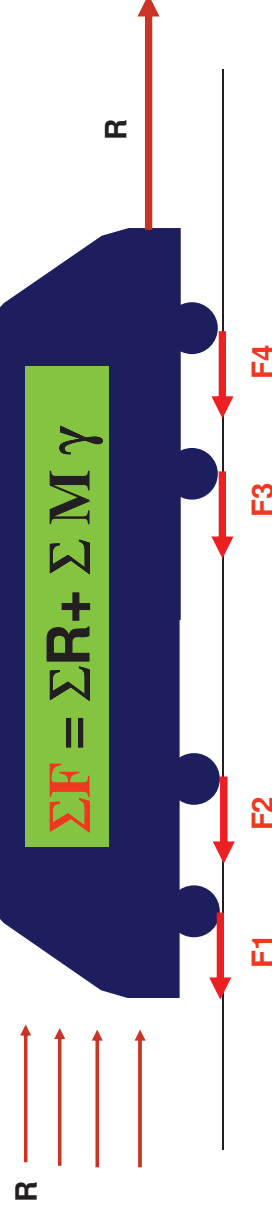


La dynamique ferroviaire

L'effort aux jantes

Effort aux jantes = Effort Résistant + Effort Accélérateur (ou décélérateur)



Effort aux jantes

Somme des efforts de traction (ou de freinage)
appliqués au contact roue rail par les essieux motorisés

La formule fondamentale de la dynamique des trains

$$F_j = F_R + F_P + F_c + F_a$$

$F_{jante} = RAV + \frac{M_s \cdot g}{1000} \cdot i + \frac{M_s \cdot g}{1000} \cdot \frac{800}{\rho} + k \cdot M_s \cdot \gamma$

Effort traction : +
 Effort freinage : -

Résistance à l'avancement : +

Effort dû à la pesanteur
 + en rampe (montée)
 - en pente (descente)

Effort dû aux courbes
 toujours + même en pente

Effort accélérateur +
 Effort décélérateur : -

ALSTOM La Traction électrique Marc Debruyne

La Résistance à l'AVancement : RAV

$$RAV = A + BV + CV^2$$

- A : forces de résistance au roulement
 B: forces de friction fonction de V
 C: forces aérodynamiques fonction de V²

- V est la vitesse de déplacement du train en km/h
- Formule fondamentale qui caractérise le matériel roulant
- Les coefficients A, B, C sont obtenus par calcul, simulations aérodynamiques, si besoin avec des maquettes à échelle réduite en soufflerie et même en essai réel en ligne pour ajuster les coefficients

Terme A de la RAV

$$A = \lambda_A \sqrt{\frac{10}{m}} \cdot M_S$$

A est censé mesurer la résistance au roulement des roues sur le rail et des paliers d'essieux.

Il est fonction de la charge par essieu

A [en N]

- avec : m = masse par essieu en tonnes
- M_S = masse statique totale de la rame en tonnes
- λ_A = paramètre compris entre 0 et 20 N/t suivant le type de matériel.

Terme B de la RAV

$$B = \lambda_B \cdot M_S$$

• B est le terme qui réunit toutes les résistances autres que A + C.V² telles que les pertes par hystérésis mécanique et d'amortissement résultant des oscillations verticales et latérales et le frottement des boudins sur les faces latérales des champignons de rails

- B en N/(km/h)
- avec M_S = masse statique totale de la rame en tonnes
- λ_B = paramètre compris entre 0,075 et 0,15 N/t.(km/h) suivant le type de matériel.
- Pour les éléments automoteurs modernes , on retient $\lambda_B = 0,1$ N/t.(km/h)

Terme C de la RAV

$$C = K_1.S + K_2.p.L + \Sigma C_{divers}$$

K1 paramètre global de forme des extrémités avant et arrière

S maître couple

=> K₁ compris entre 15.10⁻³ et 25.10⁻³ Pa/(km/h)²

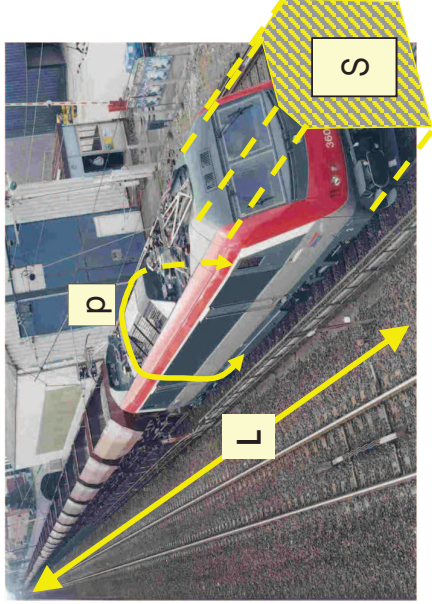
K2 paramètre d'état de la surface mouillée p.L

=> K₂ compris entre 13,5.10⁻⁵ à 32,5.10⁻⁵ Pa/(km/h)²

p =périmètre partiel rail à rail en m

L = longueur du train en m

ΣC_{divers} = Somme des coefficients aérodynamiques supplémentaires



La Traction électrique

Marc Debruyne

RAV: La formule de Davies, pratique mais approximative

Pour les métros et tramways on utilise couramment la formule de Davies

Elle est parfois utilisée , faute de mieux, pour automobiles

Ne convient pas aux locomotives et aux trains à grande vitesse

$$RAV = 6.4M_s + 130N_e + 0.14M_sV + [0.046 + 0.0065(N_v - 1)]SV^2$$

A	BV	CV ²
---	----	-----------------

RAV	Résistance à l'avancement en N
M _s	Masse du train en Tonnes
N _e	Nombre d'essieux
N _v	Nombre de voitures
V	Vitesse en km/h
S	Surface frontale en m ²



La Traction électrique

Marc Debruyne

La masse statique M_S varie avec la charge en passagers

AW0 ou ELE*	A vide , en ordre de marche
AW1 ou ELS	Tous les sièges fixes occupés
AW2 ou EL4	Charge normale, AW1+ 4 personnes debout /m ²
AW3 ou EL6	Charge maximale, AW1 + 6 personnes debout/m ²
AW4 ou EL8	Charge exceptionnelle, AW1 + 8 personnes debout /m ²

* ELE: European Load Empty selon EN 13452

1 personne = 75kg

Les performances du train devront être calculées avec la charge indiquée par le client

Extrait de la norme EN 13452-1

EL E	Train en état de marche mais sans passagers à bord
EL S	EL E + tous les sièges fixes occupés
EL T	EL E + toutes les places assises occupées (sièges, strapontins...)
EL X	<div>EL S + passagers debout à la densité de X/m²</div> <div>Exemple</div> <div>EL 6 — 6 passagers debout par mètre carré</div> <div>EL 6.67 — équivalent à une charge de 500 kg/m²</div> <div>NOTE 1 La densité des passagers debout est couramment plus élevée que sur des trains grandes lignes et peut varier significativement entre différents systèmes de transport. Pour cette raison, tous les niveaux de charge donnés dans cette Norme européenne sont considérés comme des minimums recommandés pour les calculs.</div> <div>NOTE 2 EL = «European Load» = charge européenne</div> <div>E = «Empty» = vide</div> <div>S = «Seats (fixed)» = sièges fixes</div> <div>T = «Tilting seats» = strapontins</div> <div>X = «Standing passengers» = nombre passagers debout à la densité de X/ m²</div> <div>NOTE 3 EL E = réservoirs pleins et conducteur inclus</div>

Grande variation de la masse statique en tram ou métro

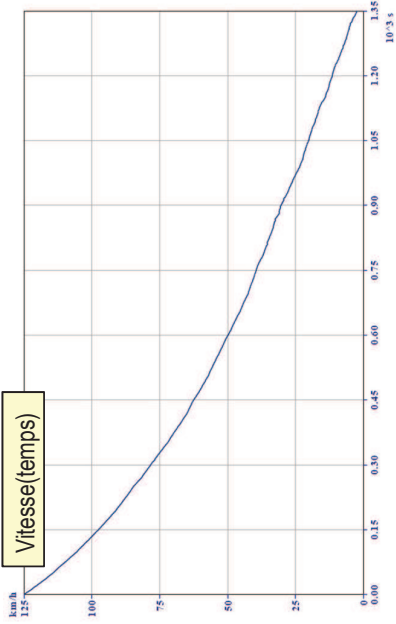
La masse statique peut augmenter de 40 à 50% entre « à vide » et en charge maximale

Matériel	Architecture	Longueur	Nombre de motrices	Masse à vide	Nombre maximal de passagers transportés	Masse des passagers (EL6)	Ratio de masse passagers/Masse à vide
Métro	Rame de 6 voitures	116 m	4	192 T	1371	95.97 T	50%
Tramway	Rame articulée de 3 voitures	30 m	2	42 T	249	17.43 T	42%
Tram-Train	Rame articulée de 5 voitures	50 m	3	76.4 T	320	22.4 T	29%

Tableau 1: Les caractéristiques principales des matériels urbains (données source: Alstom, compilation G. Bossaert)



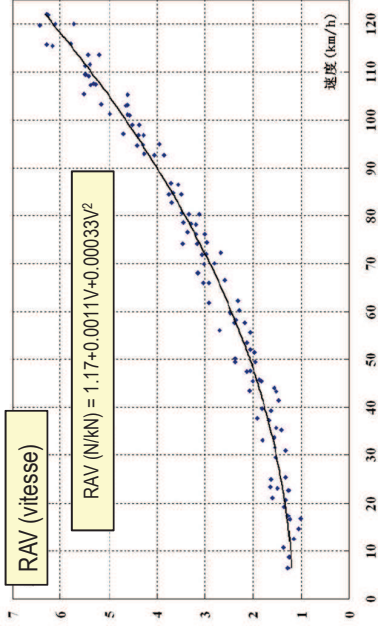
Mesure de la RAV et estimation des coefficients A, B, C



Sur ligne droite sans déclivité on enregistre après coupure traction la décroissance de vitesse en fonction du temps $V(t)$ (correction température, pression atmosphérique vent éventuellement à prévoir fonction de la précision souhaitée)



A partir de $V(t)$ on calcule la décélération $a(t)$ et on obtient la courbe accélération fonction de la vitesse: $a(V)$



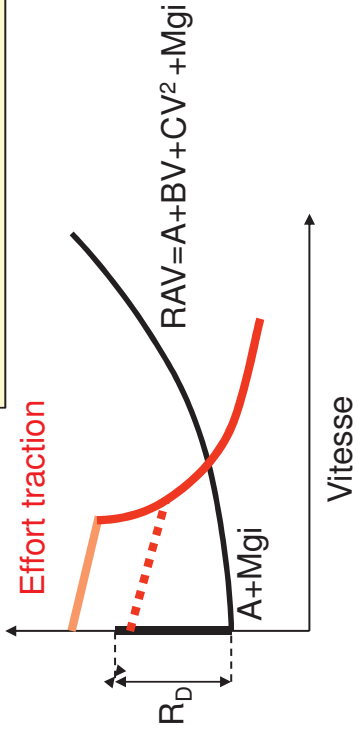
Comme on a $0 = RAV + k \cdot M_s \cdot a$ on en déduit la courbe RAV en fonction de la vitesse pour tout point. Une courbe de tendance en polynôme du second degré donne les coefficients A, B, C
La masse statique et les masses tournantes doivent être connues



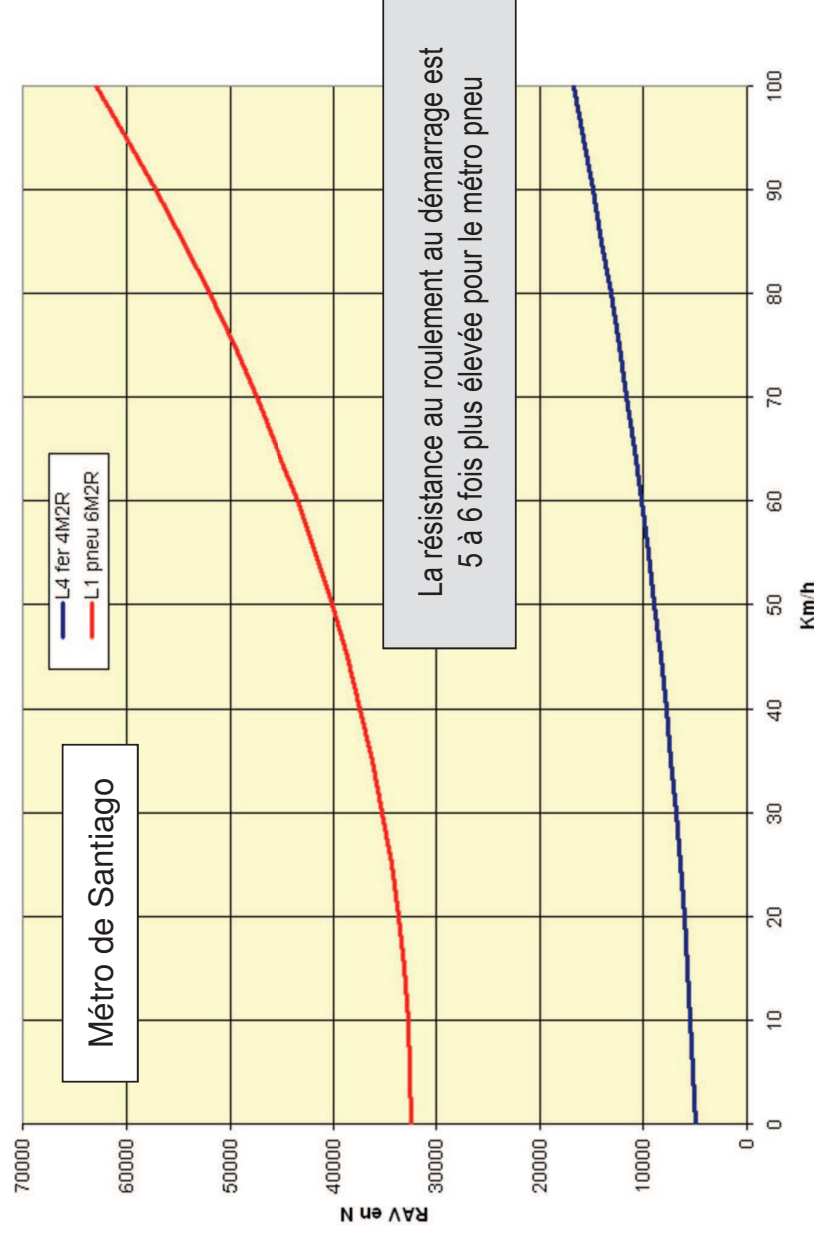
Résistance supplémentaire au décollage du train

Pour décoller un matériel roulant arrêté il est nécessaire d'appliquer un effort de traction supérieur à $A+Mgi+R_D$, R_D étant la résistance au décollage supplémentaire qui n'existe qu'à vitesse quasi nulle (environ 30N/t pour un train de fret)

La plupart du temps cet effort est négligé car il est sans effet sur l'accélération du convoi, il suffit seulement de vérifier que l'effort de traction à $V=0$ est supérieur à $A+Mgi+R_D$



Comparaison RAV métro fer et pneu



RAV locomotive et charge

Quelques formules empiriques

Locomotive	$RAV = 6.5M_s + 130N_e + 0.1M_s V + 0.3V^2$
------------	---

Train de wagons « tout venant »	$RAV = 12M_s + 0.09M_s V + 0.0044M_s V^2$
------------------------------------	---

RAV	Résistance à l'avancement en N
M _s	Masse du train en Tonnes
N _e	Nombre d'essieux
V	Vitesse en km/h



Quelques RAV

RAV en Newton V en km/h M en tonnes

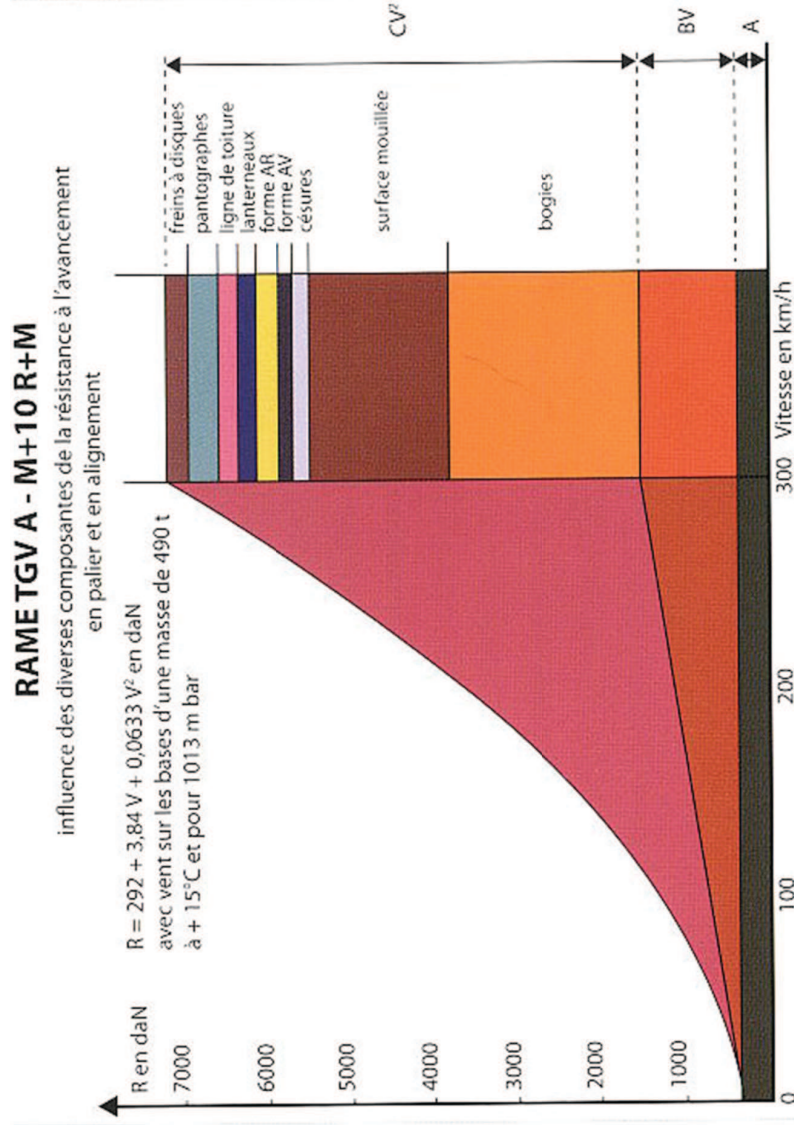
Tram Citadis 302 (6 essieux)	R (N) = 1200 + 6,768.V + 0,3384.V ²
Train de voyageurs (tare>42T)	R (N) = M(12,5 + 0.00159V ²)

TGV PSE (418T- 2M-8R)	R (N) = 3900 + 40.7V + 0,632V ²
TGV A (484T- 2M-10R)	R (N) = 2920 + 38.4V + 0,633V ²
TGV R-POS-Dasy (416T- 2M-8R)	R (N) = 2500 + 33V + 0,510V ²
TGV-Duplex (424T- 2M-8R _{2N})	R (N) = 2700 + 32V + 0,535V ²
TGV-POS (416T- 2M-8R)	R (N) = 2930 + 38.7V + 0,589V ²
Eurostar (816T-2M-18R)	R (N) = 4820 + 65.3V + 1.05V ²
ICE3 (424T-4M-4R)	R (N) = 3700 + 37V + 0,59V ²

V150 Record de vitesse (270T-3M-2R _{2N})	R (N) = 1700 + 22V + 0,317V ²
--	--



Influence des composantes sur la RAV du TGVA



ALSTOM

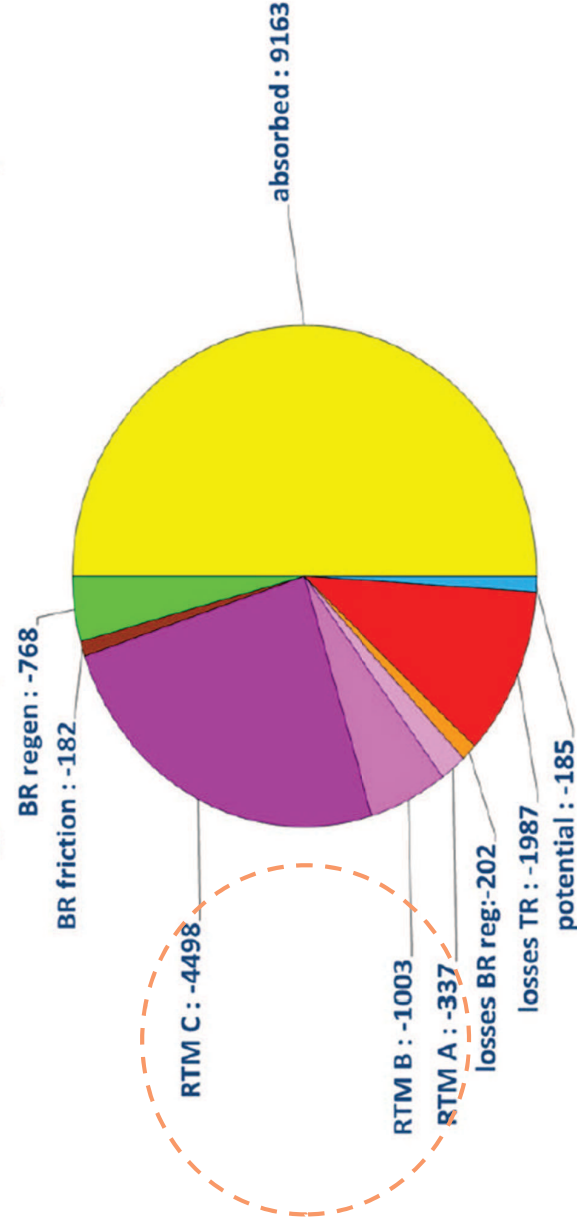
La Traction électrique

Marc Debruyne

TGV-POS: 63% de l'énergie consommée pour vaincre la RAV

Paris – Strasbourg / All out run

Energy consumption breakdown (values in kWh)



L'aérodynamisme d'une rame TGV premier consommateur d'énergie

ALSTOM

La Traction électrique

Marc Debruyne

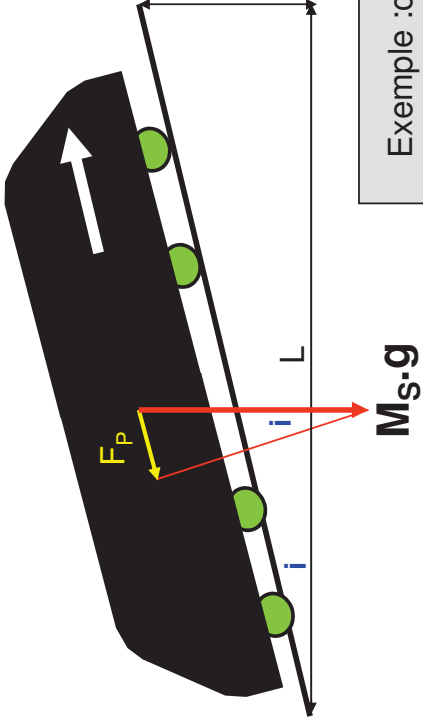
F_P Effort dû à la pesanteur: rampes et pentes

Les rampes (montées) ou pentes (descentes) sont données tout au long de la ligne par l'inclinaison $i=h/L$, souvent en mètres pour 1000m (en ‰)

$$F_P = M_S \cdot g \cdot \sin(i) \text{ mais comme l'angle } i \text{ est petit on peut écrire } \sin(i) \approx \tan(i) = i \text{ soit } F_P = M_S \cdot g \cdot i$$

Par convention i est positif en rampe, négatif en pente
 i est en général inférieur à 40 ‰

$$F_P = M_S \cdot g \cdot i$$



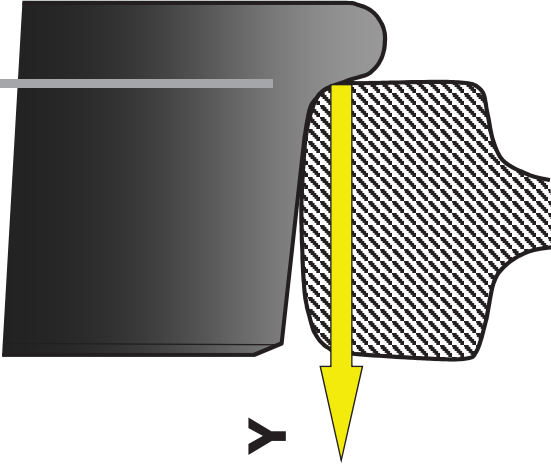
Lignes européennes « courantes » :	5 à 15 ‰
Lignes « de montagne »	
- St Gothard, Lötschberg, Tauern	27 ‰
- Maurienne (Chambéry - St Jean - Modane)	30 ‰
- Capvern (Toulouse - Tarbes)	33 ‰
- Pérou, Equateur, Birmanie	40 ‰
Ligne grande vitesse Paris - Sud - Est	35 ‰
Ligne grande vitesse Cologne - Francfort	40 ‰

Exemple : convoi de 2000T en rampe de 10‰
 $F_P = 2000T \times 9.81 \times 0.01 = 196.2 \text{ kN}$

F_C Effort résistant dû aux courbes

Effet du FROTTEMENT boudin - champignon de rail, toujours positif même en pente
 On assimile cet effet à une rampe , on corrige donc le profil avec le terme k/R_C

i' : **profil corrigé**



$$i' = i + \frac{k}{R_C}$$

k est fixé à 800m (grandes lignes)
 k est fixé à 150m (tramways)
 R_C : rayon de la courbe (m)
 i et i' en ‰

Exemple : courbe de 1000m en rampe de 10‰
 Calcul de i corrigé
 $i' = 10 + 800/1000m = 10.8 \text{ ‰}$

F_a Effort accélérateur ou décélérateur

$$F_a = k.M_s.\gamma = (M_s + M_t).\gamma$$

γ accélération ou décélération du train en m/s^2

M_s masse statique du train en tonnes

On ramène souvent l'inertie des masses en rotation (roues, essieux, engrenages, rotors de moteur, disques de frein.....) à une inertie équivalente de translation M_t

ou bien on affecte M_s d'un coefficient de correction k pour prise en compte des masses tournantes

1,1 pour une locomotive (fonction diamètres de roues, rotor moteurs..)

1,07 pour un tram 6 essieux

1,04 pour une rame TGV

Accélération au démarrage les plus courantes (m/s^2)

FRET	:	0,03 à 0,05
TGV	:	0,3 à 0,5
EMU	:	0,8 à 1
Urbain	:	0,8 à 1,3

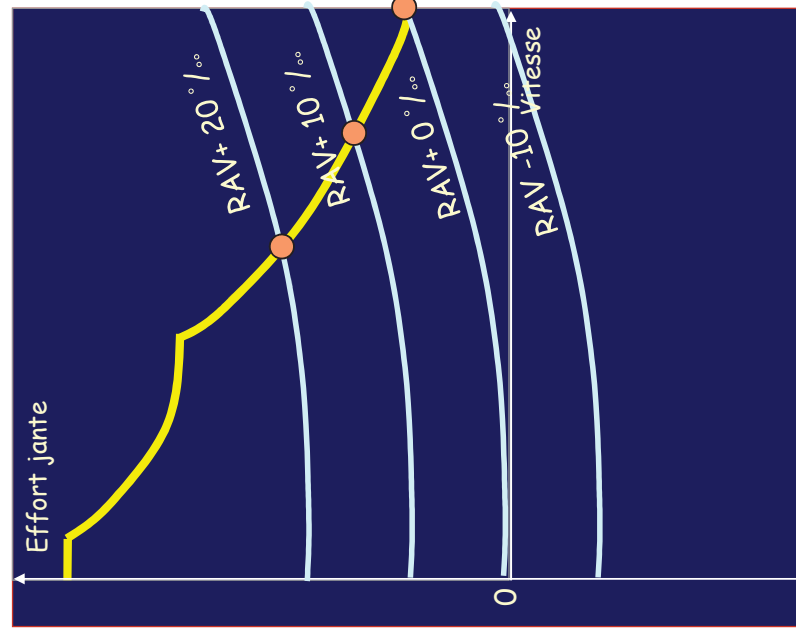
Accélération résiduelle à V_{max}
exigée selon les STI des trains grande vitesse 0.05



La Traction électrique

Marc Debruyne

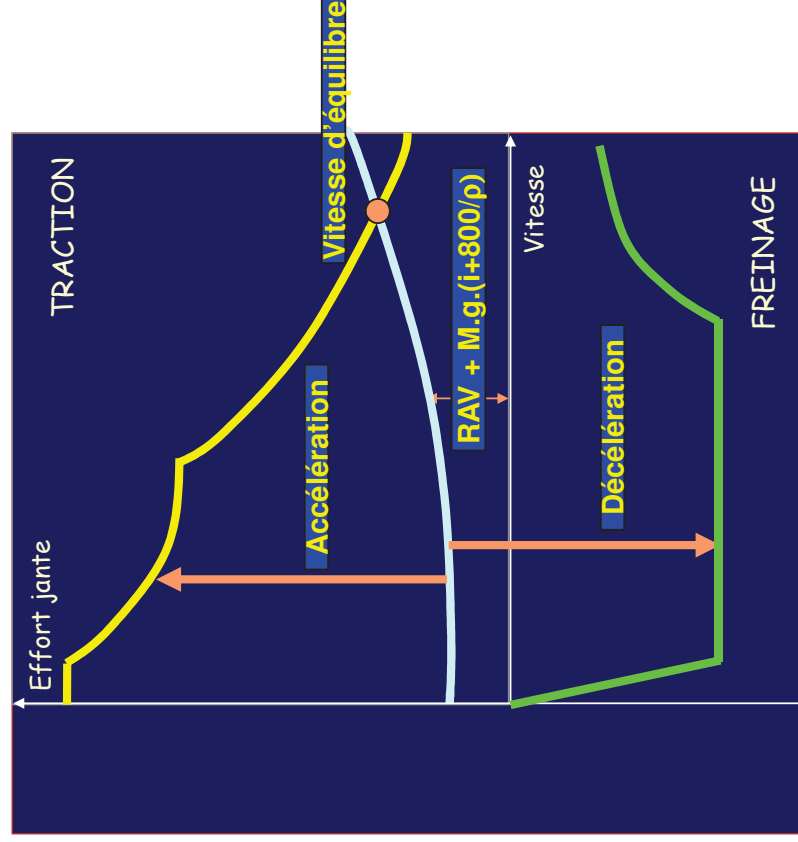
Vitesses d'équilibre sur la courbe effort-vitesse



La Traction électrique

Marc Debruyne

Accélération ou décélération



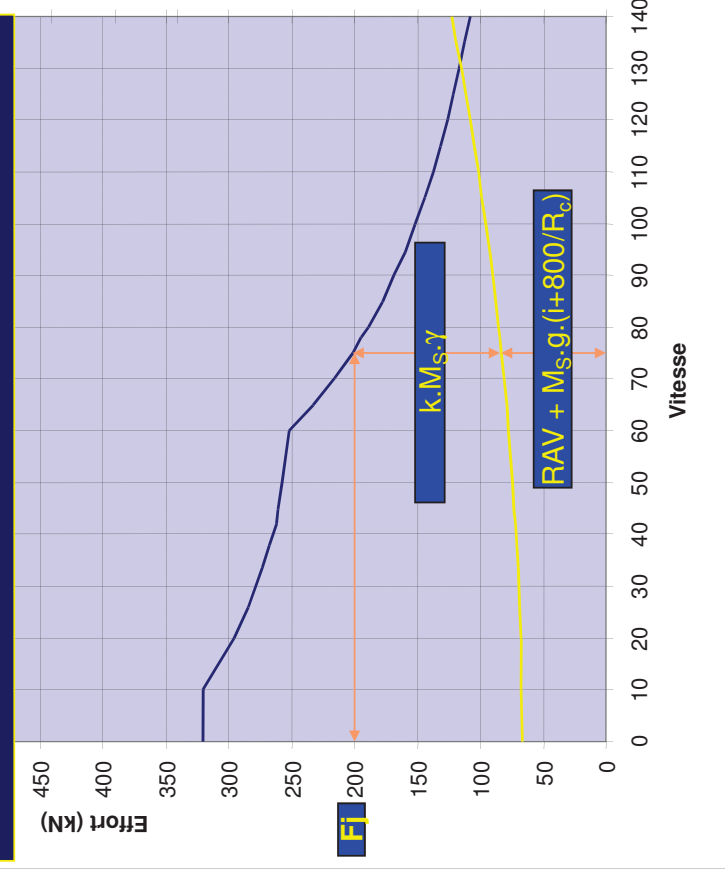
ALSTOM

La Traction électrique

Marc Debruyne

Quelques formules pratiques indispensables à retenir

$$F_J = RAV + M_S \cdot g \cdot (i + 800/R_c) / 1000 + k \cdot M_S \cdot \gamma$$



Traction	Freinage
$C_m = \frac{F_j \cdot D}{2N \cdot \rho \cdot \eta}$	$C_m = \frac{F_j \cdot D \cdot \eta}{2N \cdot \rho}$

$$V_m = \frac{V_T \cdot 60 \cdot \rho}{3.6 \cdot \pi \cdot D}$$

$$P_j = \frac{F_j \cdot V_T}{3.6}$$

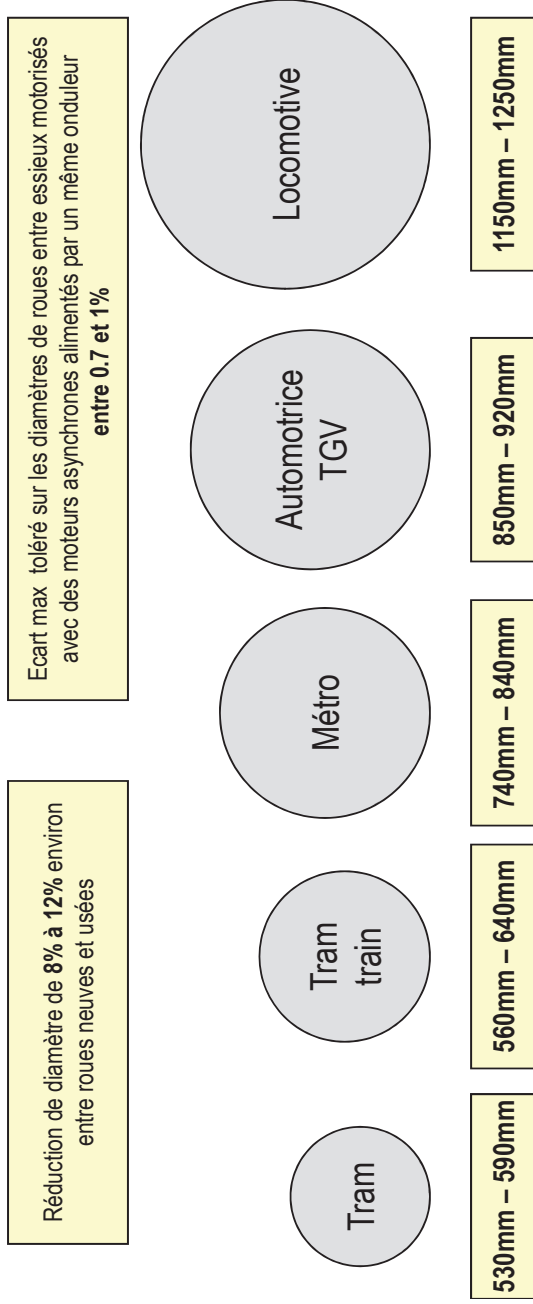
C_m : couple moteur (kN.m)
 D : diamètre de roue mi-usée (m)
 F_j : effort jante total (kN)
 N : nombre de moteurs
 ρ : tr/mn moteur/ tr/mn roue
 η : rendement de la transmission
 V_m : vitesse de rotation moteur (tr/mn)
 V_T : vitesse du train (km/h)
 P_j : Puissance aux jantes (kW)

ALSTOM

La Traction électrique

Marc Debruyne

Quelques informations sur les roues



Les courbes F(V) contractuelles sont généralement calculées roues mi-usées

La vitesse max de rotation des moteurs avec roues usées ne doit pas dépasser la vitesse max de dimensionnement moteur définie par le motoriste

Par sécurité (marge 20%)
l'essai de survitesse moteur selon CEI60349 se fait à 1.2 fois la vitesse max moteur

Calcul du rapport de réduction ρ entre moteur et roue

Diamètre de roue usée en m D_{\min}
Vitesse max train en km/h $v_{T\max}$
Vitesse max moteur en tr/mn $v_{M\max}$

$$v_M = \frac{v_{T\max} \cdot 60 \cdot \rho}{3 \cdot 6 \cdot \pi \cdot D_{\min}} \leq v_{M\max}$$

$$\rho \leq \frac{3.6\pi \cdot D_{\min} \cdot v_{M\max}}{v_{T\max} \cdot 60}$$

AN: Calcul du couple sur l'arbre d'un moteur

Une locomotive BoBo (4 essieux) a des roues de 1150mm, la transmission est faite d'un réducteur à un seul étage constitué d'un pignon moteur de 23 dents qui engrène sur une grande roue de 109 dents calée sur l'essieu , le rendement du réducteur est estimé à 98% ,
Calculer le couple sur l'arbre d'un moteur au démarrage quand la locomotive délivre 320kN aux jantes

Effort jante sur un essieu: 320/4=80kN
Couple sur un essieu: 80kN x D/2= 80000 x 1.150/2= 46000Nm
Rapport du réducteur moteur/roue $\rho = \Omega_{mot} / \Omega_{roue} = 109/23= 4.739$

$$P_{arbre_moteur} = C_{mot} \cdot \Omega_{mot}$$

$$P_{roue} = C_{roue} \cdot \Omega_{roue}$$

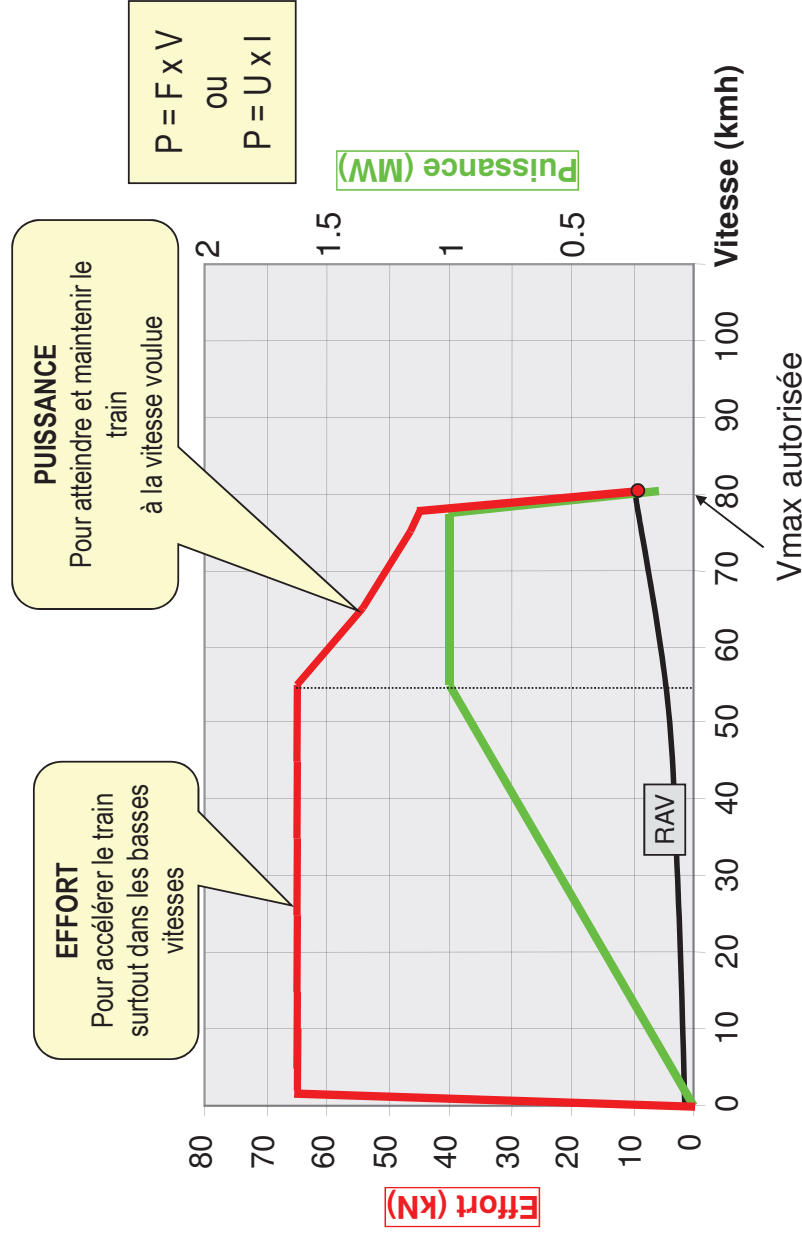
$$\eta = \frac{P_{roue}}{P_{arbre_moteur}} = 0.98$$

$$C_{mot} = \frac{C_{roue}}{\eta} \cdot \frac{\Omega_{roue}}{\Omega_{mot}} = \frac{C_{roue}}{\eta \cdot \rho}$$

$$C_{mot} = \frac{46000}{0.98} \cdot \frac{23}{109} = 9904 Nm$$

Conseil: garder le rapport du réducteur sous la forme d'une fraction 109/23 plutôt que 4.739 pour conserver toute la précision de calcul (pas d'arrondi à faire)

Ne pas confondre : Puissance et Effort



Petit problème basique

Données d'entrée	Masse statique M_s	Masses tournantes M_t	Vitesse max V_2	Accélération résiduelle γ_2 à V_2
	RAV train	Sollicitation max d'adhérence μ_{\max}	Accélération γ_1 de 0 à V_1	Nombre total d'essieux N

Données de sortie	Effort au démarriage F	Puissance P	Nombre d'essieux motorisés N_m
-------------------	---------------------------	-------------	-------------------------------------

On supposera
que la charge se répartit équitablement entre tous les essieux qu'ils soient moteurs ou porteurs
que le train circule en alignement (pas de courbes) et sans déclivité (pas de rampes ou pentes)

ALSTOM

La Traction électrique

Marc Debruyne

Les bonnes formules pour trouver la $F(V)$

$$F_1 = (M_s + M_t).a_1 + RAVV_1$$

$$F_2 = (M_s + M_t).a_2 + RAV_2$$

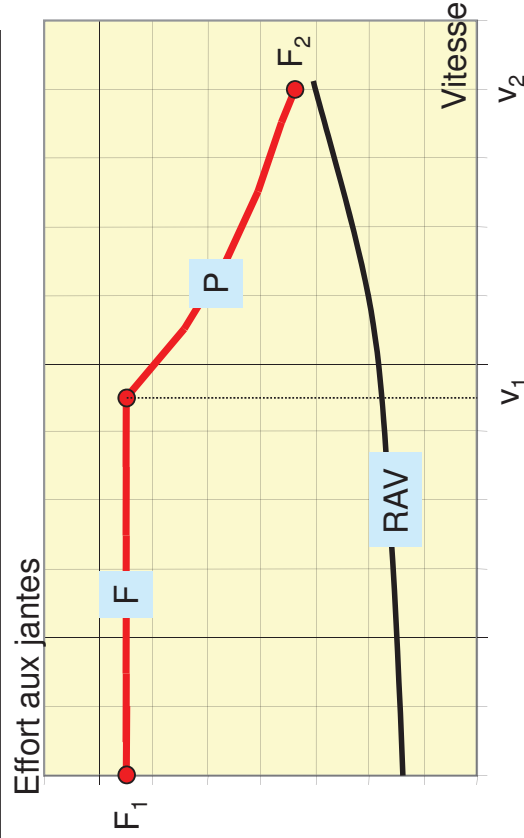
$$P_1 = F_1.v_1$$

$$P_2 = F_2.v_2$$

Prendre la plus grande des 2 puissances calculées P_1 et P_2

$$N_m \geq \frac{F_1}{\mu_{\max}} \cdot \frac{N}{M_s \cdot g}$$

Choisir N_m
entier et pair



ALSTOM

La Traction électrique

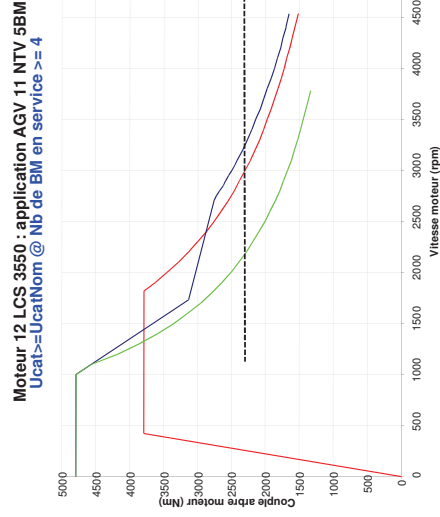
Marc Debruyne

Les différentes courbes Effort-Vitesse

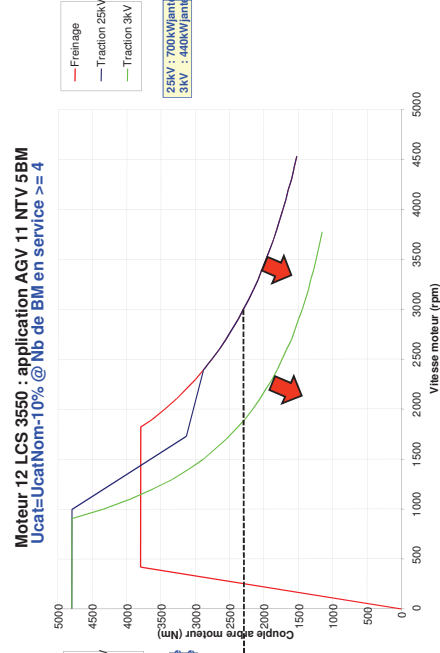


Courbes F(v) variables avec la tension ligne

Les courbes F(v) peuvent varier en traction et en freinage en fonction de la tension caténaire



U_{cat} nominal



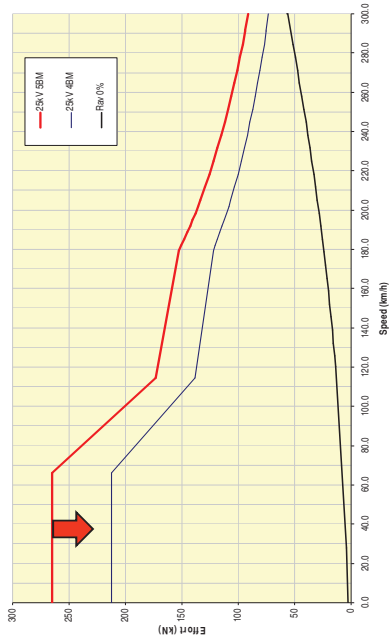
$U_{cat} - 10\%$



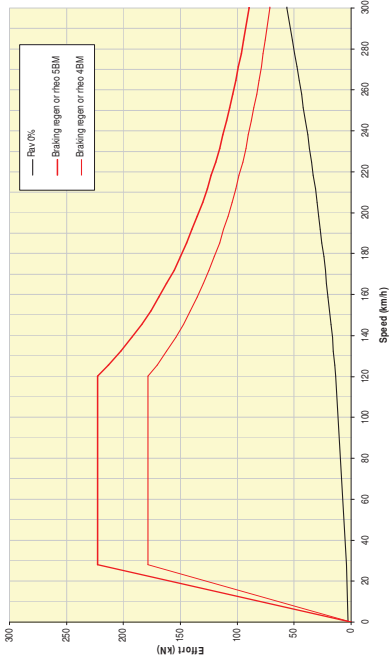
Courbes F(v) variables avec le nombre de CdT en service

Les courbes F(V) varient en traction et en freinage ainsi qu'en fonction du nombre d'équipements en service

AGV(NTV): TRACTION effort-speed curve at 25kV-50Hz

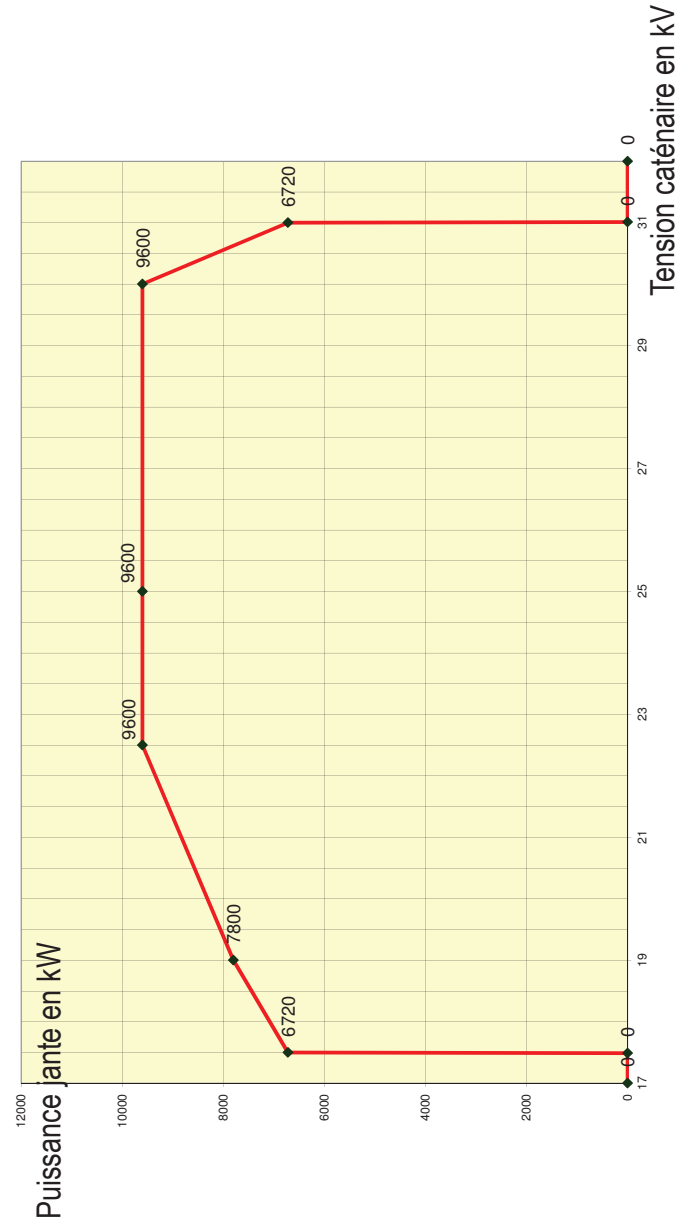


AGV(NTV): BRAKING effort-speed curve

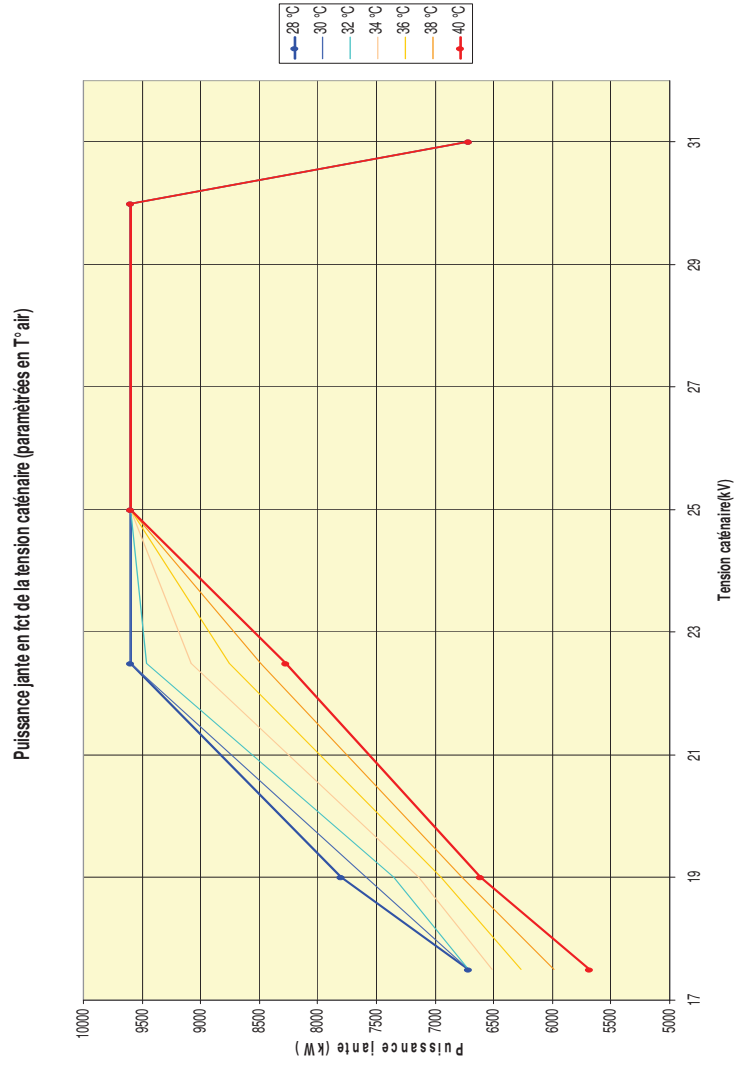


Puissance max en fonction de la tension caténaire

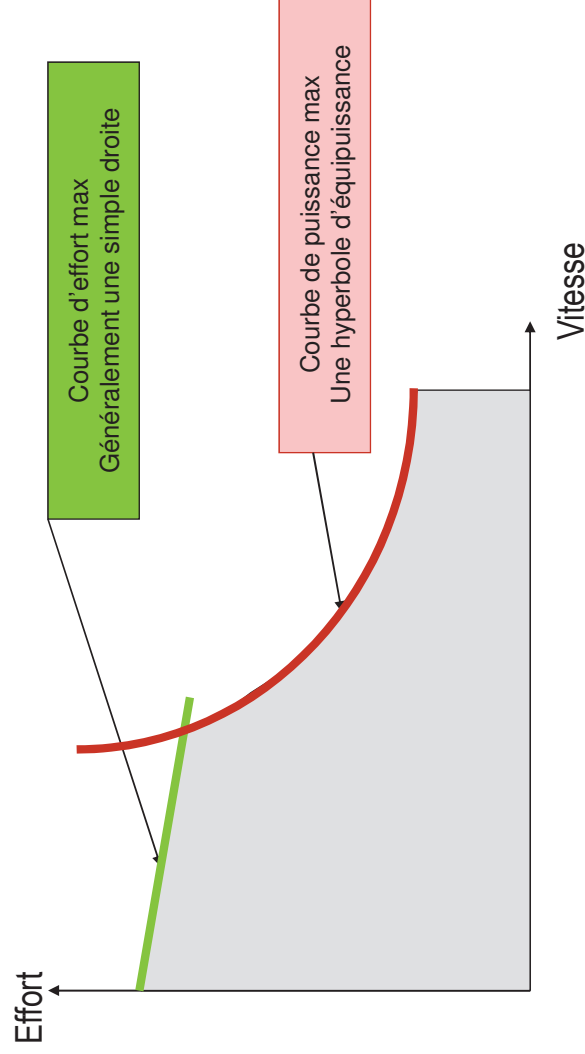
Exemple : locomotive CoCo 9600kW 25kV-50Hz (Chine)



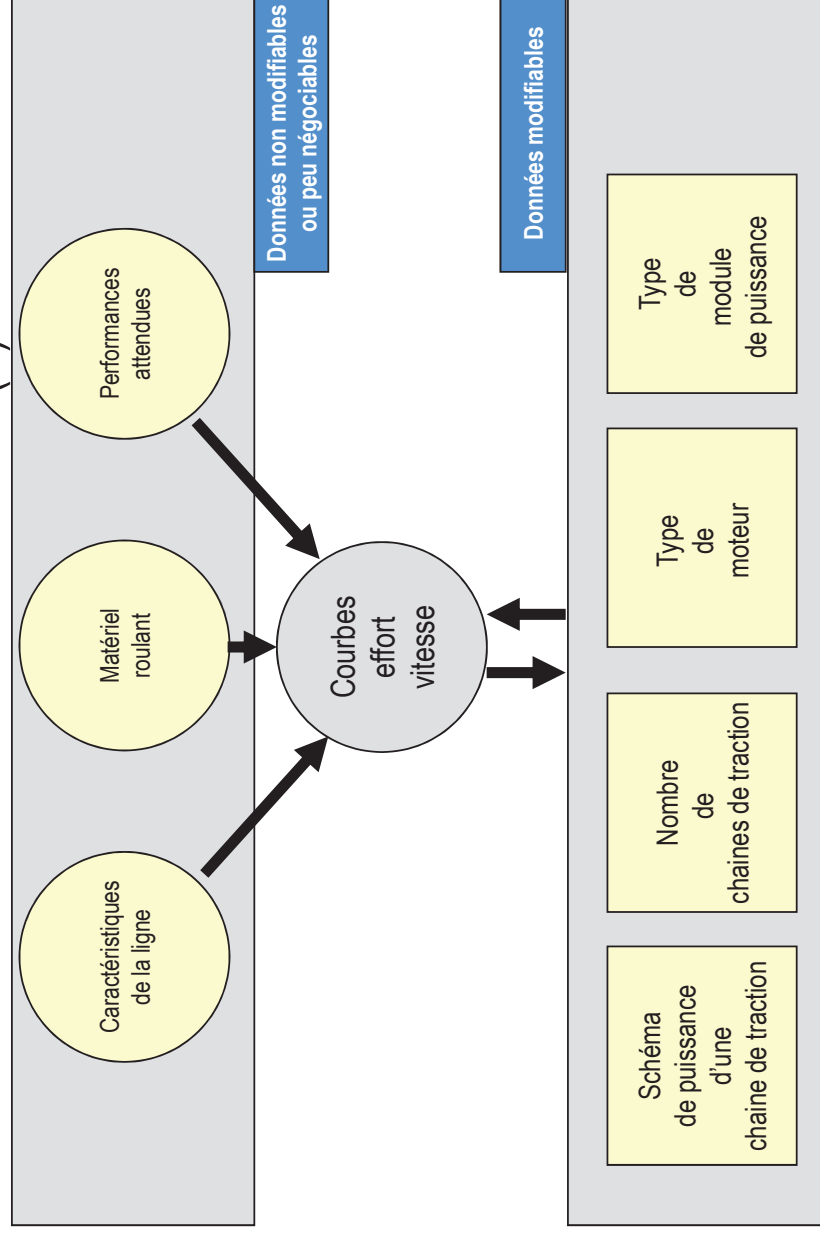
Puissance max en fonction de la température ambiante



Une courbe F(v) simple pour démarrer les calculs

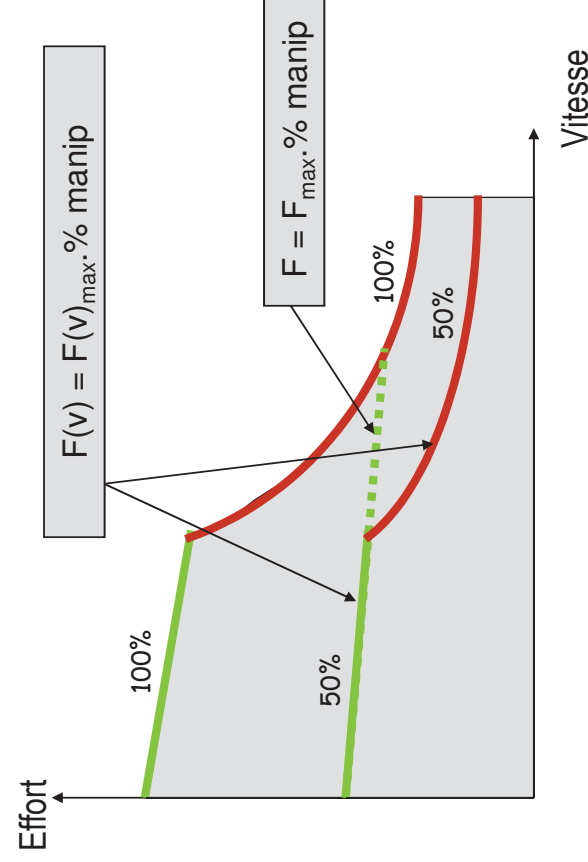


Elaboration des courbes $F(V)$



Variations de l'effort et de la puissance avec le manipulateur

Généralement une homothétie complète de la $F(v)$ avec le % manip ou seulement une homothétie sur l'effort (la puissance reste max)



Application numérique calcul F(V) : énoncé

Une automotrice de 150T (M_S) doit accélérer à 1.1 m/s² de 0 à 40km/h en alignement sans déclivité de plus le cahier des charges exige qu'à vitesse maximale 160km/h elle ait encore une accélération résiduelle de 0.05m/s²

Coefficients de résistance à l'avancement : A=1500N, B=20N/km/h, C=0.4N/(km/h)²,
Masse tournantes (M_t) estimées à 7 % de la masse train, accélération de la pesanteur $g=9.81\text{m/s}^2$
Pour calculer l'effort afin d'obtenir l'accélération moyenne de 1.1m/s²
on peut prendre une RAV moyenne entre 0 et 40km/h égale à $RAV_{\text{moyen}} = (RAV_{V=0} + RAV_{V=40})/2$

- Quel doit être l'effort total minimum aux jantes entre 0 et 40km/h ?
- Quelle doit être la puissance minimale aux jantes à 40 km/h?
- Quelle doit être la puissance minimale aux jantes à 160 km/h?
- Comment évolue l'accélération résiduelle à 160km/h en rampe de 10 ‰ ?

Application numérique: réponse

Calcul de l'effort et de la puissance pour faire l'accélération de 1.1 m/s² de 0 à 40km/h
 $RAV_{V=0} = A=1500\text{N}$ et $RAV_{V=40} = 1500+20.40+0.4.40^2= 2940\text{N}$,
 $RAV_{\text{moyen}} = (1500+2940)/2=2220\text{N}$.

Effort jantes moyen pour faire 1.1 m/s² $F = RAV_{\text{moyen}} + (M_S + 0.07.M_t) \cdot 1.1 = 178770\text{N}$ ou **179kN**
Puissance jantes à 40km/h $P_{40} = F_{\text{moyen}} \cdot V_{40} = 179 \cdot 40 / 3.6 = \mathbf{1986kW}$

Calcul de la puissance à 160 km/h pour avoir une accélération résiduelle de 0.05m/s²
 $P_{160} = ((1500+20 \cdot 160 + 0.4 \cdot 160^2) + (150000 + 0.07 \cdot 150000) \cdot 0.05) \cdot 160 / 3.6 = \mathbf{1020kW}$:

P_{160} est nettement inférieur à 1986kW

Si on maintient la puissance des moteurs constante à 1986 kW de 40 à 160km/h ,
la contrainte d'accélération résiduelle à 160 km/h sera aisément tenue

Calcul de l'accélération résiduelle à 160km/h en rampe de 10 ‰

$P = FV = (RAV_{V=160} + M_S \cdot g + (M_S + M_t) \cdot \gamma) V$ avec $(M_S + M_t) \cdot \gamma = F_a$, effort accélérateur

Soit $F_a = 1986000 / 160 \cdot 3.6 - (1500 + 20 \cdot 160 + 0.4 \cdot 160^2) - 150000 \cdot 9.81 \cdot 10 / 1000$

$F_a = 44685 - 14940 - 14715 = 15030\text{N}$

soit $\gamma = 15030 / (150000 + 0.07 \cdot 150000) = \mathbf{0.093m/s^2}$

Application numérique motorisation : énoncé

Une automotrice 4 caisses de masse en charge normale (M_S) 170T doit être capable d'accélérer en palier et en ligne droite à 1m/s^2 aux basses vitesses

La masse à l'essieu maximale autorisée est de 18T et la sollicitation d'adhérence ne doit pas dépasser 19% en traction.

Pour réduire les coûts il convient de minimiser le nombre total d'essieux (n) de la rame et le nombre d'essieux motorisés (m).

On supposera que la charge à l'essieu Q est uniformément répartie le long de la rame que les bogies soient moteurs ou porteurs.

On peut prendre $g = 9.81\text{m/s}^2$, les masses tournantes (M_t) sont équivalentes à 10T.

On négligera ici la résistance à l'avancement aux basses vitesses

Trouver n et m qui optimisent le coût de la rame,

Dessiner la rame 4 caisses avec ses bogies, indiquer les bogies moteurs



La Traction électrique

Marc Debruyne

Application numérique : réponse

Calcul du nombre total d'essieux n

La masse à l'essieu M_S/n doit être inférieure à 18T soit $n > 170/18 = 9.44$ on prendra donc un nombre entier d'essieux juste supérieur soit **$n=10$** (5 bogies articulés à 2 essieux)

Calcul du nombre d'essieux moteurs m

L'effort total à appliquer aux jantes est $F_{J\text{-tot}} = (M_S + M_t) * \gamma = (170 + 10) * 1 = 180\text{kN}$ (RAV négligée ici)

$F_{J\text{-tot}} = m * F_j$, F_j effort aux jantes sur un essieu moteur

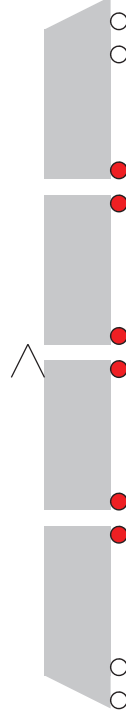
La sollicitation d'adhérence μ ne doit pas excéder μ_{max} 19%

$\mu = F_j / Q$ soit $\mu = F_j / (M_S * g) * n$ ou $\mu = F_{J\text{-tot}} / (m * M_S * g) * n$

on en déduit que m doit être supérieur à $F_{J\text{-tot}} / (m * M_S * g) * n / \mu_{\text{max}}$

$m > 180 * 10 / (0.19 * 170 * 9.81) = 5.68$ soit **$m=6$**

La motorisation de la rame est de 60% avec 3 bogies moteurs sur 5



La Traction électrique

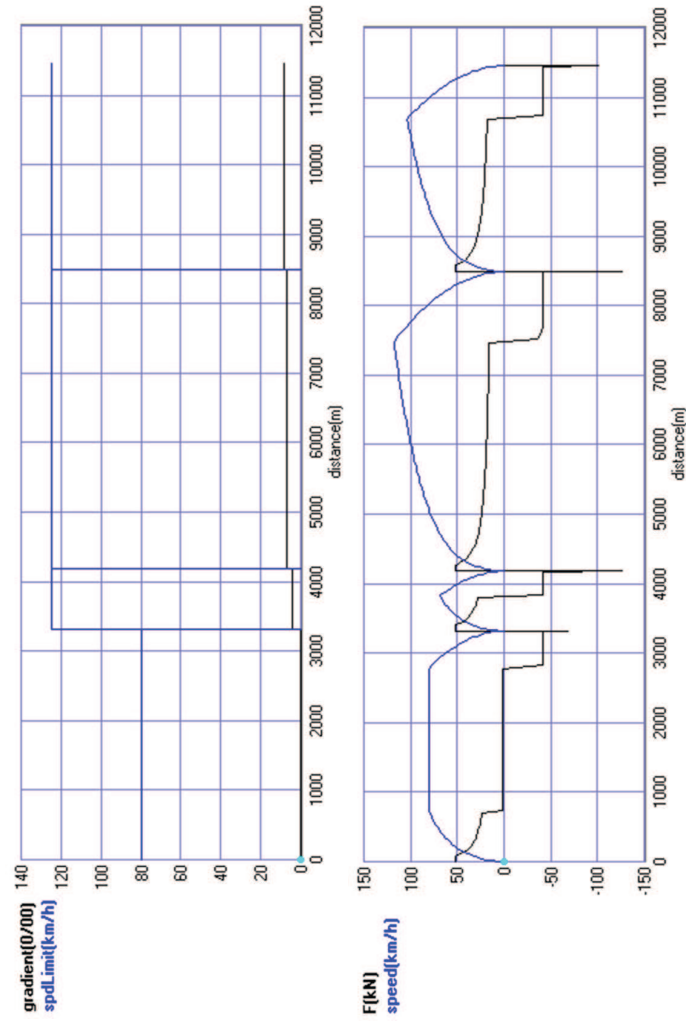
Marc Debruyne

Calculs de dynamique des trains

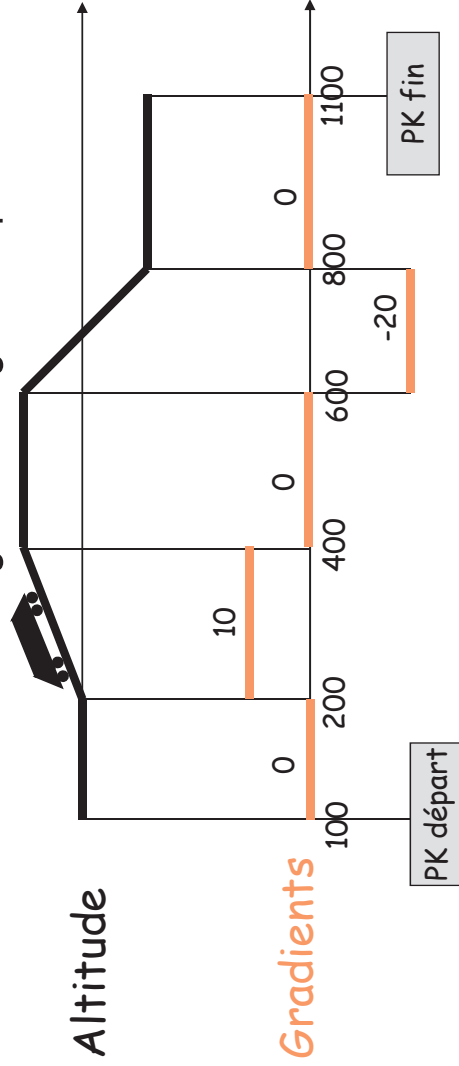


A quoi sert la dynamique des trains?

Calcul cinématique : temps de parcours, accélération, vitesse, distance, efforts sur parcours

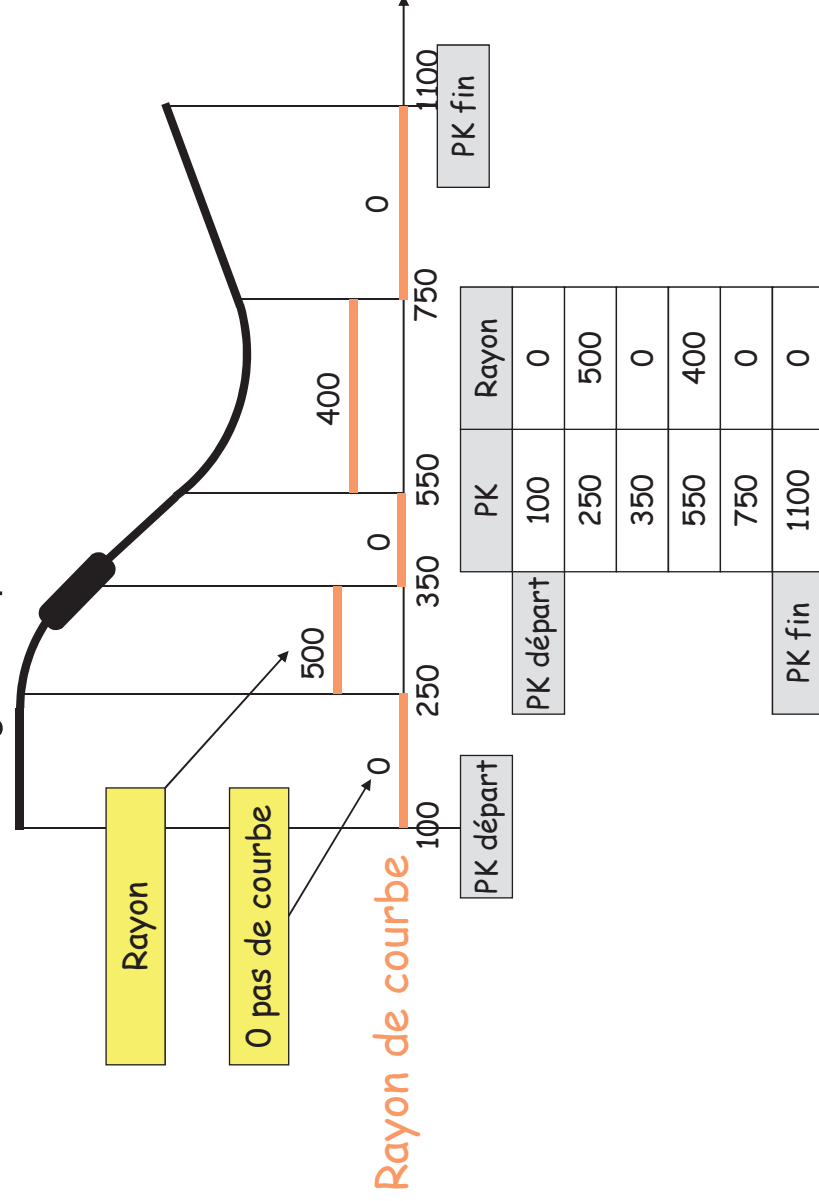


Profil de ligne en long sur le parcours

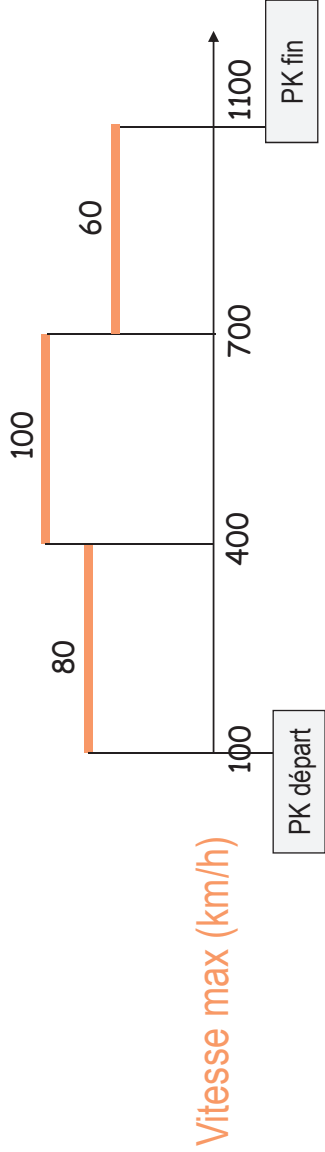


PK départ	PK	Gradient
	100	0
	200	10
	400	0
	600	-20
	800	10
PK fin	1100	0

Profil de ligne en plan Courbes



Vitesses maximale de la ligne



PK départ	PK	V _{max}
	100	80
	400	100
	700	60
PK fin	1100	0

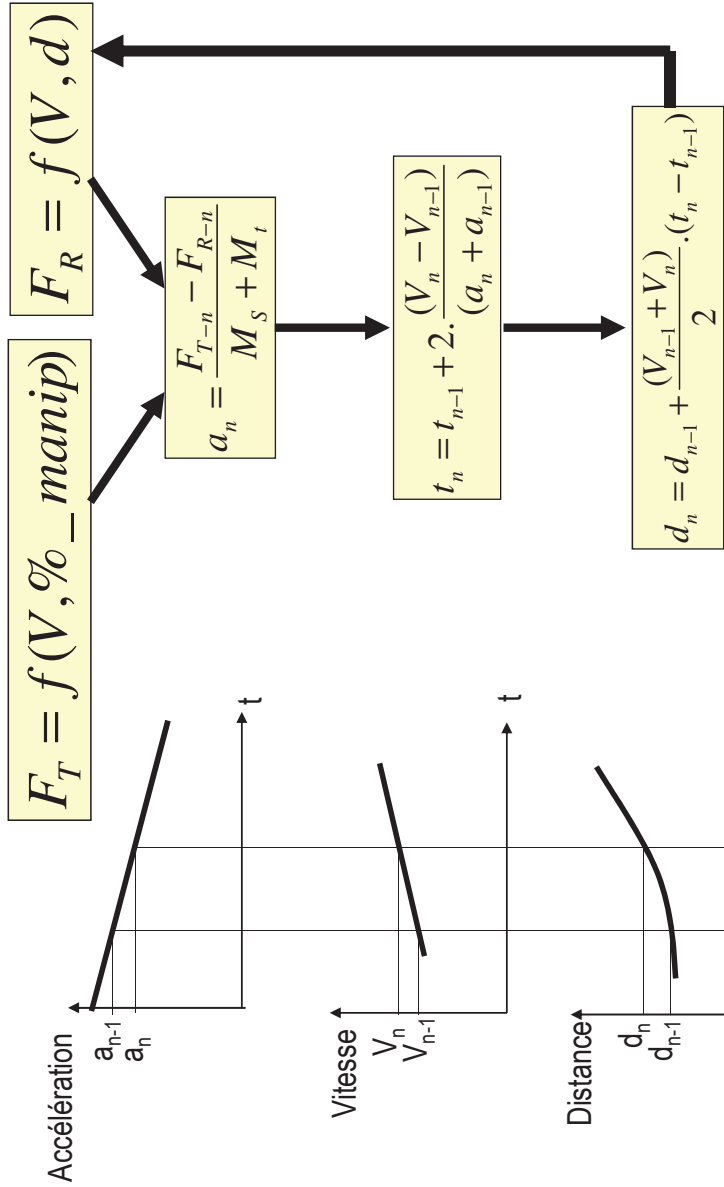
Attention la vitesse opérationnelle fixée par l'opérateur peut être inférieure à la vitesse maximale de la ligne



La Traction électrique

Marc Debruyne

Principe du calcul cinématique



La Traction électrique

Marc Debruyne

Calculs temps, vitesse, distance fonction du type de pas de calcul

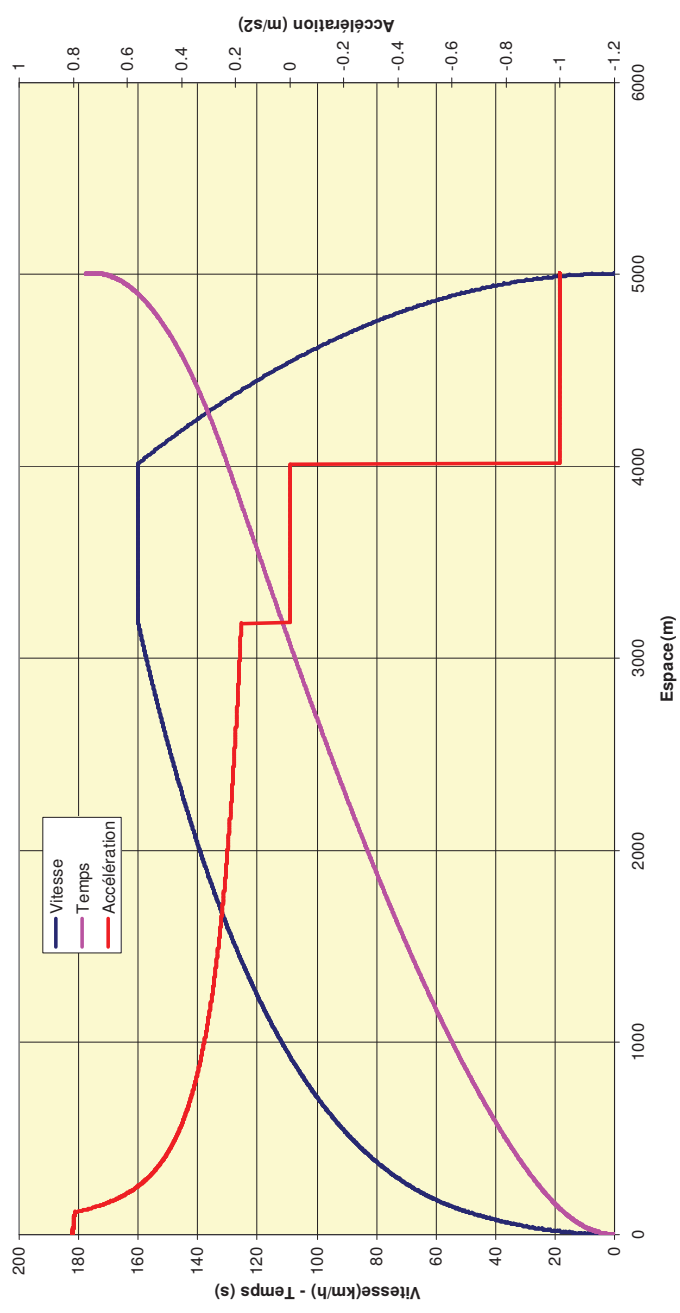
Pas de calcul en Δt	Pas de calcul en Δv	Pas de calcul en Δd
$t_n = t_{n-1} + \Delta t$	$t_n = t_{n-1} + \frac{2}{a_n + a_{n-1}} \cdot \Delta v$	$t_n = t_{n-1} + \frac{-v_{n-1} + \sqrt{v_{n-1}^2 + 2a_{n-1} \cdot \Delta d}}{a_{n-1}}$
$v_n = v_{n-1} + \frac{(a_{n-1} + a_n)}{2} \cdot \Delta t$	$v_n = v_{n-1} + \Delta v$	$v_n = v_{n-1} + a_{n-1}(t_n - t_{n-1})$
$d_n = d_{n-1} + \frac{v_n + v_{n-1}}{2} \cdot \Delta t$	$d_n = d_{n-1} + (v_{n-1} + \frac{\Delta v}{2}) \cdot (t_n - t_{n-1})$	$d_n = d_{n-1} + \Delta d$



La Traction électrique

Marc Debruyne

Exemple de calcul t, d, a pour une automotrice



La Traction électrique

Marc Debruyne

Les données d'entrée pour définir la chaîne de traction

Profil de ligne	Matériel roulant	Mode de conduite
Parcours Courbes Gradient Temps d'arrêts en gares Temps d'arrêt bout de ligne Vitesse maxi de la ligne	RAV train Masse train Longueur train Masses tournantes Nombre d'essieu (Davies) Nombre voiture (Davies) Surface frontale (Davies) Modes normal-dégradé-charges Courbe effort-vitesse traction Courbe effort-vitesse freinage	Vitesse limite autorisée Accélération max (m/s^2) Décélération max (m/s^2) Jerk max (m/s^3): dérivée de l'accélération Marche tendue Temps parcours minimum Marche détendue avec marche sur l'erre Marche détendue avec V limitée

Informations du client (opérateur-infrastructure)

Informations de l'ensemblier train

Informations du concepteur de la chaîne de traction



La Traction électrique

Marc Debruyne

Les données de sortie

Cinématique <small>fonction du temps ou de la distance</small>	Électrique	Thermique	Énergétique
Temps de parcours Calcul d'horaires Distance parcourue Vitesse Accélération Effort total aux jantes Effort électrique Effort mécanique Résistance à l'avancement	Courant-Tension-Puissance Pertes électriques Moteur Transformateur Onduleur PMCF Hacheur Condensateur-Self Harmoniques courants tensions	Températures •Moteurs •Transformateurs •Semi-conducteurs Cyclage thermique IGBT	Énergie totale Énergie traction Énergie freinage



La Traction électrique

Marc Debruyne

Simulation de parcours d'une automotrice

Profil de ligne

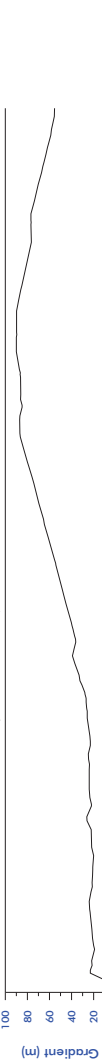


Diagramme vitesse suburbain arrêts fréquents

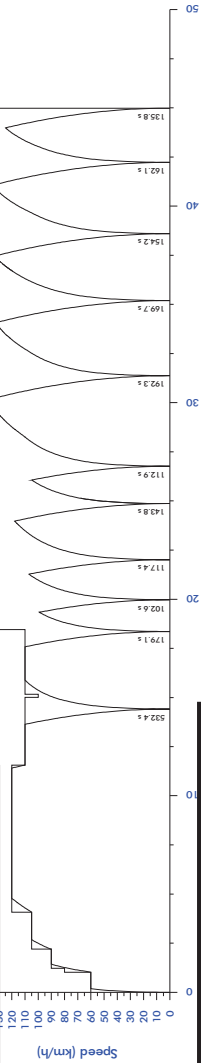
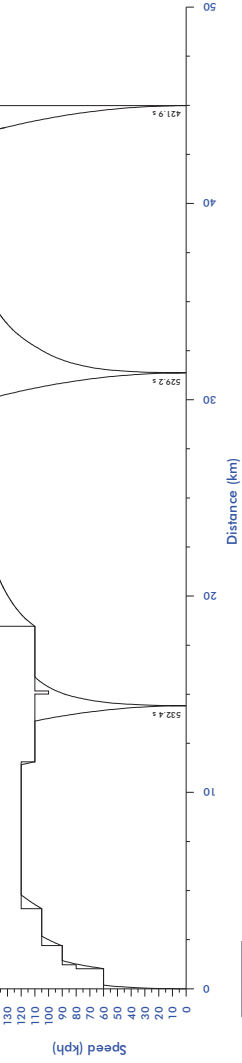


Diagramme vitesse Intercity vitesse moyenne élevée



La Traction électrique

Marc Debruyne

Simulation de parcours : Analyse de consommation

	Suburbain	Intercity
Temps	33 min	25 min
Energie absorbée traction	805 kwh	480 kwh
Energie récupérée freinage	-380 kwh	-120 kwh
Energie totale consommée	425 kwh	360 kwh

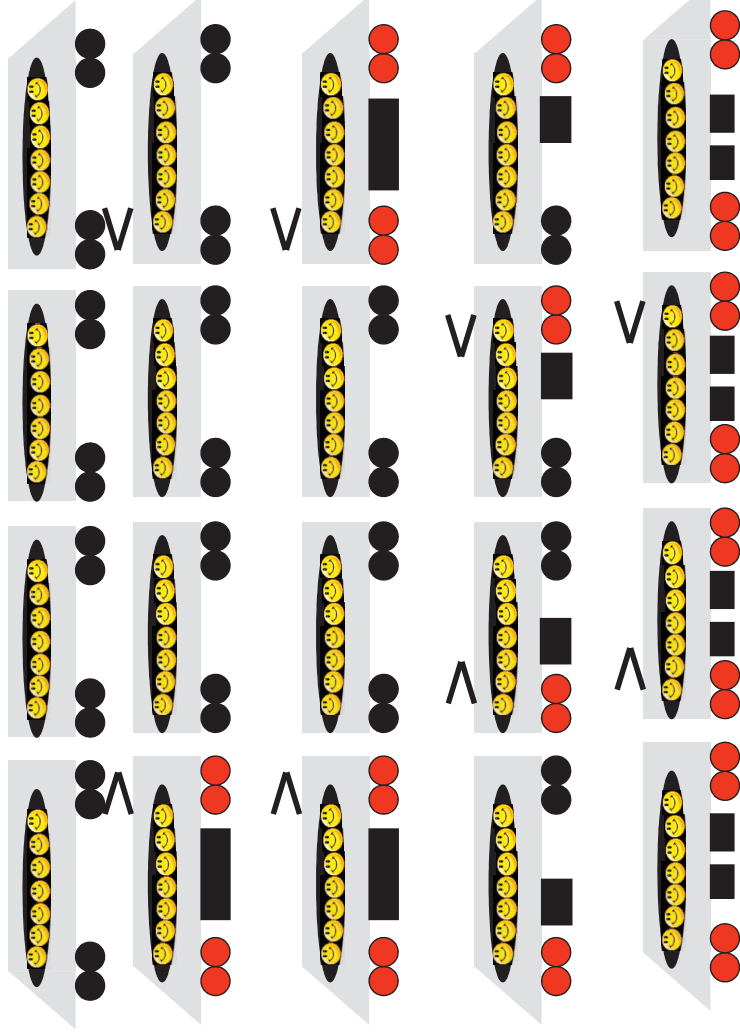
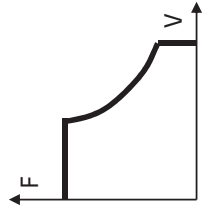
Energie totale consommée	Suburbain	Intercity
* Aérodynamisme $CV^2/2$	-14%	-19%
* 90% Masse train	-23%	-11%
* $CV^2/2 + 90\%$ masse	-32%	-29%
* Vitesse limite 100 kph	-26% (+2 min)	-29% (+5 min)



La Traction électrique

Marc Debruyne

Motoriser un train ou comment repartir l'effort de traction



ALSTOM

La Traction électrique

Marc Debruyne

Compromis à trouver entre ces 4 paramètres clés

Minimiser chaque paramètre

Coût

Masse Volume
par caisse

Sollicitation
de l'adhérence

Dégradation
des performances
en cas de perte CdT

ALSTOM

La Traction électrique

Marc Debruyne

Motoriser un train- Optimiser les paramètres clés

