours de voie	16	240
contrôle géométrique	32	480
nettoyages non sous-traités	52	780
relevés d'usure, remplacement	20	300
entretiens joints	16	240
autres contrôles (serrages, ancrages)	8	120
total	224	3360
Énergie, sous-stations	chaque 2km	
Nbre sous-stations	7,5	
production énergie-traction par s-s (heures/s-s)	180	1 350
distribution énergie traction (heures/km)	80	1 200
total		2 550
Ligne aérienne		
visite et reprise de la ligne principale (heures/km)	80	80% nuit (1,5+)
visite et reprise de la ligne dans la zone d'atelier	80	
autres (élagage arbres, entretien matériel)	80	
Total	1 840	
Systèmes courants faibles		
	durée unitaire	total
PCC/SAE/SAI (heures)	1 500	1 500
distributeurs automatiques (h/distributeur)	20	1200
signalisation (heures/km)	20	300
télécommunication (heures)	20	20
poste de commande de l'énergie (heures)	20	20
total (heures)		3 040
sous-total Nbre agents pour Maintenance IF	7,2	
Autres installations fixes	Nbre	
l'entretien courant non sous-traité représente environ 2 agents (machine à laver, centrale à sable, tour en fosse, élévateurs, entretien courant des bâtiments	2	
Encadrement installations fixes		
responsable des installations fixes	1	
méthodes-ordonnancement	1	
Suivi de la sous-traitance	1	
chef du service technique	1	
secrétariat	0,5	
magasinier	0,5	
Nbre Total pour Maintenance IF	14,2	

Calcul du nombre et du coût de personnel :

	Effectif	Nombre	Coût unitaire (€/an)	Coût total (€/an)
Exploitation	chef d'exploitation	1,0	70 000	70 000
	inspecteur	1,0	60 000	60 000
	régulateur	4,8	48 000	228 096
	formateur/qualité/sécurité	1,0	48 000	48 000
	encadrement/suivi de ligne (agents maîtrise)	3,7	48 000	175 852
	conducteurs	58,1	36 000	2 092 960
	agents de contrôle	0,0	36 000	0
	méthodes/gestion	1,0	48 000	48 000
	recouvrement des amendes	0,5	36 000	18 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	sous-total	71,6		2 758 908
Maintenance	chef du service technique	1,0	60 000	60 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	magasinier	0,5	36 000	18 000
Matériel Roulant	responsable matériel roulant	1,0	60 000	60 000
	contremaître	2,0	48 000	96 000
	méthodes/ordonnancement	2,0	48 000	96 000
	ouvrier/techniciens	21,2	36 000	762 880
Installations fixes	responsable installations fixes	1,0	60 000	60 000
	méthodes/ordonnancement	1,0	48 000	48 000
	ouvrier/techniciens	7,2	36 000	258 960
	suivi de la sous-traitance	1,0	48 000	48 000
	sous-total	38,4		1 525 840
Structure	directeur général	1	85 000	85 000
	responsable marketing/commercial	1	70 000	70 000
	responsable finances/comptabilité	1	70 000	70 000
	responsable informatique	1	70 000	70 000
	responsable ressources humaines	1	70 000	70 000
	employés	4	36 000	144 000
	secrétariat	2	36 000	72 000
	sous-total	11		581 000
	Total	120,9		4 865 748

Calcul de la consommation d'énergie :

Consommation d'énergie (kwh/km)	
Citadis 302 (kwh/km)	3,4
Coûts d'électricité (€/kwh)	0,0805
Total km annuel	1 628 000
Total consommation (kwh/an)	
Citadis 302	5 535 200
Coût total consommation d'énergie annuel (€/an)	
Citadis 302	445 584
consommation d'énergie des bâtiments (€/an) y compris atelier, stations, administratif	100 000
Total électricité (€/an) : Citadis 302	**545 584**

Calcul de l'entretien sous-traité :

Matériel roulant :	nettoyage intérieur et remplissage des sablières (heure/rame/jour)	0,5	3 090	
	nettoyage complet (heures/rame/mois)	15	3 600	
	Total heure par an	6 690		
	coût par heure (€/h)	80		
	Coût total MR	**535 200**		
	coût par km (€/km)	0,33	*km parcouru	
Voies	**Maintenance systématique**			
	le glissage des appareils de voie et des lumières de rails, l'entretien des joints éclissés, le serrage des attaches, le rechargement des cœurs de voie			
	Coût (€/km)	4 000	*kilomètre de ligne	
	Sous-total (€)	120 000		
	Nettoyage en section courante			
	l'aspiration et le nettoyage manuel	semaine		
	le nettoyage des caniveaux	mois		
	le balayage et l'enlevage des feuilles mortes	à la demande		
	le curage des avaloirs situés en fond de rail à gorge, par injection d'eau sans pression	6 mois		
	le désherbage de la voie	6 mois		
	le traitement anti-mousse	an		
	Coût (€/km)	8 000	*kilomètre de ligne	
	Sous-total (€)	240 000		
	Nettoyage des zones d'aiguillage	1 500	€/zone d'aiguillages	
	Sous-total (€)	15 000	10 zones d'aiguillages	
	Nettoyage du remisage tramway	1 500	€/an	
	Grand meulage de la voie			
	tous les 2 ans sur les deux tiers de la	5 000	€/an	

	voie			
	Total voie (€)	**381 500**		
Stations	**Surfaces horizontales**			
	l'aspiration sur la voie, les quais, les accès aux quais	semaine		
	le nettoyage sous pression des voies et des quais	an		
	coût total (€/station/an)	2 000		
	total (€)	60 000		
	Abris et mobilier urbain			
	le nettoyage des vitres, du toit, des montants des abris, des barreaudages, des bancs, des distributeurs de titres, des plaques de station	mois		
	le vidage des poubelles	jour		
	la suppression des graffitis et des traces de vandalisme et d'accidents, le remplacement des vitres brisées	à la demande		
	coût total (€/station/an)	5 000	*fortes disparités liées à l'importance des stations	
	total (€)	150 000		
	Total station (€)	**210 000**		
Ligne aérienne	gros entretien préventif systématique			
	coût total (€/km)	4 000	*kilomètre de ligne	
	Total LA (€)	**120 000**		
Sous-station	l'entretien des postes de redressement et des onduleurs, la maintenance des caniveaux de feeders			
	coût total (€/Nbre.s.s/an)	4 000		
	Total sous-station (€)	**40 000**		
Courants faibles, signalisation				
	maintenance SAEI au PCC et à la téléphonie (€)	50 000		
	campagne de maintenance signalisation-chronométrie (€)	30 000		
	maintenance du système de vidéo et de sonorisation des stations (€)	10 000		
	Total CF et Signalisation (€)	**90 000**		
Bâtiments, espaces verts				
	entretiens relatifs au chauffage (€)	10 000		
	aux clôtures et portails (€)	5 000		
	extincteurs (€)	5 000		
	entretien des espaces verts (€)	20 000		
	Total Bâtiments et EV (€)	**40 000**		
	Total entretien sous-traité (€)	**1 416 700**		
	Total entretien sous-traité (€/km)	**0,87**		

Calcul des autres achats :

Assurance	dommages +responsabilité civile		
	€/km	0,05	*km parcouru
	€/an	**81 400**	
Marketing	étude, documents d'information, publicité, promotion, relations publiques		
	% du coût total d'exploitation	1,5%	100 000
Sécurité, gardiennage			
	le gardiennage du PCC		
	coût annuel (€/an)	50 000	
Dotation vestimentaire			
	conducteurs, contrôleurs, agents d'entretien et leur maîtrise		
	€/agent	700	
	coût total (€/an)	**63 130**	
Collecte des fonds des distributeurs automatiques			
	€/station/an	500	
	€/an	**15 000**	
Autres charges			
	voyages, déplacements, les locations matériel, les contrôles électriques obligatoires, les consommations d'eau, de gaz, de téléphone, les fournitures de bureau, l'entretien du matériel bureautique et informatique, la rémunération des dépositaires, les conseils juridiques, etc.		
	€/an	**50 000**	

Calcul des pièces détachées :

Pièces détachées	
remplacement systématique de pièces défectueuses (consommateur de pièce)	
réparation systématique de pièces défectueuses (consommatrice de main d'œuvre)	
Matériel roulant (y compris matériel embarqué)	
le montant des pièces détachées afférentes au MR	
€/km parcouru	0,7
total (€/an)	1 139 600
total (M€/an)	**1,1396**
Installations fixes	
le montant des pièces détachées afférentes aux Ifs	
€/km de ligne	20 000
total (€/an)	**600 000**

II. Translohr 32 m pour le scenario 1

Hypothèses du calcul :

vitesse commerciale (km/h)	20	
longueur de ligne (km): 2*15 km	30	
temps de battement en terminus: 2*5 min.	10	
taux de réserve	10 %	
Nbre de stations	30	espacement (m) : 500
Nbre de sous-stations	10	chaque 1,5km

Calcul du temps de travail effectif :

(Fréquence : 5 min)	JO	Samedi	Dimanche
Jours ouvrables, samedis, dimanches (Nbre)	253	52	60
amplitude de fonctionnement (heures)	20	19	18
Heures de pointe	4	0	0
temps de travail hors HP	16	19	18
temps de préparation du véhicule (minutes): 2*20	40		
Temps de travail effectif / véh	5 229	1 023	1 120
Temps de travail effectif / véh en HP	1 349		
	65 780	10 227	11 200
Total temps de travail effectif	87 207		

Calcul de la capacité :

Fréquences (minutes)	2	3	4	5	6	7.5
Nbre rame sans tps.bat	45.0	30.0	22.5	18.0	15.0	12.0
Nbre rame avec tps.bat	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7	13.3
Nbre rame avec tps.bat + réserve	55.0	36.7	27.5	22.0	18.3	14.7

	fréquence de JO est 2 fois plus que samedi et dimanche			
	capacité unitaire	170		
	fréquence	5	10	
	Nbre rame sans tps.bat	18		
	Nbre rame avec tps.bat	20		
	5	JO	Samedi	Dimanche
	05:00	1 020	0	0
	06:00	1 020	1 020	1 020
HP	07:00	2 040	1 020	1 020
HP	08:00	2 040	1 020	1 020
	09:00	1 020	1 020	1 020
	10:00	1 020	1 020	1 020
	11:00	1 020	1 020	1 020
	12:00	1 020	1 020	1 020
	13:00	1 020	1 020	1 020
	14:00	1 020	1 020	1 020
	15:00	1 020	1 020	1 020
	16:00	1 020	1 020	1 020
HP	17:00	2 040	1 020	1 020

HP	18:00	2 040	1 020	1 020
	19:00	1 020	1 020	1 020
	20:00	1 020	1 020	1 020
	21:00	1 020	1 020	1 020
	22:00	1 020	1 020	1 020
	23:00	1 020	1 020	1 020
	00:00	1 020	1 020	1 020
	01:00	1 020	1 020	0
	sous-total	25 500	20 400	19 380
	Nbre jours	253	52	60
	Total Capacité	6 451 500	1 060 800	1 162 800
	Total Capacité annuel	8 675 100		

Calcul de la km total :

Nbre véhicules	20	10	10
km parcouru/jour/véh	240	380	360
km parcouru/jour	4 800	3 800	3 600
km parcouru / an	1 214 400	197 600	216 000
Total km	1 628 000		

Calcul du nombre de personnel pour la conduite :

vitesse de production (vp) (=km totaux/temps de travail effectif) (km/h)	18,7
temps de travail consacré par agent (ttc) (heures/an)	1 500
Nbre conducteurs (=total km/vitesse de production/temps de travail consacré)	58,1
Nbre régulateurs (=(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)/ttc)	4,8
Nbre encadrement/suivi de ligne (=(hec*N_conducteur+(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)*hsl+lskm*ll)/ttc)	3,7
heures d'encadrement par conducteur (hec)	10
heure de suivi de ligne en temps réel par heure de fonctionnement (hsl)	0,5
heures de suivi en temps différé par km de ligne (hskm)	45
Nbre de formateurs	1
Nbre chef d'exploitation	1
Nbre inspecteur	1
méthodes et gestion du personnel	1
recouvrement des indemnités forfaitaires	0,5
secrétariat	0,5
Nbre total personnel pour la conduite	71,6

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance MR :

maintenance préventive			
fréquence (km)	heures/véhicule	Nbre opération/an	total heures
journalier	0,25	364	1 820
5 000	5	10	1 000
10 000	25	5	2 500
50 000	250	1	5 000
250 000	500	0,20	2 000
500 000	1 000	0,10	2 000
15 ans +	2 000	0,07	2 667
Total heures			16 987
maintenance curative			
items	heures/véhicule	total heures	
dépannages	200	4 000	
plats sur roues; reprofilages	25	500	
moteur de traction	15	300	
collisions	50	1 000	
vandalisme	15	300	
autres remises en état (équipements)	50	1 000	
essais en ligne	5	100	
électronique	5	100	
total heures	365	7 300	
Nbre pour maintenance MR (=total heures/ttc)	16,2		
responsable Matériel Roulant	1		
contremaîtres	2		
Méthodes - ordonnancement	2		
Nbre total pour maintenance MR	21,2		

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance IF :

Voies (15km/sens)	heures/km/an	heures/an
meulage	0	0
appareils de voie	0	0
parcours de voie	0	0
contrôle géométrique	0	0
nettoyages non sous-traités	52	780
relevés d'usure, remplacement	0	0
entretiens joints	16	240
autres contrôles (serrages, ancrages)	8	120
total	76	1140
Énergie, sous-stations	chaque 2km	
Nbre sous-stations	7,5	
production énergie-traction par s-s (heures/s-s)	180	1 350
distribution énergie traction (heures/km)	80	1 200
total		2 550
Ligne aérienne		
visite et reprise de la ligne principale (heures/km)	80	80% nuit (1,5+)
visite et reprise de la ligne dans la zone d'atelier	80	
autres (élagage arbres, entretien matériel)	80	
Total	1 840	
Systèmes courants faibles		
	durée unitaire	total
PCC/SAE/SAI (heures)	1 500	1 500
distributeurs automatiques (h/distributeur)	20	1200
signalisation (heures/km)	20	300
télécommunication (heures)	20	20
poste de commande de l'énergie (heures)	20	20
total (heures)		3 040
sous-total Nbre agents pour Maintenance IF	5,7	
Autres installations fixes	Nbre	
l'entretien courant non sous-traité représente environ 2 agents (machine à laver, centrale à sable, tour en fosse, élévateurs, entretien courant des bâtiments	2	
Encadrement installations fixes		
responsable des installations fixes	1	
méthodes-ordonnancement	1	
Suivi de la sous-traitance	1	
chef du service technique	1	
secrétariat	0,5	
magasinier	0,5	
Nbre Total pour Maintenance IF	12,7	

Calcul du nombre et du coût de personnel :

	Effectif	Nombre	Coût unitaire (€/an)	Coût total (€/an)
Exploitation	chef d'exploitation	1,0	70 000	70 000
	inspecteur	1,0	60 000	60 000
	régulateur	4,8	48 000	228 096
	formateur/qualité/sécurité	1,0	48 000	48 000
	encadrement/suivi de ligne (agents maîtrise)	3,7	48 000	175 852
	conducteurs	58,1	36 000	2 092 960
	agents de contrôle	0,0	36 000	0
	méthodes/gestion	1,0	48 000	48 000
	recouvrement des amendes	0,5	36 000	18 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	sous-total	71,6		2 758 908
Maintenance	chef du service technique	1,0	60 000	60 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	magasinier	0,5	36 000	18 000
Matériel Roulant	responsable matériel roulant	1,0	60 000	60 000
	contremaître	2,0	48 000	96 000
	méthodes/ordonnancement	2,0	48 000	96 000
	ouvrier/techniciens	21,2	36 000	762 880
Installations fixes	responsable installations fixes	1,0	60 000	60 000
	méthodes/ordonnancement	1,0	48 000	48 000
	ouvrier/techniciens	5,7	36 000	205 680
	suivi de la sous-traitance	1,0	48 000	48 000
	sous-total	36,9		1 472 560
Structure	directeur général	1	85 000	85 000
	responsable marketing/commercial	1	70 000	70 000
	responsable finances/comptabilité	1	70 000	70 000
	responsable informatique	1	70 000	70 000
	responsable ressources humaines	1	70 000	70 000
	employés	4	36 000	144 000
	secrétariat	2	36 000	72 000
	sous-total	11		581 000
	Total	119,5		4 812 468

Calcul de la consommation d'énergie :

Consommation d'énergie (kwh/km)	
Translohr STE4 (kwh/km)	3,3
Coûts d'électricité (€/kwh)	0,0805
Total km annuel	1 628 000
Total consommation (kwh/an)	
Translohr STE4	5 372 400
Coût total consommation d'énergie annuel (€/an)	
Translohr STE4	432 478
consommation d'énergie des bâtiments (€/an) y compris atelier, stations, administratif	100 000
Total électricité (€/an) : Translohr STE4	**532 478**

Calcul de l'entretien sous-traité :

Matériel roulant :	nettoyage intérieur et remplissage des sablières (heure/rame/jour)	0,5	3 090	
	nettoyage complet (heures/rame/mois)	15	3 600	
	Total heure par an	6 690		
	coût par heure (€/h)	80		
	Coût total MR	**535 200**		
	coût par km (€/km)	0,33	*km parcouru	
Voies	**Maintenance systématique**			
	le glissage des appareils de voie et des lumières de rails, l'entretien des joints éclissés, le serrage des attaches, le rechargement des cœurs de voie			
	Coût (€/km)	4 000	*kilomètre de ligne	
	Sous-total (€)	120 000		
	Nettoyage en section courante			
	l'aspiration et le nettoyage manuel	semaine		
	le nettoyage des caniveaux	mois		
	le balayage et l'enlevage des feuilles mortes	à la demande		
	le curage des avaloirs situés en fond de rail à gorge, par injection d'eau sans pression	6 mois		
	le désherbage de la voie	6 mois		
	le traitement anti-mousse	an		
	Coût (€/km)	8 000	*kilomètre de ligne	
	Sous-total (€)	240 000		
	Nettoyage des zones d'aiguillage	1 500	€/zone d'aiguillages	
	Sous-total (€)	15 000	10 zones d'aiguillages	
	Nettoyage du remisage tramway	1 500	€/an	
	Grand meulage de la voie			
	tous les 2 ans sur les deux tiers de la	5 000	€/an	

	voie			
	Total voie (€)	**381 500**		
Stations	**Surfaces horizontales**			
	l'aspiration sur la voie, les quais, les accès aux quais	semaine		
	le nettoyage sous pression des voies et des quais	an		
	coût total (€/station/an)	2 000		
	total (€)	60 000		
	Abris et mobilier urbain			
	le nettoyage des vitres, du toit, des montants des abris, des barreaudages, des bancs, des distributeurs de titres, des plaques de station	mois		
	le vidage des poubelles	jour		
	la suppression des graffitis et des traces de vandalisme et d'accidents, le remplacement des vitres brisées	à la demande		
	coût total (€/station/an)	5 000	*fortes disparités liées à l'importance des stations	
	total (€)	150 000		
	Total station (€)	**210 000**		
Ligne aérienne	gros entretien préventif systématique			
	coût total (€/km)	4 000	*kilomètre de ligne	
	Total LA (€)	**120 000**		
Sous-station	l'entretien des postes de redressement et des onduleurs, la maintenance des caniveaux de feeders			
	coût total (€/Nbre.s.s/an)	4 000		
	Total sous-station (€)	**40 000**		
Courants faibles, signalisation				
	maintenance SAEI au PCC et à la téléphonie (€)	50 000		
	campagne de maintenance signalisation-chronométrie (€)	30 000		
	maintenance du système de vidéo et de sonorisation des stations (€)	10 000		
	Total CF et Signalisation (€)	**90 000**		
Bâtiments, espaces verts				
	entretiens relatifs au chauffage (€)	10 000		
	aux clôtures et portails (€)	5 000		
	extincteurs (€)	5 000		
	entretien des espaces verts (€)	20 000		
	Total Bâtiments et EV (€)	**40 000**		
	Total entretien sous-traité (€)	**1 416 700**		
	Total entretien sous-traité (€/km)	**0,87**		

Calcul des autres achats :

Assurance	dommages +responsabilité civile		
	€/km	0,05	*km parcouru
	€/an	**81 400**	
Marketing	étude, documents d'information, publicité, promotion, relations publiques		
	% du coût total d'exploitation	1,5%	100 000
Sécurité, gardiennage			
	le gardiennage du PCC		
	coût annuel (€/an)	50 000	
Dotation vestimentaire			
	conducteurs, contrôleurs, agents d'entretien et leur maîtrise		
	€/agent	700	
	coût total (€/an)	**62 094**	
Collecte des fonds des distributeurs automatiques			
	€/station/an	500	
	€/an	**15 000**	
Autres charges			
	voyages, déplacements, les locations matériel, les contrôles électriques obligatoires, les consommations d'eau, de gaz, de téléphone, les fournitures de bureau, l'entretien du matériel bureautique et informatique, la rémunération des dépositaires, les conseils juridiques, etc.		
	€/an	**50 000**	

Calcul des pièces détachées :

Pièces détachées	
remplacement systématique de pièces défectueuses (consommateur de pièce)	
réparation systématique de pièces défectueuses (consommatrice de main d'œuvre)	
Matériel roulant (y compris matériel embarqué)	
le montant des pièces détachées afférentes au MR	
€/km parcouru	0,7
total (€/an)	1 139 600
total (M€/an)	**1,1396**
Installations fixes	
le montant des pièces détachées afférentes aux Ifs	
€/km de ligne	20 000
total (€/an)	**600 000**

III. TVR 25 m pour le scenario 1

Hypothèses du calcul :

vitesse commerciale (km/h)	20	
longueur de ligne (km): 2*15 km	30	
temps de battement en terminus: 2*5 min.	10	
taux de réserve	10 %	
Nbre de stations	30	espacement (m) : 500
Nbre de sous-stations	10	chaque 1,5km

Calcul du temps de travail effectif :

(Fréquence : 5 min)	JO	Samedi	Dimanche
Jours ouvrables, samedis, dimanches (Nbre)	253	52	60
amplitude de fonctionnement (heures)	20	19	18
Heures de pointe	4	0	0
temps de travail hors HP	16	19	18
temps de préparation du véhicule (minutes): 2*20	40		
Temps de travail effectif / véh	5 229	1 023	1 120
Temps de travail effectif / véh en HP	1 349		
	65 780	10 227	11 200
Total temps de travail effectif	87 207		

Calcul de la capacité :

Fréquences (minutes)	2	3	4	5	6	7,5
Nbre rame sans tps.bat	45,0	30,0	22,5	18,0	15,0	12,0
Nbre rame avec tps.bat	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	13,3
Nbre rame avec tps.bat + réserve	55,0	36,7	27,5	22,0	18,3	14,7

	fréquence de JO est 2 fois plus que samedi et dimanche			
	capacité unitaire	170		
	fréquence	5	10	
	Nbre rame sans tps.bat	18		
	Nbre rame avec tps.bat	20		
	5	JO	Samedi	Dimanche
	05:00	780	0	0
	06:00	780	780	780
HP	07:00	1 560	780	780
HP	08:00	1 560	780	780
	09:00	780	780	780
	10:00	780	780	780
	11:00	780	780	780
	12:00	780	780	780
	13:00	780	780	780
	14:00	780	780	780
	15:00	780	780	780
	16:00	780	780	780
HP	17:00	1 560	780	780

HP	18:00	1 560	780	780
	19:00	780	780	780
	20:00	780	780	780
	21:00	780	780	780
	22:00	780	780	780
	23:00	780	780	780
	00:00	780	780	780
	01:00	780	780	0
	sous-total	19 500	15 600	14 820
	Nbre jours	253	52	60
	Total Capacité	4 933 500	811 200	889 200
	Total Capacité annuel	6 633 900		

Calcul de la km total :

Nbre véhicules	20	10	10
km parcouru/jour/véh	240	380	360
km parcouru/jour	4 800	3 800	3 600
km parcouru / an	1 214 400	197 600	216 000
Total km	1 628 000		

Calcul du nombre de personnel pour la conduite :

vitesse de production (vp) (=km totaux/temps de travail effectif) (km/h)	18,7
temps de travail consacré par agent (ttc) (heures/an)	1 500
Nbre conducteurs (=total km/vitesse de production/temps de travail consacré)	58,1
Nbre régulateurs (=(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)/ttc)	4,8
Nbre encadrement/suivi de ligne (=(hec*N_conducteur+(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)*hsl+lskm*ll)/ttc)	3,7
heures d'encadrement par conducteur (hec)	10
heure de suivi de ligne en temps réel par heure de fonctionnement (hsl)	0,5
heures de suivi en temps différé par km de ligne (hskm)	45
Nbre de formateurs	1
Nbre chef d'exploitation	1
Nbre inspecteur	1
méthodes et gestion du personnel	1
recouvrement des indemnités forfaitaires	0,5
secrétariat	0,5
Nbre total personnel pour la conduite	71,6

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance MR :

maintenance préventive			
fréquence (km)	heures/véhicule	Nbre opération/an	total heures
journalier	0,25	364	1 820
5 000	5	10	1 000
10 000	25	5	2 500
50 000	250	1	5 000
250 000	500	0,20	2 000
500 000	1 000	0,10	2 000
15 ans +	2 000	0,07	2 667
Total heures			16 987
maintenance curative			
items	heures/véhicule	total heures	
dépannages	200	4 000	
plats sur roues; reprofilages	0	0	
moteur de traction	0	0	
collisions	0	0	
vandalisme	15	300	
autres remises en état (équipements)	0	0	
essais en ligne	0	0	
électronique	0	0	
total heures	215	4 300	
Nbre pour maintenance MR (=total heures/ttc)	14,2		
responsable Matériel Roulant	1		
contremaîtres	2		
Méthodes - ordonnancement	2		
Nbre total pour maintenance MR	19,2		

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance IF :

Voies (15km/sens)	heures/km/an	heures/an
meulage	0	0
appareils de voie	0	0
parcours de voie	0	0
contrôle géométrique	0	0
nettoyages non sous-traités	26	390
relevés d'usure, remplacement	0	0
entretiens joints	8	120
autres contrôles (serrages, ancrages)	4	60
total	38	570
Énergie, sous-stations	chaque 2km	
Nbre sous-stations	7,5	
production énergie-traction par s-s (heures/s-s)	180	1 350
distribution énergie traction (heures/km)	80	1 200
total		2 550
Ligne aérienne		
visite et reprise de la ligne principale (heures/km)	80	80% nuit (1,5+)
visite et reprise de la ligne dans la zone d'atelier	80	
autres (élagage arbres, entretien matériel)	80	
Total	1 840	
Systèmes courants faibles		
	durée unitaire	total
PCC/SAE/SAI (heures)	1 500	1 500
distributeurs automatiques (h/distributeur)	20	1200
signalisation (heures/km)	20	300
télécommunication (heures)	20	20
poste de commande de l'énergie (heures)	20	20
total (heures)		3 040
sous-total Nbre agents pour Maintenance IF	5,3	
Autres installations fixes	Nbre	
l'entretien courant non sous-traité représente environ 2 agents (machine à laver, centrale à sable, tour en fosse, élévateurs, entretien courant des bâtiments	2	
Encadrement installations fixes		
responsable des installations fixes	1	
méthodes-ordonnancement	1	
Suivi de la sous-traitance	1	
chef du service technique	1	
secrétariat	0,5	
magasinier	0,5	
Nbre Total pour Maintenance IF	12,3	

Calcul du nombre et du coût de personnel :

	Effectif	Nombre	Coût unitaire (€/an)	Coût total (€/an)
Exploitation	chef d'exploitation	1,0	70 000	70 000
	inspecteur	1,0	60 000	60 000
	régulateur	4,8	48 000	228 096
	formateur/qualité/sécurité	1,0	48 000	48 000
	encadrement/suivi de ligne (agents maîtrise)	3,7	48 000	175 852
	conducteurs	58,1	36 000	2 092 960
	agents de contrôle	0,0	36 000	0
	méthodes/gestion	1,0	48 000	48 000
	recouvrement des amendes	0,5	36 000	18 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	sous-total	71,6		2 758 908
Maintenance	chef du service technique	1,0	60 000	60 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	magasinier	0,5	36 000	18 000
Matériel Roulant	responsable matériel roulant	1,0	60 000	60 000
	contremaître	2,0	48 000	96 000
	méthodes/ordonnancement	2,0	48 000	96 000
	ouvrier/techniciens	19,2	36 000	690 880
Installations fixes	responsable installations fixes	1,0	60 000	60 000
	méthodes/ordonnancement	1,0	48 000	48 000
	ouvrier/techniciens	5,3	36 000	192 000
	suivi de la sous-traitance	1,0	48 000	48 000
	sous-total	34,5		1 386 880
Structure	directeur général	1	85 000	85 000
	responsable marketing/commercial	1	70 000	70 000
	responsable finances/comptabilité	1	70 000	70 000
	responsable informatique	1	70 000	70 000
	responsable ressources humaines	1	70 000	70 000
	employés	4	36 000	144 000
	secrétariat	2	36 000	72 000
	sous-total	11		581 000
	Total	117,1		4 726 788

Calcul de la consommation d'énergie :

Consommation d'énergie (kwh/km)		
TVR (kwh/km)	4,2	l/km = 1,63
Coûts d'électricité (€/kwh)	0,0805	
coûts de gasoil (€/l) hors taxes	0,5	
Total km annuel	1 628 000	km/an avec gasoil = 120 000
Total consommation (kwh/an)		Total consommation (l/an)
TVR	6 837 600	195 600
Coût total consommation d'énergie annuel (€/an)		
TVR	550 427	97 800
Sous-total	648 227	
consommation d'énergie des bâtiments (€/an) y compris atelier, stations, administratif	100 000	
Total électricité (€/an) : TVR	**748 227**	

Calcul de l'entretien sous-traité :

Matériel roulant :	nettoyage intérieur et remplissage des sablières (heure/rame/jour)	0	0	
	nettoyage complet (heures/rame/mois)	1	240	
	Total heure par an	240		
	coût par heure (€/h)	80		
	Coût total MR	**19 200**		
	coût par km (€/km)	0,01	*km parcouru	
Stations	**Surfaces horizontales**			
	l'aspiration sur la voie, les quais, les accès aux quais	semaine		
	le nettoyage sous pression des voies et des quais	an		
	coût total (€/station/an)	2 000		
	total (€)	60 000		
	Abris et mobilier urbain			
	le nettoyage des vitres, du toit, des montants des abris, des barreaudages, des bancs, des distributeurs de titres, des plaques de station	mois		
	le vidage des poubelles	jour		
	la suppression des graffitis et des traces de vandalisme et d'accidents, le remplacement des vitres brisées	à la demande		
	coût total (€/station/an)	5 000	*fortes disparités liées à l'importance des stations	
	total (€)	150 000		
	Total station (€)	**210 000**		
Ligne aérienne	gros entretien préventif systématique			

	coût total (€/km)	4 000	*kilomètre de ligne	
	Total LA (€)	**120 000**		
Sous-station	l'entretien des postes de redressement et des onduleurs, la maintenance des caniveaux de feeders			
	coût total (€/Nbre.s.s/an)	4 000		
	Total sous-station (€)	**40 000**		
Courants faibles, signalisation				
	maintenance SAEI au PCC et à la téléphonie (€)	0		
	campagne de maintenance signalisation-chronométrie (€)	0		
	maintenance du système de vidéo et de sonorisation des stations (€)	0		
	Total CF et Signalisation (€)	**0**		
Bâtiments, espaces verts				
	entretiens relatifs au chauffage (€)	10 000		
	aux clôtures et portails (€)	5 000		
	extincteurs (€)	5 000		
	entretien des espaces verts (€)	20 000		
	Total Bâtiments et EV (€)	**40 000**		
	Total entretien sous-traité (€)	**429 200**		
	Total entretien sous-traité (€/km)	**0,26**		

Calcul des autres achats :

Assurance	dommages +responsabilité civile		
	€/km	0,05	*km parcouru
	€/an	**81 400**	
Marketing	étude, documents d'information, publicité, promotion, relations publiques		
	% du coût total d'exploitation	1,5%	100 000
Sécurité, gardiennage			
	le gardiennage du PCC		
	coût annuel (€/an)	50 000	
Dotation vestimentaire			
	conducteurs, contrôleurs, agents d'entretien et leur maîtrise		
	€/agent	700	
	coût total (€/an)	**60 428**	
Collecte des fonds des distributeurs automatiques			
	€/station/an	500	
	€/an	**15 000**	
Autres charges			
	voyages, déplacements, les locations matériel, les contrôles électriques obligatoires, les consommations d'eau, de gaz, de téléphone, les fournitures de bureau, l'entretien du matériel bureautique et informatique, la rémunération des dépositaires, les conseils juridiques, etc.		
	€/an	**50 000**	

Calcul des pièces détachées :

Pièces détachées	
remplacement systématique de pièces défectueuses (consommateur de pièce)	
réparation systématique de pièces défectueuses (consommatrice de main d'œuvre)	
Matériel roulant (y compris matériel embarqué)	
le montant des pièces détachées afférentes au MR	
€/km parcouru	0,4
total (€/an)	651 200
total (M€/an)	**0,6512**
Installations fixes	
le montant des pièces détachées afférentes aux Ifs	
€/km de ligne	10 000
total (€/an)	**300 000**

IV. CIVIS 18 m pour le scenario 1

Hypothèses du calcul :

vitesse commerciale (km/h)	20	
longueur de ligne (km): 2*15 km	30	
temps de battement en terminus: 2*5 min.	10	
taux de réserve	10 %	
Nbre de stations	30	espacement (m) : 500
Nbre de sous-stations	10	chaque 1,5km

Calcul du temps de travail effectif :

(Fréquence : 5 min)	JO	Samedi	Dimanche
Jours ouvrables, samedis, dimanches (Nbre)	253	52	60
amplitude de fonctionnement (heures)	20	19	18
Heures de pointe	4	0	0
temps de travail hors HP	16	19	18
temps de préparation du véhicule (minutes): 2*20	40		
Temps de travail effectif / véh	5 229	1 023	1 120
Temps de travail effectif / véh en HP	1 349		
	65 780	10 227	11 200
Total temps de travail effectif	87 207		

Calcul de la capacité :

Fréquences (minutes)	2	3	4	5	6	7,5
Nbre rame sans tps.bat	45,0	30,0	22,5	18,0	15,0	12,0
Nbre rame avec tps.bat	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	13,3
Nbre rame avec tps.bat + réserve	55,0	36,7	27,5	22,0	18,3	14,7

	fréquence de JO est 2 fois plus que samedi et dimanche			
	capacité unitaire	105		
	fréquence	5	10	
	Nbre rame sans tps.bat	18		
	Nbre rame avec tps.bat	20		
	5	JO	Samedi	Dimanche
	05:00	630	0	0
	06:00	630	630	630
HP	07:00	1 260	630	630
HP	08:00	1 260	630	630
	09:00	630	630	630
	10:00	630	630	630
	11:00	630	630	630
	12:00	630	630	630
	13:00	630	630	630
	14:00	630	630	630
	15:00	630	630	630
	16:00	630	630	630
HP	17:00	1 260	630	630

HP	18:00	1 260	630	630
	19:00	630	630	630
	20:00	630	630	630
	21:00	630	630	630
	22:00	630	630	630
	23:00	630	630	630
	00:00	630	630	630
	01:00	630	630	0
	sous-total	15 750	12 600	11 970
	Nbre jours	253	52	60
	Total Capacité	3 984 750	655 200	718 200
	Total Capacité annuel	5 358 150		

Calcul de la km total :

Nbre véhicules	20	10	10
km parcouru/jour/véh	240	380	360
km parcouru/jour	4 800	3 800	3 600
km parcouru / an	1 214 400	197 600	216 000
Total km	1 628 000		

Calcul du nombre de personnel pour la conduite :

vitesse de production (vp) (=km totaux/temps de travail effectif) (km/h)	18,7
temps de travail consacré par agent (ttc) (heures/an)	1 500
Nbre conducteurs (=total km/vitesse de production/temps de travail consacré)	58,1
Nbre régulateurs (=(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)/ttc)	4,8
Nbre encadrement/suivi de ligne (=(hec*N_conducteur+(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)*hsl+lskm*ll)/ttc)	3,7
heures d'encadrement par conducteur (hec)	10
heure de suivi de ligne en temps réel par heure de fonctionnement (hsl)	0,5
heures de suivi en temps différé par km de ligne (hskm)	45
Nbre de formateurs	1
Nbre chef d'exploitation	1
Nbre inspecteur	1
méthodes et gestion du personnel	1
recouvrement des indemnités forfaitaires	0,5
secrétariat	0,5
Nbre total personnel pour la conduite	71,6

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance MR :

maintenance préventive			
fréquence (km)	heures/véhicule	Nbre opération/an	total heures
journalier	0,25	364	1 820
5 000	5	10	1 000
10 000	25	5	2 500
50 000	250	1	5 000
250 000	500	0,20	2 000
500 000	1 000	0,10	2 000
15 ans +	2 000	0,07	2 667
Total heures			16 987
maintenance curative			
items	heures/véhicule	total heures	
dépannages	200	4 000	
plats sur roues; reprofilages	0	0	
moteur de traction	0	0	
collisions	0	0	
vandalisme	15	300	
autres remises en état (équipements)	0	0	
essais en ligne	0	0	
électronique	0	0	
total heures	215	4 300	
Nbre pour maintenance MR (=total heures/ttc)	14,2		
responsable Matériel Roulant	1		
contremaîtres	2		
Méthodes - ordonnancement	2		
Nbre total pour maintenance MR	19,2		

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance IF :

Voies (15km/sens)	heures/km/an	heures/an
meulage	0	0
appareils de voie	0	0
parcours de voie	0	0
contrôle géométrique	0	0
nettoyages non sous-traités	52	780
relevés d'usure, remplacement	0	0
entretiens joints	0	0
autres contrôles (serrages, ancrages)	0	0
total	52	780
sous-total Nbre agents pour Maintenance IF	1,3	
Autres installations fixes	Nbre	
l'entretien courant non sous-traité représente environ 2 agents (machine à laver, centrale à sable, tour en fosse, élévateurs, entretien courant des bâtiments	2	

Suivi de la sous-traitance	1	
chef du service technique	1	
secrétariat	0,5	
magasinier	0,5	
Nbre Total pour Maintenance IF	4,3	

Calcul du nombre et du coût de personnel :

	Effectif	Nombre	Coût unitaire (€/an)	Coût total (€/an)
Exploitation	chef d'exploitation	1,0	70 000	70 000
	inspecteur	1,0	60 000	60 000
	régulateur	4,8	48 000	228 096
	formateur/qualité/sécurité	1,0	48 000	48 000
	encadrement/suivi de ligne (agents maîtrise)	3,7	48 000	175 852
	conducteurs	58,1	36 000	2 092 960
	agents de contrôle	0,0	36 000	0
	méthodes/gestion	1,0	48 000	48 000
	recouvrement des amendes	0,5	36 000	18 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	sous-total	71,6		2 758 908
Maintenance	chef du service technique	1,0	60 000	60 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	magasinier	0,5	36 000	18 000
Matériel Roulant	responsable matériel roulant	1,0	60 000	60 000
	contremaître	2,0	48 000	96 000
	méthodes/ordonnancement	2,0	48 000	96 000
	ouvrier/techniciens	19,2	36 000	690 880
Installations fixes	responsable installations fixes	0	60 000	0
	méthodes/ordonnancement	0	48 000	0
	ouvrier/techniciens	1,3	36 000	47 520
	suivi de la sous-traitance	1,0	48 000	48 000
	sous-total	28,5		1 134 400
Structure	directeur général	1	85 000	85 000
	responsable marketing/commercial	1	70 000	70 000
	responsable finances/comptabilité	1	70 000	70 000
	responsable informatique	1	70 000	70 000
	responsable ressources humaines	1	70 000	70 000
	employés	4	36 000	144 000
	secrétariat	2	36 000	72 000
	sous-total	11		581 000
	Total	111,1		4 474 308

Calcul de la consommation d'énergie :

Consommation d'énergie (l/km)	
CIVIS (Autobus articulé) (l/km)	0,7
coûts de gasoil (€/l) hors taxes	0,5
Total km annuel	1 628 000
Total consommation (l/an)	
CIVIS (Autobus articulé)	1 139 600
Coût total consommation d'énergie annuel (€/an)	
CIVIS (Autobus articulé)	569 800
consommation d'énergie des bâtiments (€/an) y compris atelier, stations, administratif	100 000
Total électricité (€/an) : CIVIS	**669 800**

Calcul de l'entretien sous-traité :

Matériel roulant :	nettoyage intérieur et remplissage des sablières (heure/rame/jour)	0	0	
	nettoyage complet (heures/rame/mois)	1	240	
	Total heure par an	240		
	coût par heure (€/h)	80		
	Coût total MR	**19 200**		
	coût par km (€/km)	0,01	*km parcouru	
Stations	**Surfaces horizontales**			
	l'aspiration sur la voie, les quais, les accès aux quais	semaine		
	le nettoyage sous pression des voies et des quais	an		
	coût total (€/station/an)	2 000		
	total (€)	60 000		
	Abris et mobilier urbain			
	le nettoyage des vitres, du toit, des montants des abris, des barreaudages, des bancs, des distributeurs de titres, des plaques de station	mois		
	le vidage des poubelles	jour		
	la suppression des graffitis et des traces de vandalisme et d'accidents, le remplacement des vitres brisées	à la demande		
	coût total (€/station/an)	5 000	*fortes disparités liées à l'importance des stations	
	total (€)	150 000		
	Total station (€)	**210 000**		
Bâtiments, espaces verts				
	entretiens relatifs au chauffage (€)	10 000		
	aux clôtures et portails (€)	5 000		

	extincteurs (€)	5 000		
	entretien des espaces verts (€)	20 000		
	Total Bâtiments et EV (€)	**40 000**		
	Total entretien sous-traité (€)	**269 200**		
	Total entretien sous-traité (€/km)	**0,17**		

Calcul des autres achats :

Assurance	dommages +responsabilité civile		
	€/km	0,05	*km parcouru
	€/an	**81 400**	
Marketing	étude, documents d'information, publicité, promotion, relations publiques		
	% du coût total d'exploitation	1,5%	100 000
Sécurité, gardiennage			
	le gardiennage du PCC		
	coût annuel (€/an)	50 000	
Dotation vestimentaire			
	conducteurs, contrôleurs, agents d'entretien et leur maîtrise		
	€/agent	700	
	coût total (€/an)	**57 619**	
Collecte des fonds des distributeurs automatiques			
	€/station/an	500	
	€/an	**15 000**	
Autres charges			
	voyages, déplacements, les locations matériel, les contrôles électriques obligatoires, les consommations d'eau, de gaz, de téléphone, les fournitures de bureau, l'entretien du matériel bureautique et informatique, la rémunération des dépositaires, les conseils juridiques, etc.		
	€/an	**50 000**	

Calcul des pièces détachées :

Pièces détachées	
remplacement systématique de pièces défectueuses (consommateur de pièce)	
réparation systématique de pièces défectueuses (consommatrice de main d'œuvre)	
Matériel roulant (y compris matériel embarqué)	
le montant des pièces détachées afférentes au MR	
€/km parcouru	0,35
total (€/an)	569 800
total (M€/an)	**0,5698**

V. Trolleybus 18 m pour le scenario 1

Hypothèses du calcul :

vitesse commerciale (km/h)	20	
longueur de ligne (km): 2*15 km	30	
temps de battement en terminus: 2*5 min.	10	
taux de réserve	10 %	
Nbre de stations	30	espacement (m) : 500
Nbre de sous-stations	10	chaque 1,5km

Calcul du temps de travail effectif :

(Fréquence : 5 min)	JO	Samedi	Dimanche
Jours ouvrables, samedis, dimanches (Nbre)	253	52	60
amplitude de fonctionnement (heures)	20	19	18
Heures de pointe	4	0	0
temps de travail hors HP	16	19	18
temps de préparation du véhicule (minutes): 2*20	40		
Temps de travail effectif / véh	5 229	1 023	1 120
Temps de travail effectif / véh en HP	1 349		
	65 780	10 227	11 200
Total temps de travail effectif	87 207		

Calcul de la capacité :

Fréquences (minutes)	2	3	4	5	6	7,5
Nbre rame sans tps.bat	45,0	30,0	22,5	18,0	15,0	12,0
Nbre rame avec tps.bat	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	13,3
Nbre rame avec tps.bat + réserve	55,0	36,7	27,5	22,0	18,3	14,7

	fréquence de JO est 2 fois plus que samedi et dimanche			
	capacité unitaire	105		
	fréquence	5	10	
	Nbre rame sans tps.bat	18		
	Nbre rame avec tps.bat	20		
	5	JO	Samedi	Dimanche
	05:00	630	0	0
	06:00	630	630	630
HP	07:00	1 260	630	630
HP	08:00	1 260	630	630
	09:00	630	630	630
	10:00	630	630	630
	11:00	630	630	630
	12:00	630	630	630
	13:00	630	630	630
	14:00	630	630	630
	15:00	630	630	630
	16:00	630	630	630
HP	17:00	1 260	630	630

HP	18:00	1 260	630	630
	19:00	630	630	630
	20:00	630	630	630
	21:00	630	630	630
	22:00	630	630	630
	23:00	630	630	630
	00:00	630	630	630
	01:00	630	630	0
	sous-total	15 750	12 600	11 970
	Nbre jours	253	52	60
	Total Capacité	3 984 750	655 200	718 200
	Total Capacité annuel	5 358 150		

Calcul de la km total :

Nbre véhicules	20	10	10
km parcouru/jour/véh	240	380	360
km parcouru/jour	4 800	3 800	3 600
km parcouru / an	1 214 400	197 600	216 000
Total km	1 628 000		

Calcul du nombre de personnel pour la conduite :

vitesse de production (vp) (=km totaux/temps de travail effectif) (km/h)	18,7
temps de travail consacré par agent (ttc) (heures/an)	1 500
Nbre conducteurs (=total km/vitesse de production/temps de travail consacré)	58,1
Nbre régulateurs (=(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)/ttc)	4,8
Nbre encadrement/suivi de ligne (=(hec*N_conducteur+(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)*hsl+lskm*ll)/ttc)	3,7
heures d'encadrement par conducteur (hec)	10
heure de suivi de ligne en temps réel par heure de fonctionnement (hsl)	0,5
heures de suivi en temps différé par km de ligne (hskm)	45
Nbre de formateurs	1
Nbre chef d'exploitation	1
Nbre inspecteur	1
méthodes et gestion du personnel	1
recouvrement des indemnités forfaitaires	0,5
secrétariat	0,5
Nbre total personnel pour la conduite	71,6

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance MR :

maintenance préventive			
fréquence (km)	heures/véhicule	Nbre opération/an	total heures
journalier	0,25	364	1 820
5 000	5	10	1 000
10 000	25	5	2 500
50 000	250	1	5 000
250 000	500	0,20	2 000
500 000	1 000	0,10	2 000
15 ans +	2 000	0,07	2 667
Total heures			16 987
maintenance curative			
items	heures/véhicule	total heures	
dépannages	200	4 000	
plats sur roues; reprofilages	0	0	
moteur de traction	0	0	
collisions	0	0	
vandalisme	15	300	
autres remises en état (équipements)	0	0	
essais en ligne	0	0	
électronique	0	0	
total heures	215	4 300	
Nbre pour maintenance MR (=total heures/ttc)	14,2		
responsable Matériel Roulant	1		
contremaîtres	2		
Méthodes - ordonnancement	2		
Nbre total pour maintenance MR	19,2		

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance IF :

Énergie, sous-stations	chaque 2km	
Nbre sous-stations	7,5	
production énergie-traction par s-s (heures/s-s)	180	1 350
distribution énergie traction (heures/km)	80	1 200
total		2 550
Ligne aérienne		
visite et reprise de la ligne principale (heures/km)	80	80% nuit (1,5+)
visite et reprise de la ligne dans la zone d'atelier	80	
autres (élagage arbres, entretien matériel)	80	
Total	1 840	
sous-total Nbre agents pour Maintenance IF	2,9	
Autres installations fixes	Nbre	
l'entretien courant non sous-traité représente environ 2 agents (machine à laver, centrale à sable, tour en fosse, élévateurs, entretien courant des bâtiments	2	
Encadrement installations fixes		
responsable des installations fixes	1	
méthodes-ordonnancement	1	
Suivi de la sous-traitance	1	
chef du service technique	1	
secrétariat	0,5	
magasinier	0,5	
Nbre Total pour Maintenance IF	9,9	

Calcul du nombre et du coût de personnel :

	Effectif	Nombre	Coût unitaire (€/an)	Coût total (€/an)
Exploitation	chef d'exploitation	1,0	70 000	70 000
	inspecteur	1,0	60 000	60 000
	régulateur	4,8	48 000	228 096
	formateur/qualité/sécurité	1,0	48 000	48 000
	encadrement/suivi de ligne (agents maîtrise)	3,7	48 000	175 852
	conducteurs	58,1	36 000	2 092 960
	agents de contrôle	0,0	36 000	0
	méthodes/gestion	1,0	48 000	48 000
	recouvrement des amendes	0,5	36 000	18 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	sous-total	71,6		2 758 908
Maintenance	chef du service technique	1,0	60 000	60 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	magasinier	0,5	36 000	18 000
Matériel Roulant	responsable matériel roulant	1,0	60 000	60 000
	contremaître	2,0	48 000	96 000
	méthodes/ordonnancement	2,0	48 000	96 000
	ouvrier/techniciens	19,2	36 000	690 880
Installations fixes	responsable installations fixes	1,0	60 000	60 000
	méthodes/ordonnancement	1,0	48 000	48 000
	ouvrier/techniciens	2,9	36 000	105 360
	suivi de la sous-traitance	1,0	48 000	48 000
	sous-total	32,1		1 300 240
Structure	directeur général	1	85 000	85 000
	responsable marketing/commercial	1	70 000	70 000
	responsable finances/comptabilité	1	70 000	70 000
	responsable informatique	1	70 000	70 000
	responsable ressources humaines	1	70 000	70 000
	employés	4	36 000	144 000
	secrétariat	2	36 000	72 000
	sous-total	11		581 000
	Total	114,7		4 640 148

Calcul de la consommation d'énergie :

Consommation d'énergie (kwh/km)		
Trolleybus (kwh/km)	4,0	l/km = 1,63
Coûts d'électricité (€/kwh)	0,0805	
coûts de gasoil (€/l) hors taxes	0,5	
Total km annuel	1 628 000	km/an avec gasoil = 120 000
Total consommation (kwh/an)		Total consommation (l/an)
Trolleybus	6 512 000	195 600
Coût total consommation d'énergie annuel (€/an)		
Trolleybus	524 216	97 800
consommation d'énergie des bâtiments (€/an) y compris atelier, stations, administratif	100 000	
Total électricité (€/an) : Trolleybus	**624 216**	

Calcul de l'entretien sous-traité :

Matériel roulant :	nettoyage intérieur et remplissage des sablières (heure/rame/jour)	0	0	
	nettoyage complet (heures/rame/mois)	1	240	
	Total heure par an	240		
	coût par heure (€/h)	80		
	Coût total MR	**19 200**		
	coût par km (€/km)	0,01	*km parcouru	
Stations	**Surfaces horizontales**			
	l'aspiration sur la voie, les quais, les accès aux quais	semaine		
	le nettoyage sous pression des voies et des quais	an		
	coût total (€/station/an)	2 000		
	total (€)	60 000		
	Abris et mobilier urbain			
	le nettoyage des vitres, du toit, des montants des abris, des barreaudages, des bancs, des distributeurs de titres, des plaques de station	mois		
	le vidage des poubelles	jour		
	la suppression des graffitis et des traces de vandalisme et d'accidents, le remplacement des vitres brisées	à la demande		
	coût total (€/station/an)	5 000	*fortes disparités liées à l'importance des stations	
	total (€)	150 000		
	Total station (€)	**210 000**		
Ligne aérienne	gros entretien préventif systématique			
		coût total	4 000	*kilomètre de

		(€/km)		ligne
	Total LA (€)	**120 000**		
Sous-station	l'entretien des postes de redressement et des onduleurs, la maintenance des caniveaux de feeders	5 000		
	coût total (€/Nbre.s.s/an)	4 000		
	Total sous-station (€)	**40 000**		
	Total entretien sous-traité (€)	**429 200**		
	Total entretien sous-traité (€/km)	**0,26**		

Calcul des autres achats :

Assurance	dommages +responsabilité civile		
	€/km	0,05	*km parcouru
	€/an	**81 400**	
Marketing	étude, documents d'information, publicité, promotion, relations publiques		
	% du coût total d'exploitation	1,5%	100 000
Sécurité, gardiennage			
	le gardiennage du PCC		
	coût annuel (€/an)	50 000	
Dotation vestimentaire			
	conducteurs, contrôleurs, agents d'entretien et leur maîtrise		
	€/agent	700	
	coût total (€/an)	**58 743**	
Collecte des fonds des distributeurs automatiques			
	€/station/an	500	
	€/an	**15 000**	
Autres charges			
	voyages, déplacements, les locations matériel, les contrôles électriques obligatoires, les consommations d'eau, de gaz, de téléphone, les fournitures de bureau, l'entretien du matériel bureautique et informatique, la rémunération des dépositaires, les conseils juridiques, etc.		
	€/an	**50 000**	

Calcul des pièces détachées :

Pièces détachées	
remplacement systématique de pièces défectueuses (consommateur de pièce)	
réparation systématique de pièces défectueuses (consommatrice de main d'œuvre)	
Matériel roulant (y compris matériel embarqué)	
le montant des pièces détachées afférentes au MR	
€/km parcouru	0,4
total (€/an)	651 200
total (M€/an)	**0,6512**
Installations fixes	
le montant des pièces détachées afférentes aux Ifs	
€/km de ligne	10 000
total (€/an)	**300 000**

VI. Autobus articulé 18 m pour le scenario 1

Hypothèses du calcul :

vitesse commerciale (km/h)	20	
longueur de ligne (km): 2*15 km	30	
temps de battement en terminus: 2*5 min.	10	
taux de réserve	10 %	
Nbre de stations	30	espacement (m) : 500
Nbre de sous-stations	10	chaque 1,5km

Calcul du temps de travail effectif :

(Fréquence : 5 min)	JO	Samedi	Dimanche
Jours ouvrables, samedis, dimanches (Nbre)	253	52	60
amplitude de fonctionnement (heures)	20	19	18
Heures de pointe	4	0	0
temps de travail hors HP	16	19	18
temps de préparation du véhicule (minutes): 2*20	40		
Temps de travail effectif / véh	5 229	1 023	1 120
Temps de travail effectif / véh en HP	1 349		
	65 780	10 227	11 200
Total temps de travail effectif	87 207		

Calcul de la capacité :

Fréquences (minutes)	2	3	4	5	6	7,5
Nbre rame sans tps.bat	45,0	30,0	22,5	18,0	15,0	12,0
Nbre rame avec tps.bat	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7	13,3
Nbre rame avec tps.bat + réserve	55,0	36,7	27,5	22,0	18,3	14,7

	fréquence de JO est 2 fois plus que samedi et dimanche			
	capacité unitaire	105		
	fréquence	5	10	
	Nbre rame sans tps.bat	18		
	Nbre rame avec tps.bat	20		
	5	JO	Samedi	Dimanche
	05:00	630	0	0
	06:00	630	630	630
HP	07:00	1 260	630	630
HP	08:00	1 260	630	630
	09:00	630	630	630
	10:00	630	630	630
	11:00	630	630	630
	12:00	630	630	630
	13:00	630	630	630
	14:00	630	630	630
	15:00	630	630	630
	16:00	630	630	630

HP	17:00	1 260	630	630
HP	18:00	1 260	630	630
	19:00	630	630	630
	20:00	630	630	630
	21:00	630	630	630
	22:00	630	630	630
	23:00	630	630	630
	00:00	630	630	630
	01:00	630	630	0
	sous-total	15 750	12 600	11 970
	Nbre jours	253	52	60
	Total Capacité	3 984 750	655 200	718 200
	Total Capacité annuel	5 358 150		

Calcul de la km total :

Nbre véhicules	20	10	10
km parcouru/jour/véh	240	380	360
km parcouru/jour	4 800	3 800	3 600
km parcouru / an	1 214 400	197 600	216 000
Total km	1 628 000		

Calcul du nombre de personnel pour la conduite :

vitesse de production (vp) (=km totaux/temps de travail effectif) (km/h)	18,7
temps de travail consacré par agent (ttc) (heures/an)	1 500
Nbre conducteurs (=total km/vitesse de production/temps de travail consacré)	58,1
Nbre régulateurs (=(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)/ttc)	4,8
Nbre encadrement/suivi de ligne (=(hec*N_conducteur+(jo*jo_ampl+sam*sm_ampl+dim*dim_ampl)*hsl+lskm*ll)/ttc)	3,7
heures d'encadrement par conducteur (hec)	10
heure de suivi de ligne en temps réel par heure de fonctionnement (hsl)	0,5
heures de suivi en temps différé par km de ligne (hskm)	45
Nbre de formateurs	1
Nbre chef d'exploitation	1
Nbre inspecteur	1
méthodes et gestion du personnel	1
recouvrement des indemnités forfaitaires	0,5
secrétariat	0,5
Nbre total personnel pour la conduite	71,6

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance MR :

maintenance préventive			
fréquence (km)	heures/véhicule	Nbre opération/an	total heures
journalier	0,25	364	1 820
5 000	5	10	1 000
10 000	25	5	2 500
50 000	250	1	5 000
250 000	500	0,20	2 000
500 000	1 000	0,10	2 000
15 ans +	2 000	0,07	2 667
Total heures			16 987
maintenance curative			
items	heures/véhicule	total heures	
dépannages	200	4 000	
plats sur roues; reprofilages	0	0	
moteur de traction	0	0	
collisions	0	0	
vandalisme	15	300	
autres remises en état (équipements)	0	0	
essais en ligne	0	0	
électronique	0	0	
total heures	215	4 300	
Nbre pour maintenance MR (=total heures/ttc)	14,2		
responsable Matériel Roulant	1		
contremaîtres	2		
Méthodes - ordonnancement	2		
Nbre total pour maintenance MR	19,2		

Calcul du nombre de personnel pour le maintenance IF :

Nbre agents pour Maintenance IF	0,8
Suivi de la sous-traitance	1
chef du service technique	1
secrétariat	0,5
magasinier	0,5
Nbre Total pour Maintenance IF	3,8

Calcul du nombre et du coût de personnel :

	Effectif	Nombre	Coût unitaire (€/an)	Coût total (€/an)
Exploitation	chef d'exploitation	1,0	70 000	70 000
	inspecteur	1,0	60 000	60 000
	régulateur	4,8	48 000	228 096
	formateur/qualité/sécurité	1,0	48 000	48 000
	encadrement/suivi de ligne (agents maîtrise)	3,7	48 000	175 852
	conducteurs	58,1	36 000	2 092 960
	agents de contrôle	0,0	36 000	0
	méthodes/gestion	1,0	48 000	48 000
	recouvrement des amendes	0,5	36 000	18 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	sous-total	71,6		2 758 908
Maintenance	chef du service technique	1,0	60 000	60 000
	secrétariat	0,5	36 000	18 000
	magasinier	0,5	36 000	18 000
Matériel Roulant	responsable matériel roulant	1,0	60 000	60 000
	contremaître	2,0	48 000	96 000
	méthodes/ordonnancement	2,0	48 000	96 000
	ouvrier/techniciens	19,2	36 000	690 880
Installations fixes	responsable installations fixes	0	60 000	0
	méthodes/ordonnancement	0	48 000	0
	ouvrier/techniciens	0,8	36 000	28 800
	suivi de la sous-traitance	1,0	48 000	48 000
	sous-total	28,0		1 115 680
Structure	directeur général	1	85 000	85 000
	responsable marketing/commercial	1	70 000	70 000
	responsable finances/comptabilité	1	70 000	70 000
	responsable informatique	1	70 000	70 000
	responsable ressources humaines	1	70 000	70 000
	employés	4	36 000	144 000
	secrétariat	2	36 000	72 000
	sous-total	11		581 000
	Total	110,5		4 455 588

Calcul de la consommation d'énergie :

Consommation d'énergie (l/km)	
Autobus articulé (l/km)	0,7
coûts de gasoil (€/l) hors taxes	0,5
Total km annuel	1 628 000
Total consommation (l/an)	
Autobus articulé	1 139 600
Coût total consommation d'énergie annuel (€/an)	
Autobus articulé	569 800
consommation d'énergie des bâtiments (€/an) y compris atelier, stations, administratif	100 000
Total électricité (€/an) : Autobus articulé	**669 800**

Calcul de l'entretien sous-traité :

Matériel roulant :	nettoyage intérieur et remplissage des sablières (heure/rame/jour)	0	0	
	nettoyage complet (heures/rame/mois)	1	240	
	Total heure par an	240		
	coût par heure (€/h)	80		
	Coût total MR	**19 200**		
	coût par km (€/km)	0,01	*km parcouru	
Stations	**Surfaces horizontales**			
	l'aspiration sur la voie, les quais, les accès aux quais	semaine		
	le nettoyage sous pression des voies et des quais	an		
	coût total (€/station/an)	2 000		
	total (€)	60 000		
	Abris et mobilier urbain			
	le nettoyage des vitres, du toit, des montants des abris, des barreaudages, des bancs, des distributeurs de titres, des plaques de station	mois		
	le vidage des poubelles	jour		
	la suppression des graffitis et des traces de vandalisme et d'accidents, le remplacement des vitres brisées	à la demande		
	coût total (€/station/an)	5 000	*fortes disparités liées à l'importance des stations	
	total (€)	150 000		
	Total station (€)	**210 000**		
Bâtiments, espaces verts				
	entretiens relatifs au chauffage (€)	10 000		
	aux clôtures et portails (€)	5 000		

	extincteurs (€)	5 000		
	entretien des espaces verts (€)	20 000		
	Total Bâtiments et EV (€)	**40 000**		
	Total entretien sous-traité (€)	**269 200**		
	Total entretien sous-traité (€/km)	**0,17**		

Calcul des autres achats :

Assurance	dommages +responsabilité civile		
	€/km	0,05	*km parcouru
	€/an	**81 400**	
Marketing	étude, documents d'information, publicité, promotion, relations publiques		
	% du coût total d'exploitation	1,5%	100 000
Sécurité, gardiennage			
	le gardiennage du PCC		
	coût annuel (€/an)	50 000	
Dotation vestimentaire			
	conducteurs, contrôleurs, agents d'entretien et leur maîtrise		
	€/agent	700	
	coût total (€/an)	**57 619**	
Collecte des fonds des distributeurs automatiques			
	€/station/an	500	
	€/an	**15 000**	
Autres charges			
	voyages, déplacements, les locations matériel, les contrôles électriques obligatoires, les consommations d'eau, de gaz, de téléphone, les fournitures de bureau, l'entretien du matériel bureautique et informatique, la rémunération des dépositaires, les conseils juridiques, etc.		
	€/an	**50 000**	

Calcul des pièces détachées :

Pièces détachées	
remplacement systématique de pièces défectueuses (consommateur de pièce)	
réparation systématique de pièces défectueuses (consommatrice de main d'œuvre)	
Matériel roulant (y compris matériel embarqué)	
le montant des pièces détachées afférentes au MR	
€/km parcouru	0,3
total (€/an)	488 400
total (M€/an)	**0,4884**

Coûts d'exploitation estimés pour le scenario 2

I. Tramway 32 m

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	3,550,745	0.28	1.76	33.24%
	Maintenance	1,758,820	0.14	0.87	16.47%
	Structure	581,000	0.05	0.29	5.44%
sous-total		5,890,565	0.46	2.92	55.15%
Énergie	Véhicules	551,410	0.04	0.27	5.16%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.05	0.94%
sous-total		651,410	0.05	0.32	6.10%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	735,900	0.06	0.37	6.89%
	Voie	381,500	0.03	0.19	3.57%
	Stations	315,000	0.02	0.16	2.95%
	Ligne aérienne	120,000	0.01	0.06	1.12%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.02	0.37%
	Courant faible, signalisation	90,000	0.01	0.04	0.84%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.02	0.37%
sous-total		1,722,400	0.14	0.85	16.13%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	100,733	0.01	0.05	0.94%
	Marketing	100,000	0.01	0.05	0.94%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.02	0.47%
	Dotation vestimentaire	83,023	0.01	0.04	0.78%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.21%
	Autres charges	50,000	0.00	0.02	0.47%
sous-total		406,256	0.03	0.20	3.80%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,410,255	0.11	0.70	13.20%
	Installations fixes	600,000	0.05	0.30	5.62%
sous-total		2,010,255	0.16	1.00	18.82%
TOTAL Coût d'exploitation		**10,680,885**	**0.84**	**5.30**	**100%**

II. Translohr

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	3,965,516	0.32	1.72	34.34%
	Maintenance	1,820,034	0.15	0.79	15.76%
	Structure	581,000	0.05	0.25	5.03%
sous-total		6,366,550	0.51	2.77	55.13%
Énergie	Véhicules	611,648	0.05	0.27	5.30%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.04	0.87%
sous-total		711,648	0.06	0.31	6.16%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	841,029	0.07	0.37	7.28%
	Voie	381,500	0.03	0.17	3.30%
	Stations	315,000	0.03	0.14	2.73%
	Ligne aérienne	120,000	0.01	0.05	1.04%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.02	0.35%
	Courant faible, signalisation	90,000	0.01	0.04	0.78%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.02	0.35%
sous-total		1,827,529	0.15	0.79	15.83%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	115,123	0.01	0.05	1.00%
	Marketing	100,000	0.01	0.04	0.87%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.02	0.43%
	Dotation vestimentaire	92,261	0.01	0.04	0.80%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.19%
	Autres charges	50,000	0.00	0.02	0.43%
sous-total		429,884	0.03	0.19	3.72%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,611,720	0.13	0.70	13.96%
	Installations fixes	600,000	0.05	0.26	5.20%
sous-total		2,211,720	0.18	0.96	19.15%
TOTAL Coût d'exploitation		**11,547,330**	**0.93**	**5.02**	**100%**

III. TVR

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,518,545	0.41	1.68	43.38%
	Maintenance	1,827,013	0.17	0.68	17.54%
	Structure	581,000	0.05	0.22	5.58%
sous-total		6,926,558	0.63	2.58	66.49%
Énergie	Véhicules	1,006,004	0.09	0.37	9.66%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.04	0.96%
sous-total		1,106,004	0.10	0.41	10.62%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	35,200	0.00	0.01	0.34%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.03	0.12	3.02%
	Ligne aérienne	120,000	0.01	0.04	1.15%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.01	0.38%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.38%
sous-total		550,200	0.05	0.20	5.28%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	134,310	0.01	0.05	1.29%
	Marketing	100,000	0.01	0.04	0.96%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.02	0.48%
	Dotation vestimentaire	103,126	0.01	0.04	0.99%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.22%
	Autres charges	50,000	0.00	0.02	0.48%
sous-total		459,936	0.04	0.17	4.42%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,074,480	0.10	0.40	10.31%
	Installations fixes	300,000	0.03	0.11	2.88%
sous-total		1,374,480	0.12	0.51	13.19%
TOTAL Coût d'exploitation		**10,417,178**	**0.94**	**3.88**	**100%**

IV. CIVIS

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,518,545	0.51	1.68	47.55%
	Maintenance	1,574,533	0.18	0.59	16.57%
	Structure	581,000	0.07	0.22	6.11%
sous-total		6,674,078	0.75	2.48	70.24%
Énergie	Véhicules	940,170	0.11	0.35	9.89%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.04	1.05%
sous-total		1,040,170	0.12	0.39	10.95%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	35,200	0.00	0.01	0.37%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.04	0.12	3.32%
	Ligne aérienne	0	0.00	0.00	0.00%
	Sous-stations	0	0.00	0.00	0.00%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.42%
sous-total		390,200	0.04	0.15	4.11%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	134,310	0.02	0.05	1.41%
	Marketing	100,000	0.01	0.04	1.05%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.02	0.53%
	Dotation vestimentaire	100,317	0.01	0.04	1.06%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.24%
	Autres charges	50,000	0.01	0.02	0.53%
sous-total		457,127	0.05	0.17	4.81%
Pièces détachées	Matériel roulant	940,170	0.11	0.35	9.89%
	Installations fixes	0	0.00	0.00	0.00%
sous-total		940,170	0.11	0.35	9.89%
TOTAL Coût d'exploitation		**9,501,745**	**1.06**	**3.54**	**100%**

V. Trolleybus

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,518,545	0.55	1.68	44.42%
	Maintenance	1,725,973	0.21	0.64	16.97%
	Structure	581,000	0.07	0.22	5.71%
sous-total		6,825,518	0.83	2.54	67.09%
Énergie	Véhicules	864,956	0.11	0.32	8.50%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.04	0.98%
sous-total		964,956	0.12	0.36	9.49%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	35,200	0.00	0.01	0.35%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.04	0.12	3.10%
	Ligne aérienne	120,000	0.01	0.04	1.18%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.01	0.39%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.39%
sous-total		550,200	0.07	0.20	5.41%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	134,310	0.02	0.05	1.32%
	Marketing	100,000	0.01	0.04	0.98%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.02	0.49%
	Dotation vestimentaire	101,161	0.01	0.04	0.99%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.22%
	Autres charges	50,000	0.01	0.02	0.49%
sous-total		457,971	0.06	0.17	4.50%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,074,480	0.13	0.40	10.56%
	Installations fixes	300,000	0.04	0.11	2.95%
sous-total		1,374,480	0.17	0.51	13.51%
TOTAL Coût d'exploitation		**10,173,126**	**1.24**	**3.79**	**100%**

VI. Autobus

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,518,545	0.51	1.68	48.34%
	Maintenance	1,555,813	0.17	0.58	16.64%
	Structure	581,000	0.07	0.22	6.21%
sous-total		6,655,358	0.75	2.48	71.19%
Énergie	Véhicules	940,170	0.11	0.35	10.06%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.04	1.07%
sous-total		1,040,170	0.12	0.39	11.13%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	35,200	0.00	0.01	0.38%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.04	0.12	3.37%
	Ligne aérienne	0	0.00	0.00	0.00%
	Sous-stations	0	0.00	0.00	0.00%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.43%
sous-total		390,200	0.04	0.15	4.17%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	134,310	0.02	0.05	1.44%
	Marketing	100,000	0.01	0.04	1.07%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.02	0.53%
	Dotation vestimentaire	99,953	0.01	0.04	1.07%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.24%
	Autres charges	50,000	0.01	0.02	0.53%
sous-total		456,763	0.05	0.17	4.89%
Pièces détachées	Matériel roulant	805,860	0.09	0.30	8.62%
	Installations fixes	0	0.00	0.00	0.00%
sous-total		805,860	0.09	0.30	8.62%
TOTAL Coût d'exploitation		**9,348,351**	**1.05**	**3.48**	**100%**

Coûts d'exploitation estimés pour le scenario 3

I. Tramway 32 m

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,976,050	0.20	1.19	33.22%
	Maintenance	2,137,864	0.08	0.51	14.27%
	Structure	581,000	0.02	0.14	3.88%
sous-total		7,694,914	0.30	1.84	51.38%
Énergie	Véhicules	1,141,808	0.04	0.27	7.62%
	Bâtiment	100,000	0.00	0.02	0.67%
sous-total		1,241,808	0.05	0.30	8.29%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	1,097,160	0.04	0.26	7.33%
	Voie	381,500	0.01	0.09	2.55%
	Stations	210,000	0.01	0.05	1.40%
	Ligne aérienne	120,000	0.00	0.03	0.80%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.01	0.27%
	Courant faible, signalisation	90,000	0.00	0.02	0.60%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.27%
sous-total		1,978,660	0.08	0.47	13.21%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	208,588	0.01	0.05	1.39%
	Marketing	100,000	0.00	0.02	0.67%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.01	0.33%
	Dotation vestimentaire	118,047	0.00	0.03	0.79%
	Collecte de fonds	15,000	0.00	0.00	0.10%
	Autres charges	50,000	0.00	0.01	0.33%
sous-total		541,634	0.02	0.13	3.62%
Pièces détachées	Matériel roulant	2,920,225	0.11	0.70	19.50%
	Installations fixes	600,000	0.02	0.14	4.01%
sous-total		3,520,225	0.14	0.84	23.50%
TOTAL Coût d'exploitation		**14,977,242**	**0.59**	**3.59**	**100%**

II. Translohr

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,976,050	0.23	1.19	33.42%
	Maintenance	2,084,584	0.10	0.50	14.00%
	Structure	581,000	0.03	0.14	3.90%
sous-total		7,641,634	0.35	1.83	51.32%
Énergie	Véhicules	1,108,225	0.05	0.27	7.44%
	Bâtiment	100,000	0.00	0.02	0.67%
sous-total		1,208,225	0.06	0.29	8.11%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	1,097,160	0.05	0.26	7.37%
	Voie	381,500	0.02	0.09	2.56%
	Stations	210,000	0.01	0.05	1.41%
	Ligne aérienne	120,000	0.01	0.03	0.81%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.01	0.27%
	Courant faible, signalisation	90,000	0.00	0.02	0.60%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.27%
sous-total		1,978,660	0.09	0.47	13.29%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	208,588	0.01	0.05	1.40%
	Marketing	100,000	0.00	0.02	0.67%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.01	0.34%
	Dotation vestimentaire	117,011	0.01	0.03	0.79%
	Collecte de fonds	15,000	0.00	0.00	0.10%
	Autres charges	50,000	0.00	0.01	0.34%
sous-total		540,598	0.02	0.13	3.63%
Pièces détachées	Matériel roulant	2,920,225	0.13	0.70	19.61%
	Installations fixes	600,000	0.03	0.14	4.03%
sous-total		3,520,225	0.16	0.84	23.64%
TOTAL Coût d'exploitation		**14,889,343**	**0.69**	**3.57**	**100%**

III. TVR

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,976,050	0.30	1.19	41.32%
	Maintenance	1,923,304	0.12	0.46	15.97%
	Structure	581,000	0.04	0.14	4.82%
sous-total		7,480,354	0.45	1.79	62.11%
Énergie	Véhicules	1,508,269	0.09	0.36	12.52%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.02	0.83%
sous-total		1,608,269	0.10	0.39	13.35%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	39,360	0.00	0.01	0.33%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	210,000	0.01	0.05	1.74%
	Ligne aérienne	120,000	0.01	0.03	1.00%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.01	0.33%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.33%
sous-total		449,360	0.03	0.11	3.73%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	208,588	0.01	0.05	1.73%
	Marketing	100,000	0.01	0.02	0.83%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.01	0.42%
	Dotation vestimentaire	113,875	0.01	0.03	0.95%
	Collecte de fonds	15,000	0.00	0.00	0.12%
	Autres charges	50,000	0.00	0.01	0.42%
sous-total		537,462	0.03	0.13	4.46%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,668,700	0.10	0.40	13.85%
	Installations fixes	300,000	0.02	0.07	2.49%
sous-total		1,968,700	0.12	0.47	16.35%
TOTAL Coût d'exploitation		**12,044,145**	**0.73**	**2.89**	**100%**

IV. CIVIS

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,976,050	0.37	1.19	44.94%
	Maintenance	1,670,824	0.12	0.40	15.09%
	Structure	581,000	0.04	0.14	5.25%
sous-total		7,227,874	0.54	1.73	65.28%
Énergie	Véhicules	1,460,113	0.11	0.35	13.19%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.02	0.90%
sous-total		1,560,113	0.12	0.37	14.09%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	39,360	0.00	0.01	0.36%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	210,000	0.02	0.05	1.90%
	Ligne aérienne	0	0.00	0.00	0.00%
	Sous-stations	0	0.00	0.00	0.00%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.36%
sous-total		289,360	0.02	0.07	2.61%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	208,588	0.02	0.05	1.88%
	Marketing	100,000	0.01	0.02	0.90%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.01	0.45%
	Dotation vestimentaire	111,065	0.01	0.03	1.00%
	Collecte de fonds	15,000	0.00	0.00	0.14%
	Autres charges	50,000	0.00	0.01	0.45%
sous-total		534,653	0.04	0.13	4.83%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,460,113	0.11	0.35	13.19%
	Installations fixes	0	0.00	0.00	0.00%
sous-total		1,460,113	0.11	0.35	13.19%
TOTAL Coût d'exploitation		**11,072,112**	**0.83**	**2.65**	**100%**

V. Trolleybus

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,976,050	0.37	1.19	42.20%
	Maintenance	1,836,664	0.14	0.44	15.58%
	Structure	581,000	0.04	0.14	4.93%
sous-total		7,393,714	0.55	1.77	62.71%
Énergie	Véhicules	1,343,304	0.10	0.32	11.39%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.02	0.85%
sous-total		1,443,304	0.11	0.35	12.24%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	39,360	0.00	0.01	0.33%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	210,000	0.02	0.05	1.78%
	Ligne aérienne	120,000	0.01	0.03	1.02%
	Sous-stations	40,000	0.00	0.01	0.34%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.34%
sous-total		449,360	0.03	0.11	3.81%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	208,588	0.02	0.05	1.77%
	Marketing	100,000	0.01	0.02	0.85%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.01	0.42%
	Dotation vestimentaire	112,190	0.01	0.03	0.95%
	Collecte de fonds	15,000	0.00	0.00	0.13%
	Autres charges	50,000	0.00	0.01	0.42%
sous-total		535,778	0.04	0.13	4.54%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,668,700	0.12	0.40	14.15%
	Installations fixes	300,000	0.02	0.07	2.54%
sous-total		1,968,700	0.15	0.47	16.70%
TOTAL Coût d'exploitation		**11,790,855**	**0.88**	**2.83**	**100%**

VI. Autobus

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	4,976,050	0.37	1.19	45.89%
	Maintenance	1,652,104	0.12	0.40	15.23%
	Structure	581,000	0.04	0.14	5.36%
sous-total		7,209,154	0.54	1.73	66.48%
Énergie	Véhicules	1,460,113	0.11	0.35	13.46%
	Bâtiment	100,000	0.01	0.02	0.92%
sous-total		1,560,113	0.12	0.37	14.39%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	39,360	0.00	0.01	0.36%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	210,000	0.02	0.05	1.94%
	Ligne aérienne	0	0.00	0.00	0.00%
	Sous-stations	0	0.00	0.00	0.00%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.00	0.01	0.37%
sous-total		289,360	0.02	0.07	2.67%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	208,588	0.02	0.05	1.92%
	Marketing	100,000	0.01	0.02	0.92%
	Gardiennage	50,000	0.00	0.01	0.46%
	Dotation vestimentaire	110,701	0.01	0.03	1.02%
	Collecte de fonds	15,000	0.00	0.00	0.14%
	Autres charges	50,000	0.00	0.01	0.46%
sous-total		534,289	0.04	0.13	4.93%
Pièces détachées	Matériel roulant	1,251,525	0.09	0.30	11.54%
	Installations fixes	0	0.00	0.00	0.00%
sous-total		1,251,525	0.09	0.30	11.54%
TOTAL Coût d'exploitation		**10,844,441**	**0.81**	**2.60**	**100%**

Coûts d'exploitation estimés pour le scenario 4

I. Tramway 32 m

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	1,808,704	0.35	2.24	26.85%
	Maintenance	1,277,944	0.25	1.59	18.97%
	Structure	581,000	0.11	0.72	8.63%
sous-total		3,667,648	0.72	4.55	54.45%
Énergie	Véhicules	220,564	0.04	0.27	3.27%
	Bâtiment	100,000	0.02	0.12	1.48%
sous-total		320,564	0.06	0.40	4.76%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	294,360	0.06	0.37	4.37%
	Voie	381,500	0.07	0.47	5.66%
	Stations	315,000	0.06	0.39	4.68%
	Ligne aérienne	120,000	0.02	0.15	1.78%
	Sous-stations	40,000	0.01	0.05	0.59%
	Courant faible, signalisation	90,000	0.02	0.11	1.34%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.01	0.05	0.59%
sous-total		1,280,860	0.25	1.59	19.02%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	40,293	0.01	0.05	0.60%
	Marketing	100,000	0.02	0.12	1.48%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.06	0.74%
	Dotation vestimentaire	39,874	0.01	0.05	0.59%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.03	0.33%
	Autres charges	50,000	0.01	0.06	0.74%
sous-total		302,667	0.06	0.38	4.49%
Pièces détachées	Matériel roulant	564,102	0.11	0.70	8.37%
	Installations fixes	600,000	0.12	0.74	8.91%
sous-total		1,164,102	0.23	1.44	17.28%
TOTAL Coût d'exploitation		**6,735,842**	**1.32**	**8.36**	**100%**

II. Translohr

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2,099,044	0.39	2.08	28.63%
	Maintenance	1,304,810	0.24	1.30	17.80%
	Structure	581,000	0.11	0.58	7.93%
sous-total		3,984,854	0.73	3.96	54.36%
Énergie	Véhicules	267,596	0.05	0.27	3.65%
	Bâtiment	100,000	0.02	0.10	1.36%
sous-total		367,596	0.07	0.36	5.01%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	367,950	0.07	0.37	5.02%
	Voie	381,500	0.07	0.38	5.20%
	Stations	315,000	0.06	0.31	4.30%
	Ligne aérienne	120,000	0.02	0.12	1.64%
	Sous-stations	40,000	0.01	0.04	0.55%
	Courant faible, signalisation	90,000	0.02	0.09	1.23%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.01	0.04	0.55%
sous-total		1,354,450	0.25	1.34	18.48%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	50,366	0.01	0.05	0.69%
	Marketing	100,000	0.02	0.10	1.36%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.05	0.68%
	Dotation vestimentaire	46,030	0.01	0.05	0.63%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.02	0.31%
	Autres charges	50,000	0.01	0.05	0.68%
sous-total		318,896	0.06	0.32	4.35%
Pièces détachées	Matériel roulant	705,128	0.13	0.70	9.62%
	Installations fixes	600,000	0.11	0.60	8.18%
sous-total		1,305,128	0.24	1.30	17.80%
TOTAL Coût d'exploitation		**7,330,924**	**1.35**	**7.28**	**100%**

III. TVR

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2,582,944	0.47	1.92	37.49%
	Maintenance	1,358,707	0.25	1.01	19.72%
	Structure	581,000	0.11	0.43	8.43%
sous-total		4,522,651	0.82	3.37	65.64%
Énergie	Véhicules	551,902	0.10	0.41	8.01%
	Bâtiment	100,000	0.02	0.07	1.45%
sous-total		651,902	0.12	0.49	9.46%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	17,600	0.00	0.01	0.26%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.06	0.23	4.57%
	Ligne aérienne	120,000	0.02	0.09	1.74%
	Sous-stations	40,000	0.01	0.03	0.58%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.01	0.03	0.58%
sous-total		532,600	0.10	0.40	7.73%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	67,155	0.01	0.05	0.97%
	Marketing	100,000	0.02	0.07	1.45%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.04	0.73%
	Dotation vestimentaire	56,466	0.01	0.04	0.82%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.02	0.33%
	Autres charges	50,000	0.01	0.04	0.73%
sous-total		346,121	0.06	0.26	5.02%
Pièces détachées	Matériel roulant	537,240	0.10	0.40	7.80%
	Installations fixes	300,000	0.05	0.22	4.35%
sous-total		837,240	0.15	0.62	12.15%
TOTAL Coût d'exploitation		**6,890,514**	**1.25**	**5.13**	**100%**

IV. CIVIS

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2,970,064	0.55	1.84	44.19%
	Maintenance	1,199,888	0.22	0.74	17.85%
	Structure	581,000	0.11	0.36	8.64%
sous-total		4,750,952	0.89	2.95	70.68%
Énergie	Véhicules	564,102	0.11	0.35	8.39%
	Bâtiment	100,000	0.02	0.06	1.49%
sous-total		664,102	0.12	0.41	9.88%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	21,120	0.00	0.01	0.31%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.06	0.20	4.69%
	Ligne aérienne	0	0.00	0.00	0.00%
	Sous-stations	0	0.00	0.00	0.00%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.01	0.02	0.60%
sous-total		376,120	0.07	0.23	5.60%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	80,586	0.02	0.05	1.20%
	Marketing	100,000	0.02	0.06	1.49%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.03	0.74%
	Dotation vestimentaire	62,989	0.01	0.04	0.94%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.33%
	Autres charges	50,000	0.01	0.03	0.74%
sous-total		366,075	0.07	0.23	5.45%
Pièces détachées	Matériel roulant	564,102	0.11	0.35	8.39%
	Installations fixes	0	0.00	0.00	0.00%
sous-total		564,102	0.11	0.35	8.39%
TOTAL Coût d'exploitation		**6,721,351**	**1.25**	**4.17**	**100%**

V. Trolleybus

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2,970,064	0.55	1.84	40.30%
	Maintenance	1,351,328	0.25	0.84	18.34%
	Structure	581,000	0.11	0.36	7.88%
sous-total		4,902,392	0.91	3.04	66.53%
Énergie	Véhicules	518,974	0.10	0.32	7.04%
	Bâtiment	100,000	0.02	0.06	1.36%
sous-total		618,974	0.12	0.38	8.40%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	21,120	0.00	0.01	0.29%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.06	0.20	4.27%
	Ligne aérienne	120,000	0.02	0.07	1.63%
	Sous-stations	40,000	0.01	0.02	0.54%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.01	0.02	0.54%
sous-total		536,120	0.10	0.33	7.28%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	80,586	0.02	0.05	1.09%
	Marketing	100,000	0.02	0.06	1.36%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.03	0.68%
	Dotation vestimentaire	63,834	0.01	0.04	0.87%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.31%
	Autres charges	50,000	0.01	0.03	0.68%
sous-total		366,920	0.07	0.23	4.98%
Pièces détachées	Matériel roulant	644,688	0.12	0.40	8.75%
	Installations fixes	300,000	0.06	0.19	4.07%
sous-total		944,688	0.18	0.59	12.82%
TOTAL Coût d'exploitation		**7,369,094**	**1.38**	**4.57**	**100%**

VI. Autobus

Poste de dépense		€	€/voyageurs	€/km	%
Personnel	Exploitation	2,970,064	0.55	1.84	44.85%
	Maintenance	1,181,168	0.22	0.73	17.84%
	Structure	581,000	0.11	0.36	8.77%
sous-total		4,732,232	0.88	2.94	71.47%
Énergie	Véhicules	564,102	0.11	0.35	8.52%
	Bâtiment	100,000	0.02	0.06	1.51%
sous-total		664,102	0.12	0.41	10.03%
Entretien sous-traitance	Matériel roulant	21,120	0.00	0.01	0.32%
	Voie	0	0.00	0.00	0.00%
	Stations	315,000	0.06	0.20	4.76%
	Ligne aérienne	0	0.00	0.00	0.00%
	Sous-stations	0	0.00	0.00	0.00%
	Courant faible, signalisation	0	0.00	0.00	0.00%
	Bâtiments-espaces verts	40,000	0.01	0.02	0.60%
sous-total		376,120	0.07	0.23	5.68%
Autres achats et services extérieurs	Assurance	80,586	0.02	0.05	1.22%
	Marketing	100,000	0.02	0.06	1.51%
	Gardiennage	50,000	0.01	0.03	0.76%
	Dotation vestimentaire	62,625	0.01	0.04	0.95%
	Collecte de fonds	22,500	0.00	0.01	0.34%
	Autres charges	50,000	0.01	0.03	0.76%
sous-total		365,711	0.07	0.23	5.52%
Pièces détachées	Matériel roulant	483,516	0.09	0.30	7.30%
	Installations fixes	0	0.00	0.00	0.00%
sous-total		483,516	0.09	0.30	7.30%
TOTAL Coût d'exploitation		**6,621,681**	**1.24**	**4.11**	**100%**