

2908

JM/DC n° 0119 E

COMPARAISON DES COUTS D'INVESTISSEMENT EN MATERIEL ROULANT ET EN GENIE CIVIL ENTRE LES SOLUTIONS MP 89 ET VAL 206

1. OBJET

Un des points clés du projet de Schéma Directeur de la Région Ile de France est constitué par le réseau ORBITALE, destiné à revitaliser la proche couronne.

Ce réseau comprend pour l'essentiel :

- un nouveau métro construit en boucle et destiné à irriguer le pourtour de Paris,
- des antennes réalisées en métro automatique et reliant des pôles de développement plus éloignés.

Le maillage de ce réseau sera assuré par des correspondances avec les lignes radiales existantes (METRO et réseau à grand gabarit) et à venir (prolongements de lignes de METRO).

L'attractivité de la rocade ORBITALE et de ses antennes sera assurée par l'utilisation de rames de métro courtes, circulant à intervalle rapproché et à vitesse commerciale élevée.

Il est clair que le matériel roulant devra utiliser le roulement sur pneumatiques, pour des raisons de confort et de performances dynamiques.

Par contre il convient d'examiner les répercussions sur les coûts d'investissement en fonction du choix qu'il semble aujourd'hui raisonnable d'envisager :

- le matériel MP89 au gabarit METRO c'est à dire correspondant à une largeur de 2,46 m,
- le matériel VAL 206 ou VAL 208 à petit gabarit c'est à dire correspondant à une largeur de 2,06 m.

Tel est l'objet de la présente note.

2. PRINCIPE DE LA METHODE DE COMPARAISON

Les deux hypothèses de gabarit se traduisent par des caractéristiques différentes de dimensions des ouvrages en ligne et en station. La comparaison de coût, dans le cadre de cette note est limitée au génie civil (gros oeuvre du tunnel et des stations) et au matériel roulant, l'ensemble de ces deux postes de dépenses représentant environ 60 % du montant total de l'investissement mobilisé pour la réalisation d'une nouvelle ligne de métro.

Les différences de coût afférentes aux autres postes de dépenses sont soit marginales - et elles peuvent être alors négligées en première analyse - soit imprévisibles à l'échéance de 5 à 10 ans.

Peuvent être considérées comme marginales : les différences de coût concernant les travaux de déviation de concessionnaires, le gros oeuvre des ouvrages en ligne (puits de ventilation, accès pompiers, ...), le second oeuvre des stations, la voie et les équipements en ligne et en station non liés aux automatismes de conduite ainsi que les ateliers et les acquisitions foncières. En effet, quel que soit le gabarit, les caractéristiques des lignes sont sensiblement les mêmes en termes de ventilation, d'épuisement, de sécurité incendie, d'alimentation et de distribution d'énergie de traction et d'équipements des stations (appareils électromécaniques, péages, distribution des billets...).

S'agissant des équipements fixes liés aux automatismes de conduite (y compris les portes palières et le PCC), le système qui sera utilisé à partir de l'horizon 2003 (date de mise en service possible de la première section du réseau ORBITALE) n'a pas de raison de différer notamment selon le gabarit du matériel roulant, dès lors que les spécifications en matière de sécurité ferroviaire et de programme d'exploitation seraient identiques. Le coût de ces systèmes dépendra plutôt des conditions de concurrence entre les entreprises concevant et réalisant les automatismes de conduite et aucun pronostic ne peut être avancé quant aux montants respectifs de ce poste de dépense pour les deux hypothèses de matériel roulant.

3. REPERCUSSION DU TYPE DE MATERIEL ROULANT SUR LES COUTS D'INVESTISSEMENTS.

Intuitivement les différences entre les deux types de matériel ont les répercussions suivantes sur les coûts d'investissement.

Le VAL étant plus étroit que le MP 89 :

- le tunnel courant l'est également et donc son coût kilométrique est plus faible,
- le nombre de trains VAL nécessaire est plus important et la longueur de chaque train est plus grande, pour une capacité globale identique, et donc :
 - les stations pour MP 89 sont moins coûteuses car plus courtes,
 - l'investissement en matériel roulant est plus élevé dans le cas de l'option VAL (matériel moins capacitaire).

Les paragraphes qui suivent formalisent ces différences :

3.1 Coût du tunnel courant

L'écart de coût kilométrique entre deux tunnels MP 89 et VAL 206 est déterminé en annexe 1.

C'est une constante que nous appellerons K.

3.2 Coût des stations

En première approximation le coût d'une station est estimé à (cf annexe 2) :

$$\begin{array}{ll} Cf + \alpha l & \text{pour le VAL 206} \\ Cf + \beta \alpha l & \text{pour le MP 89} \end{array}$$

où Cf est un coût fixe

l la longueur de la station (qui sera considérée comme égale à la longueur des trains)

α un coefficient de proportionnalité en MF / m

β un coefficient tenant compte de la surlargeur du MP 89 par rapport au VAL 206.

L'écart de coût entre l'option MP 89 et l'option VAL est donc, pour une station :

$$\Delta_{MP\ 89-VAL} = \alpha (\beta l_2 - l_1)$$

avec l_2 = longueur des trains MP 89

l_1 = longueur des trains VAL

Si l'interstation moyenne est égale à λ , il y a $1 / \lambda$ station au kilomètre et l'écart de coût kilométrique vaut :

$$\Delta_{MP\ 89-VAL} = \frac{\alpha}{\lambda} (\beta l_2 - l_1)$$

3.3 Coût du matériel roulant

Le coût par kilomètre de ligne du matériel roulant nécessaire est donné par :

$$\frac{2,3 Q}{V} \times \frac{Cu}{c} \quad (\text{en MF})$$

où :

Q : est le débit horaire de la ligne en voy / h,

V : est la vitesse commerciale de la ligne en km / h,

Cu : est le coût linéique du matériel roulant (rapport entre le coût d'une rame et la longueur d'une rame) en MF / m,

c : est la capacité linéique du matériel roulant (rapport entre le nombre de voyageurs contenus dans une rame et la longueur de la rame) en voy / m.

NOTA : Cette formule est démontrée en annexe 3.

L'écart de coût kilométrique entre les deux options est donc de:

$$\frac{2,3 Q}{V} \left(\frac{C_{u2}}{c_2} - \frac{C_{u1}}{c_1} \right) \quad (\text{en MF})$$

Par ailleurs, le matériel roulant devant être renouvelé au bout de 30 ans (alors que le génie civil est réalisé pour au moins 1 siècle) l'écart de coût kilométrique devient :

$$(1 + A) \times \frac{2,3 Q}{V} \left(\frac{C_{u2}}{c_2} - \frac{C_{u1}}{c_1} \right) \quad (\text{en MF})$$

avec $A = (1 + a)^{-30}$ $a = \text{taux d'actualisation}$

NOTA : l'influence du renouvellement à 60 ans peut être considéré comme négligeable.

3.4 Synthèse des écarts de coûts kilométriques

| | VAL | MP 89 |
|------------------|--|--|
| Tunnel | | K |
| Station | $\frac{1}{\lambda} (C_f + \alpha I_1)$ | $\frac{1}{\lambda} (C_f + \alpha \beta I_2)$ |
| Matériel Roulant | $(1 + A) \frac{2,3 Q}{V} \frac{C_{u1}}{c_1}$ | $(1 + A) \frac{2,3 Q}{V} \frac{C_{u2}}{c_2}$ |

L'écart de coût kilométrique entre l'option MP 89 et l'option VAL s'établit alors ainsi :

$$\Delta_{MP\ 89-VAL} = K + \frac{\alpha}{\lambda} (\beta I_2 - I_1) + (1 + A) \frac{2,3 Q}{V} \times \left(\frac{C_{u2}}{c_2} - \frac{C_{u1}}{c_1} \right)$$

$$\Delta_{MP\ 89-VAL} = K + \frac{\alpha}{\lambda} (\beta l_2 - l_1) + (1 + A) \frac{2,3 Q}{V} \times \left(\frac{C_{U2}}{c_2} - \frac{C_{U1}}{c_1} \right)$$

| | | | | |
|------|-----------------------|---|--|----------------------|
| avec | K | = | écart de coût Génie Civil tunnel par km | en MF / km |
| | α | = | coefficient Génie Civil station | en MF / m |
| | β | = | coefficient de surlargeur du MP 89 | sans dimension |
| | Q | = | débit horaire | en voyageurs / heure |
| | V | = | vitesse commerciale | en km / h |
| | λ | = | longueur moyenne des interstations | en km |
| | C_U | = | coût linéique | en MF / m |
| | c | = | capacité linéique | en voyageurs / m |
| | A | = | $(1 + a)^{-30}$ où a est le taux d'actualisation | sans dimension |
| | $\Delta_{MP\ 89-VAL}$ | | | en MF |

4. DONNEES NUMERIQUES

4.1 Coût du tunnel courant (coefficient K)

L'annexe 1 donne une valeur de :

$$K = 10 \text{ MF / km} \quad (\text{HT, CE 01-1993})$$

4.2 Coût des stations

L'annexe 2 donne pour α et β les valeurs suivantes :

$$\alpha = 0,962 \text{ MF / m} \quad (\text{HT, CE 01-1993})$$

$$\beta = 1,039$$

4.3 Coût du matériel roulant

4.3.1 Matériel MP 89

Le coût, fourni par la RATP, s'établit ainsi :

| | | | |
|---------------------|-------|---------|------------------|
| coût d'une motrice | MP 89 | 6,15 MF | (HT, CE 01-1993) |
| coût d'une remorque | MP 89 | 4,50 MF | (d°) |

Le coût moyen d'une voiture MP 89 dépend donc du taux de motorisation (rapport entre le nombre de motrices et le nombre total de voitures) retenu.

Toutefois, une configuration à 30 m étant envisagée, nous avons supposé que celle-ci était réalisée avec deux motrices MP 89. De ce fait le coût moyen d'une voiture MP 89 sera pris égal à 6,15 MF et constitue ainsi un maximum.

Le coût linéique correspondant s'établit alors à :

$$Cu_2 = 6,15 / 15 = 0,410 \text{ MF / m} \quad (\text{HT, CE 01-1993}).$$

4.3.2 Matériel VAL 206

Le coût pris en compte est celui annoncé dans la presse, notamment pour le métro de Toulouse, soit 15 MF pour un doublet de 26 m. C'est également la valeur prise en compte dans l'étude IAURIF / SETEC - TPI de faisabilité technique et économique du tronçon Aubervilliers - Vincennes du réseau ORBITALE.

Le coût linéique s'établit alors à :

$$Cu_1 = 15 / 26 = 0,577 \text{ MF / m} \quad (\text{HT, CE 01-1993})$$

4.3.3 Remarque sur les effets de série

Les coûts mentionnés dans les paragraphes 4.3.1 et 4.3.2 ont été établis sur la base des coûts actuels relatifs aux commandes récentes ou à venir.

Il faut noter incidemment qu'il existera pour le matériel MP 89 un effet de série important dans le cadre des commandes de matériel METRO de la RATP (environ 800 MF par an dans les années à venir).

4.4 Capacité du matériel roulant

4.4.1 Matériel MP 89

La capacité prise en compte est celle annoncée dans une monographie de la RATP relative à ce matériel (version Système Automatique d'Exploitation des Trains) :

Capacité de 708 voyageurs dont 144 assis sur la base d'un taux de charge de 4 voy / m² et pour une rame de 6 voitures.

Cela donne la loi de variation suivante :

$$C = 24 + 23,5 \times t \quad (\text{voyageurs / voiture})$$

où C est la capacité d'une voiture
 t est le taux de charge en voy / m²

et donc C = 94 voy / voiture pour t = 3 voy / m²
 C = 118 voy / voiture pour t = 4 voy / m²

Les capacités linéiques s'établissent alors à :

$$\begin{aligned} C_2 &= 6,30 \text{ voy / m sur la base de 3 voy debout / m}^2 \\ C_2 &= 7,87 \text{ voy / m sur la base de 4 voy debout / m}^2 \end{aligned}$$

NOTA :

Ces capacités sont légèrement supérieures si l'on admet que des voyageurs stationnent dans les dispositifs d'intercirculation.

4.4.2 Matériel VAL 206

La capacité prise en compte est celle annoncée dans la note MATRA référence SSEI / I.884.93 / FB / SB du 8 juin 1993 qui nous a été transmise par l'IAURIF le 28 juin 1993 et relative à du matériel roulant de "nouvelle génération".

La loi de variation qui peut se déduire des données de la note précitée est :

$$C = 46 + t \times 28 \text{ voyageurs pour une rame de } 26 \text{ m}$$

où C est la capacité de la rame

t est le taux de charge en voy / m².

Et donc nous obtenons les capacités linéiques suivantes :

$$Cu_1 = 130/26 = 5,00 \text{ voy / m sur la base de } 3 \text{ voy debout / m}^2$$

$$Cu_1 = 158/26 = 6,08 \text{ voy / m sur la base de } 4 \text{ voy debout / m}^2$$

4.5 Vitesse commerciale

Nous prendrons une vitesse commerciale de 40 km / h. Elle peut être identique pour le VAL ou le MP 89 dès lors que nous avons fait l'hypothèse, pour les calculs, que le MP 89 était à adhérence totale (cf § 4.3.1).

5. CALCUL DU DEBIT A PARTIR DUQUEL L'INVESTISSEMENT KILOMETRIQUE EST PLUS FAIBLE DANS L'OPTION MP 89

A partir de la formule établie au § 3.4 et en fonction des données précitées, la valeur du débit Q à partir de laquelle $\Delta_{MP89 - VAL}$ devient négatif est calculée.

Ces valeurs figurent dans les tableaux des annexes 4 (3 voy / m²) et 5 (4 voy / m²).

La manière d'analyser les tableaux figure également dans les annexes 4 et 5.

La conclusion est à chaque fois identique : le VAL 206 n'est économiquement justifié qu'en version 26 m et pour des débits inférieurs à environ :

- 4700 voy / h sur la base de 3 voy debout / m²,
- 5500 voy / h sur la base de 4 voy debout / m².

6. TESTS DE SENSIBILITE

L'exercice qui précède a été réalisé notamment sur la base d'estimations relatives au génie civil des stations et du tunnel. Ces estimations ont été déterminées à partir d'études récentes (VULCAIN et ORBITALE / Aubervilliers - Vincennes).

Il convient de reconnaître que :

- d'une part, les coefficients K et α , utilisés dans les formules, ont été déterminés avec une part d'incertitude plus importante que celle concernant les coûts du matériel roulant,
- d'autre part, l'élasticité de la valeur du débit Q , correspondant au seuil de rentabilité du VAL, est forte aux variations de K et α .

Cela remet-il en cause les conclusions du § 5 ?

Supposons que les valeurs retenues ($K = 10$ MF / km et $\alpha = 0,962$ MF / m) soient défavorables, toutes les deux, au cas du matériel VAL c'est à dire que :

- l'écart de coût kilométrique du tunnel K a été sous-estimé,
- l'écart de coût d'une station en fonction de la longueur des trains a été surestimé.

Effectuons alors un nouveau calcul en faisant varier K du simple au double et α du simple à la moitié :

$$\begin{aligned} \text{soit : } K &= 20 \text{ MF / km} \\ \alpha &= 0,5 \text{ MF / m} \end{aligned}$$

Les valeurs trouvées figurent dans les tableaux des annexes 6 (3 voy / m²) et 7 (4 voy / m²).

On constate que, bien que les valeurs de seuil de Q augmentent fortement, les conclusions restent identiques : le VAL n'est économiquement justifié qu'en version 26 m.

7. CONCLUSION GENERALE

L'analyse précédemment réalisée montre que le VAL n'est économiquement justifié qu'en version 26 m.

Dès lors que les débits à écouler conduisent à envisager une longueur supérieure pour le VAL, le MP 89 est préférable.

Cette conclusion reste valable même si les coefficients liés au Génie Civil K et α varient dans de fortes proportions.

ANNEXE 1

**ECART DE COUT KILOMETRIQUE ENTRE
DEUX TUNNELS DE DIAMETRES DIFFERENTS**

**ECART DE COUT KILOMETRIQUE
ENTRE DEUX TUNNELS DE DIAMETRES DIFFERENTS**

Nous avons pris comme source les coûts indiqués pour plusieurs diamètres intérieurs de tunnel, mentionnés dans l'annexe au rapport de l'étude "VULCAIN" Voie Unique pour Ligne Complémentaire à Automatisme Intégral (rapport INRETS, METRAM, CETU de février 1992).

Pour des tunnels forés au tunnelier du type à front pressurisé, le rapport établit un coût du tunnel égal à

$$T_f + T_p \times l$$

où T_f est un terme fixe en MF

T_p un terme proportionnel en MF / km

Les valeurs mentionnées dans le § IV.4 de l'annexe 3 au rapport sont les suivantes :

| Diamètre intérieur (m) | 4,65 | 5,15 | 5,30 | 6,80 | 7,80 | 8,35 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| T_f MF | 46 | 49 | 51 | 60 | 68 | 72 |
| T_p MF / km | 39 | 43 | 44 | 64 | 74 | 84 |

T_f comprend : . la mise à disposition du matériel d'excavation,
. l'amenée et le montage sur le site,
. le repli du matériel.

T_p comprend : . l'excavation
. la bentonite
. les voussoirs
. l'injection bourrage
. le béton de rechargement
. du divers

1°) Loi de variation de T_f en fonction du diamètre D

Un calcul de régression logarithmique donne :

$$T_f = AD^B$$

avec A = 14,2
 B = 0,76

Le coefficient de corrélation étant de 0,998 on écrira donc :

$$T_f = 14,2 D^{0,76}$$

Nota : l'erreur relative entre T_f calculé et T_f INRETS n'excède pas 2 %.

2°) Loi de variation de Tp en fonction du diamètre D

D'une manière générale le coût d'un tunnel comprend essentiellement :

- d'une part un terme proportionnel au volume excavé,
- d'autre part un terme proportionnel à la surface de l'enveloppe du volume excavé (voussoirs, béton,...).

Ainsi, le coût kilométrique Tp est proportionnel :

- d'une part à la section du tunnel et donc à D^2 ,
- d'autre part au périmètre du tunnel et donc à D :

$$Tp = AD^2 + BD, \quad \text{soit :}$$

$$\frac{Tp}{D} = AD + B$$

Un calcul de régression donne alors in fine :

$$A = 0,474$$

$$B = 5,99$$

Le coefficient de corrélation étant de 0,97.

La loi de variation de Tp en fonction de D s'établit alors comme suit :

$$Tp = 0,474 D^2 + 5,99 D \quad (\text{MF / km})$$

Nota : l'erreur relative entre Tp calculé et Tp INRETS n'excède pas 2 %.

COMPARAISON ECONOMIQUE DES TUNNELS COURANTS

| | | | | VAL | MP 89 | | |
|-----------------------|-------------|------|------|------|-------|------|------|
| DIAMETRE INTERIEUR(m) | 4,65 | 5,15 | 5,30 | 6,80 | 7,50 | 7,80 | 8,35 |
| Tf rapport (MF) | 46 | 49 | 51 | 60 | | 68 | 72 |
| Tf calculé (MF) | 45,7 | 49,3 | 50,4 | 61,0 | 65,7 | 67,7 | 71,2 |
| ERREUR RELATIVE | -1% | 1% | -1% | 2% | | -1% | -1% |
| Tp rapport (MF) | 39 | 43 | 44 | 64 | | 74 | 84 |
| Tp calculé (MF) | 38,1 | 43,4 | 45,1 | 62,6 | 71,6 | 75,6 | 83,1 |
| ERREUR RELATIVE | -2% | 1% | 2% | -2% | | 2% | -1% |
| rapport | Tp + Tf / 5 | 48,2 | 52,8 | 54,2 | 76 | 87,6 | 98,4 |
| calcul | Tp + Tf / 5 | 47,2 | 53,3 | 55,1 | 74,8 | 84,7 | 89,1 |
| | | | | | | | |

3°) Ecart du coût kilométrique entre les tunnels VAL et MP 89.

$$Tp\text{ MP89} - Tp\text{VAL} = 71,6 - 62,6 = 9 \text{ MF / km}$$

Par ailleurs, T_f est un coût fixe "d'ouverture du chantier". Pour le ramener à un coût kilométrique on supposera que l'on engage pas le chantier pour une longueur inférieure à 5 km.

Cela donne donc un écart de coût kilométrique MP89 - VAL égal à :

$$\frac{T_f\text{MP89} - T_f\text{VAL}}{5} \sim \frac{65,7 - 61}{5} = 0,94 \text{ MF / km}$$

L'écart de coût kilométrique entre les deux solutions MP89 ou VAL (coefficient K) est donc de :

$$K = 9,94 \text{ MF / km} \quad (\text{CE 01-1991}).$$

L'actualisation aux conditions économiques de 01-1993 conduit, en utilisant l'index TP 05 (travaux souterrains) à la valeur de K suivante :

$$K = 9,67 \times 1,028 = 10,2 \text{ MF / km}$$

Nous prendrons $K \sim 10 \text{ MF / km}$ pour la suite des calculs.

| | TYPE | MODELE | Ø FORE | AVANCEMENT | TERRAIN | COUVERTURE |
|---|------------------|------------------------------------|--------|---------------------------|---|----------------------------|
| Métro de Lille Ligne 1 bis lot 8 : 988,2m | Fermé | Bouclier hydraulique à boue légère | 7,65m | 10m / jour | craie sous nappe | 4,5 à 13m |
| Emissaire de Bagnoli Naples : 2600m | mécanique ouvert | | 6,49m | 11,2m / jour (5cm/min) | sable peu compact avec gravier pas d'eau | 7 à 20m |
| Emissaire de Liverpool 2300m | mécanique | Pression de boue | 3,24m | 4 à 5cm / min. | Grès tendre + grès altérés + silts + blocs durs | 8 à 10m |
| Métro de Shanghai 17,5 x 2 = 35 km | EPBS | Pression de terre | 6,32m | 5cm / min. | argile sableuse + limon + sable argileux | 5 à 17m |
| Collecteur ST Maur Créteil | Fermé | Pression de boue | 3,35m | | sable + graviers dans l'eau | 5 à 8 m |
| Collecteur Créteil Valenton | Fermé | Pression de boue | 3,35m | 6cm / min. | sable + graviers + blocs résistants dans l'eau + marnes | 7 à 11m |
| Métro de Toulouse | Fermé | Bouclier hydraulique à boue légère | 7,65m | | Molasse | 5 à 18m |
| Métro de Lyon Ligne D 2 x 1250 = 2500m | Fermé | Pression de boue | 6,50m | 2,4m /h (4cm/min.) | Alluvions | (traversées sous fluviale) |
| Métro de Lille Ligne 1 bis Lot 3 : 3259m | Fermé | Pression de boue | 7,70m | 8,4 à 14,4 m/jour | Silt + sables argileux sous nappe | |
| TGV Atlantique 2 tunnels de Villjust Voie 1 : 4805m Voie 2 : 4798m | Fermé | Pression de boue bentonitique | 9,25m | 7,03 à 15,34m/jour | Sable de Fontainebleau | 20 à 40m |

RAPPORT VULCAIN

Exemples de tunneliers utilisés

ANNEXE 2

**COUT DES STATIONS EN FONCTION
DE LA LONGUEUR DES TRAINS**

**COUT DES STATIONS EN FONCTION
DE LA LONGUEUR DES TRAINS**

Nous avons pris comme source l'étude IAURIF de faisabilité technique et économique du tronçon Aubervilliers - Vincennes du réseau ORBITALE, réalisée par le bureau d'études SETEC - TPI.

1°) Principe

Les estimations des stations sont réalisées dans l'étude IAURIF en supposant que le coût d'une station est proportionnel au volume excavé et donc, à section constante, proportionnel à la longueur d'une station.

Pour les stations de correspondance, le volume excavé est plus important, et des coûts fixes sont ajoutés.

En faisant l'hypothèse que les coûts liés à l'aménagement des salles d'échange et des correspondances ne dépendent que des flux à écouler (et donc ne dépendent pas de la longueur des stations), le coût du gros oeuvre d'une station est de la forme :

$$Cf + \alpha \times l \quad (\text{en MF})$$

où Cf est un coût fixe

α un coefficient de proportionnalité en MF / m

 l la longueur de la station en m.

Par ailleurs, le matériel MP 89 étant plus large de 0,40 m que le matériel VAL 206, la section de la station est plus importante, ce qui se traduit dans le cas du MP 89 par un coût de :

$$Cf + \beta \times \alpha \times l$$

où β est un coefficient tenant compte de la surlargeur du MP 89 par rapport au VAL.

2°) Valeurs numériques

2.1 Coefficient α

Nous avons pris en considération le coût d'une station à trafic moyen (qui correspond à un volume excavé de 25 000 m³), soit 50 MF pour 52 m. Ce coût ne comprend pas la partie "adaptation station existante - correspondance" et correspond donc à la valeur de $\alpha \times l$, ce qui donne :

$$\alpha = 50/52 = 0,962 \text{ MF / m} \quad (\text{HT, CE 01-1993})$$

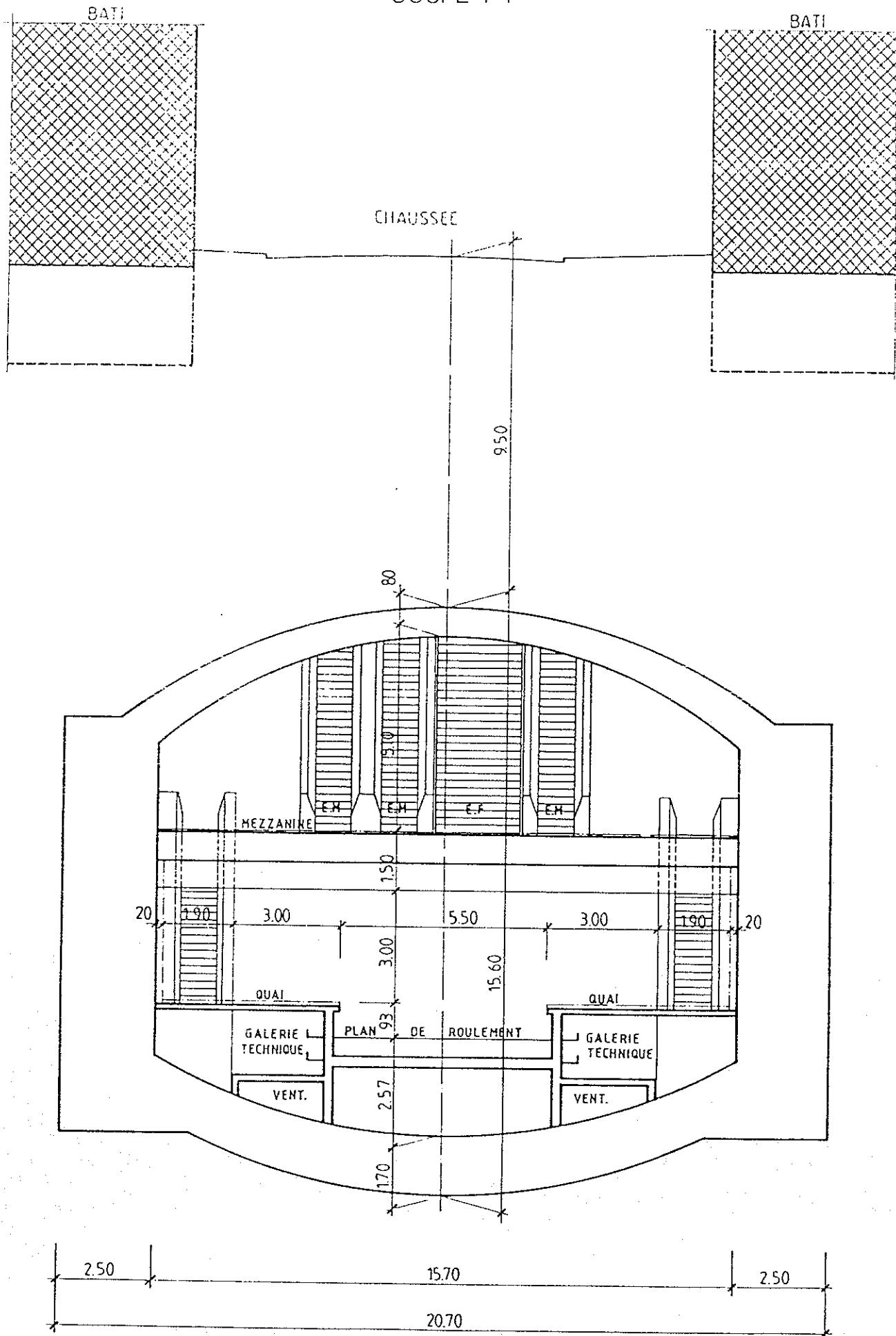
2.2 Coefficient β

La surlargeur de 0,80 m (2 x 0,40 m) des stations MP 89 est à rapporter à la largeur de 20,70 m de la section excavée (Cf coupe-type) ce qui donne :

$$\beta = \frac{20,70 + 0,80}{20,70} = 1,039$$

STATION POUR RAMES DE 52.00m
REALISEE EN SOUTERRAIN
SOLUTION 2
COUPE 1-1

18



ANNEXE 3

**CALCUL DU COUT DU MATERIEL ROULANT
PAR KM DE LIGNE**

**COUT PAR KM DE LIGNE
DU MATERIEL ROULANT**

L'intervalle de succession entre les trains, i , est donné par :

$$i = 3600 \frac{q}{Q} \quad \begin{array}{l} q = \text{capacité horaire de la ligne (débit)} \\ q = \text{capacité d'un train} \end{array}$$

sachant que : $q = c \times l$ $c = \text{capacité linéique}$
 $l = \text{longueur train}$

Il en résulte : $i = 3600 \frac{cl}{Q}$

Si L est la longueur de la ligne et V la vitesse commerciale, L / V est la durée de la course et donc $2 \times L / V$ la durée du tour.

Aussi, pour réaliser un intervalle i , entre les trains, $\frac{2L}{Vi}$ trains sont nécessaires

soit $\frac{2 \times 1000}{Vi}$ trains / km de ligne soit $\frac{2 \times 3,6 \times 1000}{Vi}$ trains par km de ligne si V est en km / h

Pour un taux de réserve de matériel roulant de 15 % il faut : $\frac{2 \times 1,15 \times 3600}{Vi}$

soit : $\frac{2,3 \times 3600}{Vi}$ trains / km de ligne

Comme $i = 3600$ le nombre de trains est de $\frac{2,3 \times 3600 Q}{V \times 3600 \times cl}$ soit $\frac{2,3 Q}{V \times c \times l}$

Si on appelle C_u le coût linéique du matériel roulant, le coût d'un train C est : $C_u \times l$.

D'où le coût total du matériel roulant par kilomètre de ligne :

$$C_{\text{matériel roulant / km ligne}} = \frac{2,3 Q C_u}{V c}$$

| | | |
|-----------|--------------------------------|----------------------|
| (Q = | capacité horaire ligne (débit) | en voyageurs / heure |
| (C_u = | coût linéique matériel roulant | en MF / m |
| (V = | vitesse commerciale | en km / h |
| (c = | capacité linéique | en voyageurs / m |

ANNEXE 4

TABLEAU DE CALCUL DU DEBIT A PARTIR
DUQUEL L'INVESTISSEMENT EST PLUS FAIBLE
DANS L'OPTION MP 89 POUR
UN TAUX DE CHARGE ADMISSIBLE DE 3 voy / m²

COEFFICIENT DE GENIE CIVIL STATIONS : $\alpha = 0,962 \text{ MF} / \text{m}$

ECART DE COUT GENIE CIVIL TUNNEL : $K = 10 \text{ MF} / \text{km}$

LECTURE DE LA FEUILLE DE CALCUL

La partie supérieure de la page rassemble les données numériques utilisées pour le calcul.

Les valeurs numériques figurant en noir dans le tableau (30, 45 et 60) d'une part et (26, 39, 52 et 78) d'autre part correspondent respectivement aux différentes longueurs possibles de matériel roulant MP 89 et VAL.

Les valeurs numériques figurant en rose correspondent au débit maximal (en voy / h) autorisé par la longueur de train envisagée et inscrite juste au-dessus, pour un intervalle rappelé en haut de la page :70 s. Notons que la faisabilité d'un tel intervalle sur des durées assez longues devra être confirmée.

Les valeurs numériques figurant en jaune correspondent au débit (en voy / h) à partir duquel le MP 89 est économiquement plus intéressant (valeur de Q qui annule $\Delta_{MP\ 89-VAL}$ dans la formule du § 3.4).

LECTURE DU TABLEAU

- pour un débit inférieur à 4709 voy / h, le VAL_{26 m} permet d'écouler le trafic et est plus intéressant que le MP 89_{30 m} car on reste en-dessous du seuil qui rendrait le MP 89 plus économique,
- entre 4709 voy / h et 6686 voy / h VAL_{26 m} et le MP 89_{30 m} écoulent le trafic. Par contre le seuil de rentabilité de VAL (4709 voy / h) est dépassé et donc le MP 89 est plus économique,
- entre 6686 voy / h et 9720 voy / h, VAL_{39 m} et le MP 89_{30 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (776 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- entre 9720 voy / h et 10 029 voy / h, VAL_{39 m} et le MP 89_{45 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (5491 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- le raisonnement est poursuivi à l'identique pour les autres cases du tableau. Le résultat est toujours le même, le MP 89 est plus économique.

**SEUILS DE DEBIT Q A PARTIR DESQUELS LE MP 89 NECESSITE MOINS
D'INVESTISSEMENT QUE VAL**

(flux en nombre de voyageurs à l'heure)

| | | | |
|-----------|----------------------------------|-------|---------------------|
| | taux d'occupation: | 3 | Voy./m ² |
| | intervalle: | 70 | s |
| V | vitesse commerciale: | 40 | km/h |
| λ | longueur interstation: | 1 | km |
| α | coefficient GC stations | 0,962 | MF/m |
| β | coefficient surlargeur MP 89 | 1,039 | |
| K | écart coût GC tunnel | 10 | MF/km |
| a | taux d'actualisation | 8% | |
| A | coefficient A | 0,10 | |
| | | VAL | MP 89 |
| | coût voiture : | 7,5 | 6,15 |
| | capacité voiture : | 65 | 95 |
| | longueur voiture correspondante: | 13 | 15 |
| c | capacité linéique : | 5,00 | 6,30 |
| Cu | coût linéique : | 0,577 | 0,410 |
| | | MF/m | |

| | | MP 89 | | |
|-----|-------------|--------|-------|-------|
| | | 30 | 45 | 60 |
| VAL | 9720 | 14580 | 19440 | |
| | 26 6686 | 4709 | 9423 | 14138 |
| | 39 10029 | 776 | 5491 | 10205 |
| | 52 13371 | -3157 | 1558 | 6273 |
| | 78 20057 | -11022 | -6307 | -1593 |

ANNEXE 5

TABLEAU DE CALCUL DU DEBIT A PARTIR
DUQUEL L'INVESTISSEMENT EST PLUS FAIBLE
DANS L'OPTION MP 89 POUR
UN TAUX DE CHARGE ADMISSIBLE DE 4 voy / m²

COEFFICIENT DE GENIE CIVIL STATIONS : $\alpha = 0,962 \text{ MF} / \text{m}$

ECART DE COUT GENIE CIVIL TUNNEL : $K = 10 \text{ MF} / \text{km}$

LECTURE DE LA FEUILLE DE CALCUL

La partie supérieure de la page rassemble les données numériques utilisées pour le calcul.

Les valeurs numériques figurant en noir dans le tableau (30, 45 et 60) d'une part et (26, 39, 52 et 78) d'autre part correspondent respectivement aux différentes longueurs possibles de matériel roulant MP 89 et VAL.

Les valeurs numériques figurant en rose correspondent au débit maximal (en voy / h) autorisé par la longueur de train envisagée et inscrite juste au-dessus, pour un intervalle rappelé en haut de la page :70 s. Notons que la faisabilité d'un tel intervalle sur des durées assez longues devra être confirmée.

Les valeurs numériques figurant en jaune correspondent au débit (en voy / h) à partir duquel le MP 89 est économiquement plus intéressant (valeur de Q qui annule $\Delta_{MP\ 89-VAL}$ dans la formule du § 3.4).

LECTURE DU TABLEAU

- pour un débit inférieur à 5532 voy / h, le VAL_{26 m} permet d'écouler le trafic et est plus intéressant que le MP 89_{30 m} car on reste en-dessous du seuil qui rendrait le MP 89 plus économique,
- entre 5532 voy / h et 8126 voy / h VAL_{26 m} et le MP 89_{30 m} écoulent le trafic. Par contre le seuil de rentabilité de VAL (5532 voy / h) est dépassé et donc le MP 89 est plus économique,
- entre 8126 voy / h et 12 137 voy / h, VAL_{39 m} et le MP 89_{30 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (912 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- entre 12 137 voy / h et 12 189 voy / h, VAL_{39 m} et le MP 89_{45 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (6451 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- le raisonnement est poursuivi à l'identique pour les autres cases du tableau. Le résultat est toujours le même, le MP 89 est plus économique.

**SEUILS DE DEBIT Q A PARTIR DESQUELS LE MP 89 NECESSITE MOINS
D'INVESTISSEMENT QUE VAL**

(flux en nombre de voyageurs à l'heure)

| | | | |
|-----------|----------------------------------|-------|---------------------|
| | taux d'occupation: | 4 | Voy./m ² |
| | intervalle: | 70 | s |
| V | vitesse commerciale: | 40 | km/h |
| λ | longueur interstation: | 1 | km |
| α | coefficient GC stations | 0,962 | MF/m |
| β | coefficient surlargeur MP 89 | 1,039 | |
| K | écart coût GC tunnel | 10 | MF/km |
| a | taux d'actualisation | 8% | |
| A | coefficient A | 0,10 | |
| | | VAL | MP 89 |
| | coût voiture : | 7,5 | 6,15 |
| | capacité voiture : | 79 | 118 |
| | longueur voiture correspondante: | 13 | 15 |
| c | capacité linéique : | 6,08 | 7,87 |
| Cu | coût linéique : | 0,577 | 0,410 |
| | | MF/m | |

| | | MP 89 | | |
|-----|-------|-------|--------|-------|
| | | 30 | 45 | 60 |
| VAL | 26 | 12137 | 18206 | 24274 |
| | 8126 | 5532 | 11071 | 16610 |
| | 39 | 12189 | 912 | 6451 |
| | 16251 | 52 | -3709 | 11990 |
| | 78 | 24377 | -12949 | 7369 |
| | | | -7410 | -1871 |

ANNEXE 6

TABLEAU DE CALCUL DU DEBIT A PARTIR
DUQUEL L'INVESTISSEMENT EST PLUS FAIBLE
DANS L'OPTION MP 89 POUR
UN TAUX DE CHARGE ADMISSIBLE DE 3 voy / m²

COEFFICIENT DE GENIE CIVIL STATIONS : $\alpha = 0,5 \text{ MF} / \text{km}$

ECART DE COUT GENIE CIVIL TUNNEL : $K = 20 \text{ MF} / \text{km}$

LECTURE DE LA FEUILLE DE CALCUL

La partie supérieure de la page rassemble les données numériques utilisées pour le calcul.

Les valeurs numériques figurant en noir dans le tableau (30, 45 et 60) d'une part et (26, 39, 52 et 78) d'autre part correspondent respectivement aux différentes longueurs possibles de matériel roulant MP 89 et VAL.

Les valeurs numériques figurant en rose correspondent au débit maximal (en voy / h) autorisé par la longueur de train envisagée et inscrite juste au-dessus, pour un intervalle rappelé en haut de la page :70 s. Notons que la faisabilité d'un tel intervalle sur des durées assez longues devra être confirmée.

Les valeurs numériques figurant en jaune correspondent au débit (en voy / h) à partir duquel le MP 89 est économiquement plus intéressant (valeur de Q qui annule $\Delta_{MP\ 89-VAL}$ dans la formule du § 3.4).

LECTURE DU TABLEAU

- pour un débit inférieur à 6686 voy / h, le VAL_{26 m} permet d'écouler le trafic et est plus intéressant que le MP 89_{30 m} car on reste en-dessous du seuil qui rendrait le MP 89 plus économique (7102 voy / h),
- entre 6686 voy / h et 9720 voy / h VAL_{39 m} et le MP 89_{30 m} écoulent le trafic. Par contre le seuil de rentabilité de VAL (5058 voy / h) est dépassé et donc le MP 89 est plus économique,
- entre 9720 voy / h et 10 029 voy / h, VAL_{39 m} et le MP 89_{45 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (7509 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- entre 10 029 voy / h et 13 371 voy / h, VAL_{52 m} et le MP 89_{45 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (5465 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- le raisonnement est poursuivi à l'identique pour les autres cases du tableau. Le résultat est toujours le même, le MP 89 est plus économique.

**SEUILS DE DEBIT Q A PARTIR DESQUELS LE MP 89 NECESSITE MOINS
D'INVESTISSEMENT QUE VAL**

(flux en nombre de voyageurs à l'heure)

| | | | |
|-----------|----------------------------------|-------|---------------------|
| | taux d'occupation: | 3 | Voy./m ² |
| | intervalle: | 70 | s |
| V | vitesse commerciale: | 40 | km/h |
| λ | longueur interstation: | 1 | km |
| α | coefficient GC stations | 0,5 | MF/m |
| β | coefficient surlargeur MP 89 | 1,039 | |
| K | écart coût GC tunnel | 20 | MF/km |
| a | taux d'actualisation | 8% | |
| A | coefficient A | 0,10 | |
| | | VAL | MP 89 |
| | coût voiture : | 7,5 | 6,15 MF |
| | capacité voiture : | 65 | 95 Voyageurs |
| | longueur voiture correspondante: | 13 | 15 m |
| c | capacité linéique : | 5,00 | 6,30 Voy/m |
| Cu | coût linéique : | 0,577 | 0,410 MF/m |

| MP 89 | | | | |
|-------|-------------|-------|-------|-------|
| | 30 | 45 | 60 | |
| VAL | 26 6686 | 9720 | 14580 | 19440 |
| | 39 10029 | 7102 | 9553 | 12003 |
| | 52 13371 | 5058 | 7509 | 9959 |
| | 78 20057 | 3014 | 5465 | 7915 |
| | | -1074 | 1377 | 3827 |

ANNEXE 7

TABLEAU DE CALCUL DU DEBIT A PARTIR
DUQUEL L'INVESTISSEMENT EST PLUS FAIBLE
DANS L'OPTION MP 89 POUR
UN TAUX DE CHARGE ADMISSIBLE DE 4 voy / m²

COEFFICIENT DE GENIE CIVIL STATIONS : $\alpha = 0,5 \text{ MF} / \text{m}$

ECART DE COUT GENIE CIVIL TUNNEL : $K = 20 \text{ MF} / \text{km}$

LECTURE DE LA FEUILLE DE CALCUL

La partie supérieure de la page rassemble les données numériques utilisées pour le calcul.

Les valeurs numériques figurant en noir dans le tableau (30, 45 et 60) d'une part et (26, 39, 52 et 78) d'autre part correspondent respectivement aux différentes longueurs possibles de matériel roulant MP 89 et VAL.

Les valeurs numériques figurant en rose correspondent au débit maximal (en voy / h) autorisé par la longueur de train envisagée et inscrite juste au-dessus, pour un intervalle rappelé en haut de la page :70 s. Notons que la faisabilité d'un tel intervalle sur des durées assez longues devra être confirmée.

Les valeurs numériques figurant en jaune correspondent au débit (en voy / h) à partir duquel le MP 89 est économiquement plus intéressant (valeur de Q qui annule $\Delta_{MP\ 89-VAL}$ dans la formule du § 3.4).

LECTURE DU TABLEAU

- pour un débit inférieur à 8126 voy / h, le VAL_{26 m} permet d'écouler le trafic et est plus intéressant que le MP 89_{30 m} car on reste en-dessous du seuil qui rendrait le MP 89 plus économique (8344 voy / h),
- entre 8126 voy / h et 12 137 voy / h VAL_{39 m} et le MP 89_{30 m} écoulent le trafic. Par contre le seuil de rentabilité de VAL (5943 voy / h) est dépassé et donc le MP 89 est plus économique,
- entre 12 137 voy / h et 12 189 voy / h, VAL_{39 m} et le MP 89_{45 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (8822 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- entre 12 189 voy / h et 16 251 voy / h, VAL_{52 m} et le MP 89_{45 m} écoulent le trafic. Le seuil de rentabilité de VAL (6420 voy / h) étant dépassé, le MP 89 est plus économique,
- le raisonnement est poursuivi à l'identique pour les autres cases du tableau. Le résultat est toujours le même, le MP 89 est plus économique.

**SEUILS DE DEBIT Q A PARTIR DESQUELS LE MP 89 NECESSITE MOINS
D'INVESTISSEMENT QUE VAL**

(flux en nombre de voyageurs à l'heure)

| | | | |
|-----------|----------------------------------|-------|---------------------|
| | taux d'occupation: | 4 | Voy./m ² |
| | intervalle: | 70 | s |
| V | vitesse commerciale: | 40 | km/h |
| λ | longueur interstation: | 1 | km |
| α | coefficient GC stations | 0,5 | MF/m |
| β | coefficient surlargeur MP 89 | 1,039 | |
| K | écart coût GC tunnel | 20 | MF/km |
| a | taux d'actualisation | 8% | |
| A | coefficient A | 0,10 | |
| | | VAL | MP 89 |
| | coût voiture : | 7,5 | 6,15 MF |
| | capacité voiture : | 79 | 118 Voyageurs |
| | longueur voiture correspondante: | 13 | 15 m |
| c | capacité linéique : | 6,08 | 7,87 Voy/m |
| Cu | coût linéique : | 0,577 | 0,410 MF/m |

| MP 89 | | | | |
|-------|---------------------|-------|-------|-------|
| | 30 | 45 | 60 | |
| VAL | 26 8126 12137 | 8344 | 11223 | 14102 |
| | 39 12189 | 5943 | 8822 | 11701 |
| | 52 16251 | 3541 | 6420 | 9299 |
| | 78 24377 | -1262 | 1617 | 4496 |