

50376  
1974  
150

50376  
1974  
150

# THÈSE

présentée a

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

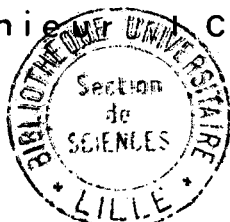
DOCTEUR INGÉNIEUR

Spécialité Electronique

par

**Pierre-Joseph BEAURENT**

Ingénieur C.A.M.



**RÉALISATION ET EXPLOITATION D'UN  
MODÈLE DE SIMULATION NUMÉRIQUE  
CONCERNANT UN VÉHICULE DE TRANSPORT  
URBAIN AUTOMATISÉ A TRACTION ÉLECTRIQUE.  
APPLICATION AU SYSTÈME V.A.L.**

Soutenue le 30 Octobre 1974 , devant la COMMISSION d'EXAMEN

MM. R. GABILLARD	Président
F. LOUAGE	Examineur
C. MAIZIÈRES	Examineur
M. FICHEUR	Invité

A ma femme,

A mon fils,

*Ce travail a été effectué au laboratoire de Radiopropagation et d'Electronique de l'Université des Sciences et Techniques de LILLE, sous la direction de Monsieur le Professeur GABILLARD.*

*J'exprime ma plus profonde gratitude à Monsieur le Professeur GABILLARD pour les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail et l'intérêt qu'il a su m'y faire découvrir.*

*Je suis vivement reconnaissant à Monsieur le Professeur LOUAGE de l'aide constante et précieuse qu'il m'a apportée en examinant mon travail.*

*Je remercie Monsieur le Professeur MAIZIERES et Monsieur FICHEUR, Directeur des Projets Techniques de l'EPALE, de m'avoir fait l'honneur d'être membres de mon jury.*

*Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe de Monsieur le Professeur GABILLARD, pour l'ambiance sympathique qu'ils y créent et leur souci de disponibilité.*

*Mes remerciements s'adressent également à Madame PASQUIER pour la dactylographie de ce mémoire et à Messieurs DEHORTER et LÉMAIRE pour son tirage.*

## SOMMAIRE

---

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	
PRESENTATION DE L'ETUDE D'UN SYSTEME DE TRANSPORT A TRACTION ELECTRIQUE AUTOMATIQUE	
1. Etude paramétrique préliminaire	1
2. Nécessité d'un contrôle rapide de la validité des principaux choix technologiques	3
3. Présentation des types de moteurs électriques et de leurs organes de commande actuellement les plus appropriés	4
<u>1ère PARTIE</u>	
MODELISATION NUMERIQUE D'UNE RAME SE DEPLACANT SUR UN PARCOURS DONNE	
<u>CHAPITRE. I.</u>	
Différents calculs à effectuer par simulation	8
<u>CHAPITRE. II.</u>	
Consignes et diagramme de marche	9
II.a. Description du parcours	9
II.b. Consignes de vitesse et d'accélération	13
II.c. Diagramme de marche théorique	14
<u>CHAPITRE. III.</u>	
Transformations de l'énergie électrique dans la rame	15
III.a. Expressions normales et valeurs limites des énergies électrique et mécanique	17

III.b. Principe de détermination de l'accélération réelle de la rame à une certaine vitesse	19
---	----

#### CHAPITRE.IV.

Equations du mouvement de la rame pour les principaux régimes de marche	22
---	----

IV.a. Les régimes de marche	23
-----------------------------	----

IV.b. Equations liant la distance parcourue, le temps de parcours, la vitesse et l'accélération de la rame	27
--	----

IV.c. Logique du calcul cinématique. Prédétermination des différents régimes de marche	30
--	----

#### CHAPITRE.V.

Equations mécaniques relatives à la rame	38
--	----

V.a. Détermination du couple moteur nécessaire à la réalisation des consignes	44
---	----

V.b. Détermination de l'accélération réelle de la rame à partir du couple moteur réel	44
---	----

#### CHAPITRE.VI.

Equations électriques relatives à la rame	45
---	----

VI.a. Rame comportant des moteurs série à courant continu	45
---	----

VI.a.1. Mode de commande des moteurs	47
--------------------------------------	----

VI.a.2. Simulation numérique	48
------------------------------	----

VI.a.3. Détermination du couple moteur possible à une certaine vitesse de la rame	56
---	----

VI.a.4. Détermination des caractéristiques tension et intensité du courant des moteurs à partir du couple moteur réel	58
---	----

VI.b. Rame comportant des moteurs asynchrones	60
---	----

VI.b.1. Mode de commande des moteurs	61
--------------------------------------	----

VI.b.2. Simulation numérique	64
------------------------------	----

VI.b.3. Détermination du couple moteur possible à une certaine vitesse de la rame	74
---	----

VI.b.4. Détermination des caractéristiques tension, intensité et fréquence du courant d'alimentation des moteurs à partir du couple moteur réel	75
---	----

## CHAPITRE.VII.

Calcul de la consommation en énergie électrique de la rame	79
VII.a. Energie totale	79
VII.b. Energie de traction pour rame à moteurs série	80
VII.c. Energie de traction pour rame à moteurs asynchrones	81

## CHAPITRE.VIII.

Programme de simulation	84
VIII.a. Fonctionnement	84
VIII.b. Possibilités	86
VIII.c. Limites	87
VIII.d. Performances	87
VIII.e. Illustrations	88

## 2ème PARTIE

### APPLICATIONS DE LA MODELISATION

#### ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUENCANT LE TEMPS DE PARCOURS ET LA CONSOMMATION ENERGETIQUE RELATIFS AU PARCOURS D'UNE RAME DU VAL SUR UNE INTERSTATION.

I.1. Résultats de l'étude paramétrique appliquée au VAL	89
I.2. Valeurs numériques nécessaires à la simulation de la rame comportant des moteurs série du type GLM 0332 à commande par hâcheur	91
I.3. Influence des principaux paramètres	95
I.3.a. La masse transportée	96
I.3.b. Les pentes de la voie	99
I.3.c. Les rayons de courbure de la voie	101
I.3.d. Les distances d'interstations	103
I.3.e. La limitation de courant hâcheur	105
I.3.f. La limitation de Tension réseau	107
I.3.g. Le taux de shuntage des moteurs	109
I.3.h. Le rapport de transmission	112
I.3.i. Les vitesses de consigne	113

CONCLUSIONS	115
-------------	-----

### ANNEXES

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

I N T R O D U C T I O N

PRESENTATION DE L'ETUDE D'UN SYSTEME DE TRANSPORT A TRACTION  
ELECTRIQUE AUTOMATIQUE

## I. ETUDE PARAMETRIQUE PRELIMINAIRE

Cette étude originale, réalisée par l'EPALE<sup>(1)</sup> et appliquée au VAL<sup>(2)</sup>, consiste à fixer, par calculs d'optimisation, les paramètres indépendants d'un système de transport, sans faire d'hypothèses sur les choix technologiques.

L'EPALE présente le système de transport de la façon suivante (réf.bibl.A.4.) :

..... " - *les données*, extérieures au système, à savoir :

- . la demande et sa configuration quantitative et qualitative (nombre et caractéristiques des voyageurs)
- . le tracé en plan et en profil de la voie, l'emplacement des stations (données urbaines)

- *les niveaux de qualité*, intérieurs au système.

C'est l'ensemble des éléments qui définissent la QUALITE de SERVICE et dont l'établissement peut résulter de décisions de nature politique. Il s'agit :

- . d'éléments Temps (temps de parcours, fréquence des rames, ...)
- . du pourcentage de places assises en charge normale
- . de la surface par voyageur assis et debout
- . des caractéristiques cinématiques du confort (taux de décélération et d'accélération, flèche de la voie)
- . des niveaux de nuisances internes et externes aux véhicules, nuisances sonores en particulier.

- *les paramètres*, indépendants, tels que :

- . la largeur et la longueur des voitures
- . Le nombre de places desservies par une porte

..... "



L'étude paramétrique détermine la meilleure combinaison entre niveaux de qualité de service et paramètres, pour laquelle la somme des coûts d'investissement et d'exploitation capitalisée est minimale.

Le système de transport peut ainsi être défini par des CARACTERISTIQUES FONCTIONNELLES OPTIMALES.

---

(1) EPALE : Etablissement Public d'Aménagement de LILLE-EST

(2) VAL : Système de transport devant relier VILLENEUVE D'ASCQ à LILLE

## 2. NECESSITE D'UN CONTROLE RAPIDE DE LA VALIDITE DES PRINCIPAUX CHOIX TECHNOLOGIQUES

Chacun des équipements du système de transport doit respecter un CAHIER DES CHARGES qui satisfasse les résultats de l'étude paramétrique.

Les constructeurs disposent parfois de modèles numériques simulant les équipements de traction électrique ; ces modèles, généralement lourds puisque destinés à être très précis, restent très spécialisés.

Or, au niveau d'une préétude, il est surtout nécessaire de définir en premier lieu l'ENSEMBLE du système de transport et de pouvoir déterminer RAPIDEMENT l'influence des principaux choix technologiques (par exemple, celle du choix des moteurs et de leurs conditions de fonctionnement). Par la suite, afin de coordonner valablement l'avancement des travaux, il est utile de pouvoir déterminer les conséquences de l'évolution imprévue d'un des équipements (le plus souvent, et on peut le regretter, ces évolutions ne sont constatées que lors d'essais grandeur nature).

Nous nous sommes donc efforcés d'élaborer un modèle, numérique, facilement utilisable, permettant de contrôler les principales caractéristiques d'un véhicule de transport se déplaçant sur un parcours donné.

### 3. PRESENTATION DES TYPES DE MOTEURS ELECTRIQUES ET DE LEURS ORGANES DE COMMANDE ACTUELLEMENT LES PLUS APPROPRIES

Les deux types de réseaux d'alimentation en énergie électrique dont nous disposons sont :

- . à courant continu
- . à courant alternatif.

Actuellement, les moteurs électriques les plus appropriés à la traction sont :

- . le moteur série à courant continu
- . le moteur asynchrone à courant alternatif.

Il est possible d'adapter chaque type de moteur à chaque type de réseau grâce à des CONVERTISSEURS d'énergie, à thyristors, organes se prêtant très bien à la commande automatique et pouvant être conçus totalement réversibles (fig.1.) (c'est-à-dire pouvant assurer la traction et le freinage électrique dans les deux sens de marche de la rame).

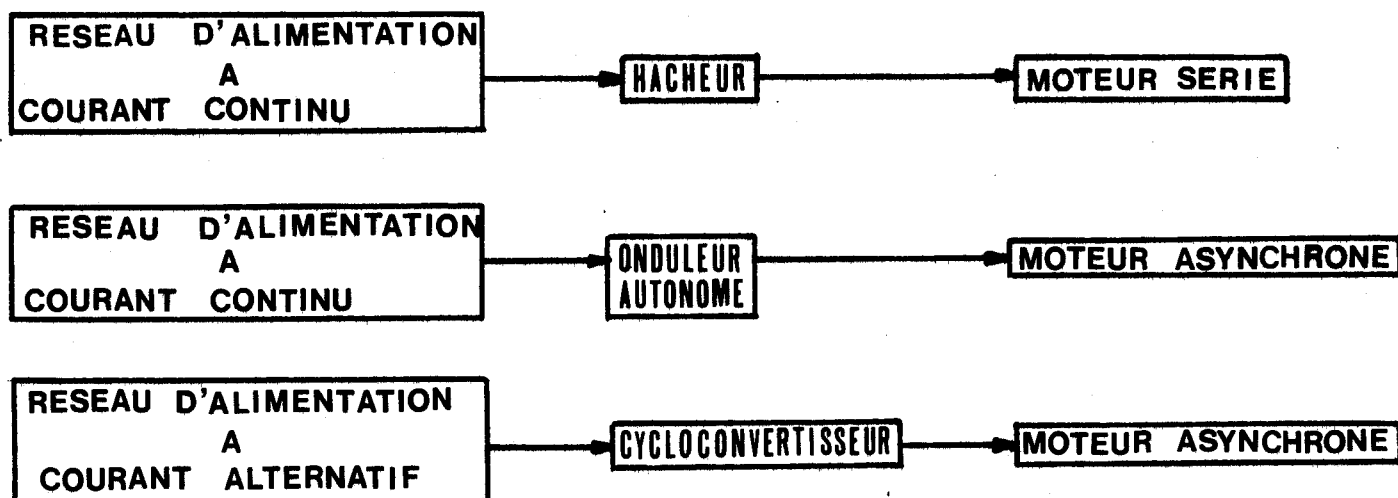


FIG.1

a) Système HACHEUR-Moteur série (réf. Bibl. B)

Un Hâcheur est destiné à régler un courant continu d'utilisation à partir d'une source de tension continue constante, en découpant cette tension. Il utilise à cet effet un thyristor à commutation forcée (fig.2.).

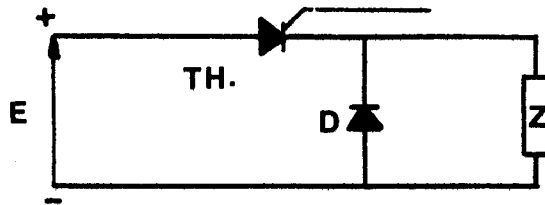


FIG. 2

Si la charge Z est un moteur série, le hâcheur fournit à ses bornes une tension continue de valeur moyenne réglable et fonctionne en transformateur de courant continu (fig.3.).

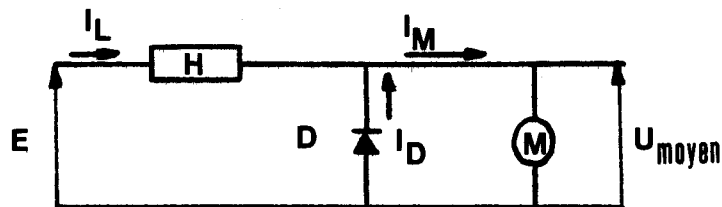


FIG. 3

Le système peut être réversible : le moteur fonctionnant en génératrice renvoie de l'énergie électrique au réseau, moyennant un changement de position du hâcheur (fig.4.).

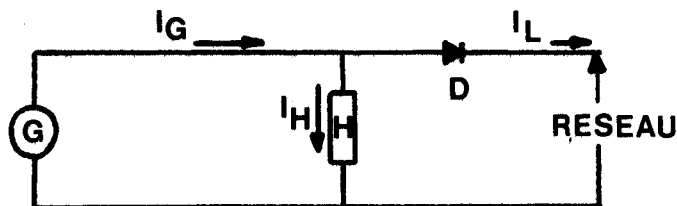


FIG. 4

b) Système CYCLOCONVERTISSEUR ou ONDULEUR AUTONOME - Moteur asynchrone -  
(réf. bibl. C)

Cycloconvertisseur et onduleur autonome permettent de faire varier la fréquence et l'amplitude de la tension alternative appliquée aux phases du moteur asynchrone.

L'énergie du moteur fonctionnant en génératrice peut également être renvoyée au réseau.

Le CYCLOCONVERTISSEUR (fig.5.), alimenté directement par le réseau alternatif, est composé de thyristors à commutation naturelle par le réseau.

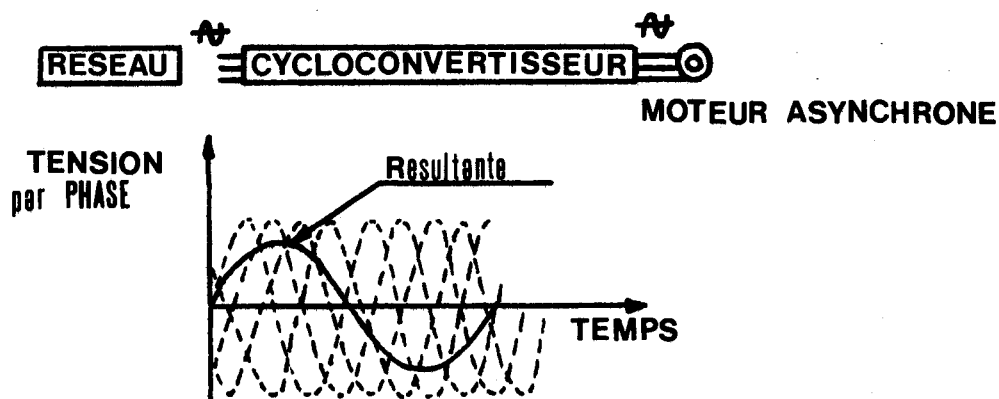


FIG. 5

La limite en fréquence de la tension alternative de sortie correspond au tiers de la fréquence disponible au réseau (pour un réseau à 50Hz, la fréquence maximum délivrable est  $16 \frac{1}{3}$  Hz).

L'ONDULEUR AUTONOME, (fig.6.) alimenté à partir d'un réseau continu, est composé de thyristors dont la commutation doit être forcée, grâce à des circuits spéciaux d'extinction.

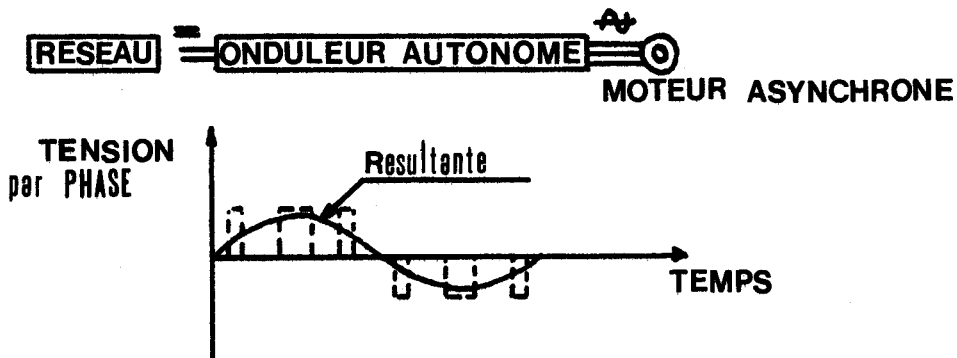


FIG. 6

La limite en fréquence de la tension alternative de sortie s'élève, actuellement, de 150 à 200Hz.

## 1ère PARTIE

### MODELISATION NUMERIQUE D'UNE RAME SE DEPLACANT SUR UN PARCOURS DONNE

#### CHAPITRES

- I *Différents calculs à effectuer par simulation*
- II *Consignes et diagramme de marche*
- III *Transformation de l'énergie électrique dans la rame*
- IV *Equations du mouvement de la rame pour les principaux régimes de marche*
- V *Equations mécaniques relatives à la rame*
- VI *Equations électriques relatives à la rame*
- VII *Calcul de la consommation en énergie électrique de la rame*
- VIII *Programme de simulation*

## CHAPITRE. I.

### DIFFERENTS CALCULS A EFFECTUER PAR SIMULATION

---

Les moteurs et leurs organes de commande doivent permettre à la rame :

- . de se déplacer sur la voie suivant certaines consignes cinématiques prévues par l'étude paramétrique et conformes à un diagramme de marche
- . d'effectuer le parcours dans certaines limites de temps et de consommation énergétique
- . de respecter le cahier des charges qui leur est propre ; limites de tension, de courant, d'échauffement ...

Afin de contrôler le comportement général de la rame, lors de son déplacement sur la voie, il est donc nécessaire, grâce à une modélisation numérique, de calculer et visualiser :

- . les paramètres cinématiques : vitesse, accélération
- . le temps de parcours et la consommation énergétique
- . les caractéristiques électriques (tension, courant, ...) des moteurs.



CHAPITRE. II.

CONSIGNES ET DIAGRAMME DE MARCHE

---

Consignes et diagrammes de marche concernent essentiellement l'aspect cinématique du déplacement de la rame sur la voie.

II.a. Description du parcours

Il est possible de découper le trajet total que devra parcourir la rame en un certain nombre d'intervalles caractéristiques : interstations, tronçons et sous-tronçons.

- Découpage du trajet total en interstations

Le parcours est décomposé en intervalles séparant les stations. Ces interstations, de longueur variable, sont parcourues par la rame en des temps de parcours variables (fig.7.).

Soit  $i$  l'indice relatif à l'interstation.

On notera :  $X_i$  les longueurs d'interstations

$T_i$  les temps de parcours correspondants

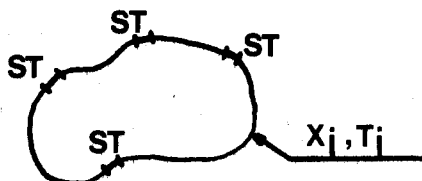


FIG.7

Soit  $T_S$  le temps d'arrêt total aux stations, déterminé par l'étude paramétrique.

La durée totale du parcours de la rame sur la ligne, de longueur  $X = \sum x_i$ , sera :

$$T = \sum T_i + T_S$$

. Découpage de l'interstation en tronçons

L'interstation est découpée en tronçons dont les rayons de courbure en plan sont constants (fig.8.).

Ces tronçons déterminent pour la rame, différentes vitesses limites à respecter, afin d'assurer sécurité et confort aux passagers.

Soit  $j$  l'indice relatif au tronçon.

- On notera :
- $X_j$  les longueurs des tronçons
  - $T_j$  les temps de parcours correspondants
  - $R_j$  les rayons en plan
  - $V_{Lj}$  les vitesses limites à respecter
  - $v_j$  les vitesses instantanées de la rame.

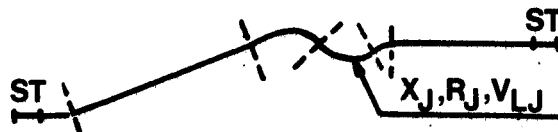


FIG.8

On écrira que :

$$X_i = \sum X_j$$

$$T_i = \sum T_j$$

La formule (cf.réf.bibl.A.4) déterminant les vitesses limites, dues aux rayons de courbure est :

. pour un profil transversal de voie ne comportant pas de dévers :

$$V_{1j} = \sqrt{0,13 g \cdot R_j}$$

. pour un profil transversal de voie comportant un dévers :

$$V_{1j} = \sqrt{0,23 g \cdot R_j}$$

g étant l'accélération de la pesanteur.

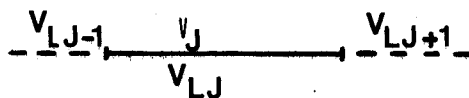
Lorsque les tronçons sont rectilignes (rayon de courbure infini), on limite la vitesse de la rame à la vitesse de consigne prévue.

Alors :

$$V_{1j} = V_{\text{consigne}}$$

Il apparaît qu'à tout instant, la vitesse de la rame  $v_j$ , doit être compatible,

- non seulement avec la vitesse limite  $V_{1j}$  du tronçon j
- mais aussi avec les vitesses limites  $V_{1j-1}$  et  $V_{1j+1}$  des tronçons adjacents j-1 et j+1.



Récapitulons sous forme de tableau les différents cas possibles :

$V_{1j-1} \geq V_{1j}$	La rame, ayant dû ralentir à la sortie du tronçon j-1 à la vitesse $V_{1j}$ , aura, sur tout le tronçon j, une vitesse $v_j \leq V_{1j}$
$V_{1j-1} < V_{1j}$	La rame entrera dans le tronçon j à la vitesse $V_{1j-1}$ et accélèrera au début de ce tronçon afin d'atteindre la vitesse limite $V_{1j}$
$V_{1j+1} \geq V_{1j}$	La rame n'observera aucune phase de ralentissement à la sortie du tronçon j
$V_{1j+1} < V_{1j}$	A la sortie du tronçon j, la rame devra ralentir afin d'atteindre la vitesse $V_{1j+1}$ à l'entrée du tronçon j+1

Le temps de parcours  $T_j$  de la rame sur chaque tronçon  $j$  est donc la somme des temps d'accélération, de ralentissement et de régime à vitesse limite constante ; ces différentes phases de marche assurent la compatibilité des vitesses.

Ainsi :

$$T_j = T_{\text{accélération}} + T_{V_{lj}} + T_{\text{freinage}}$$

Remarque

A proximité des stations, on aura :

- pour un départ de station :  $V_{lj-1} = 0$
- pour une arrivée en station :  $V_{lj+1} = 0$

. Découpage du tronçon en sous-tronçons

Chaque tronçon peut être découpé en sous-tronçons dont les pentes sont constantes (fig.9.).

Soit  $kj$  l'indice relatif au sous-tronçon.

On notera :

- $X_{kj}$  les longueurs des sous-tronçons, cumulées sur le tronçon  $j$
- $\alpha_{kj}$  les pentes correspondantes.

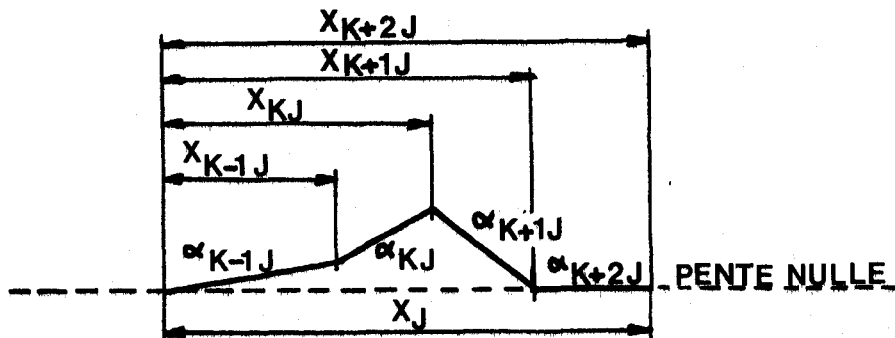


FIG.9

## II.b. Consignes de vitesse et d'accélération

Les consignes reçues par la rame concernent deux de ses paramètres cinématiques : sa vitesse et son accélération.

### . Consignes de vitesse

Ce sont les vitesses limites définies précédemment :

- . les vitesses limites dues aux rayons de courbure de la voie ( $V_{lj}$ )
- . les vitesses limites de consigne pour un alignement droit :
  - vitesse de régime en marche normale ( $V_{régime}$ )
  - vitesse maximum en régime accéléré, permettant de compenser une augmentation accidentelle du temps d'arrêt en stations ( $V_{max}$ ).

### . Consignes d'accélération

Sur chaque tronçon apparaissent des périodes d'accélération, de décélération et de marche à vitesse constante .

. On limite, pour des raisons de confort, la valeur du taux d'accélération et de décélération.

On notera  $\gamma_{max}$  la consigne d'accélération maximum admise en traction comme en freinage.

. Egalement pour des raisons de confort, on limite la variation des accélérations ou décélérations en fonction du temps.

On notera  $\gamma'_{max}$  la valeur maximum permise de la dérivée d'accélération par rapport au temps :

$$\gamma'_{max} = \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)_{max}$$

$\gamma$  représentant l'accélération instantanée  
t le temps.

Cette consigne est appelée LIMITATION DE JERK.

### II.c. Diagramme de marche théorique

Les consignes, dont les valeurs sont prévues par l'étude paramétrique, sont réalisées grâce aux organes d'asservissement, de pilotage (réf.bibl.A.5.) et de commande des moteurs.

Représentons le diagramme de marche de consigne pour la rame sur un tronçon (fig.10.) ; il est composé de trois régimes principaux :

- . TRACTION
- . VITESSE CONSTANTE
- . FREINAGE.

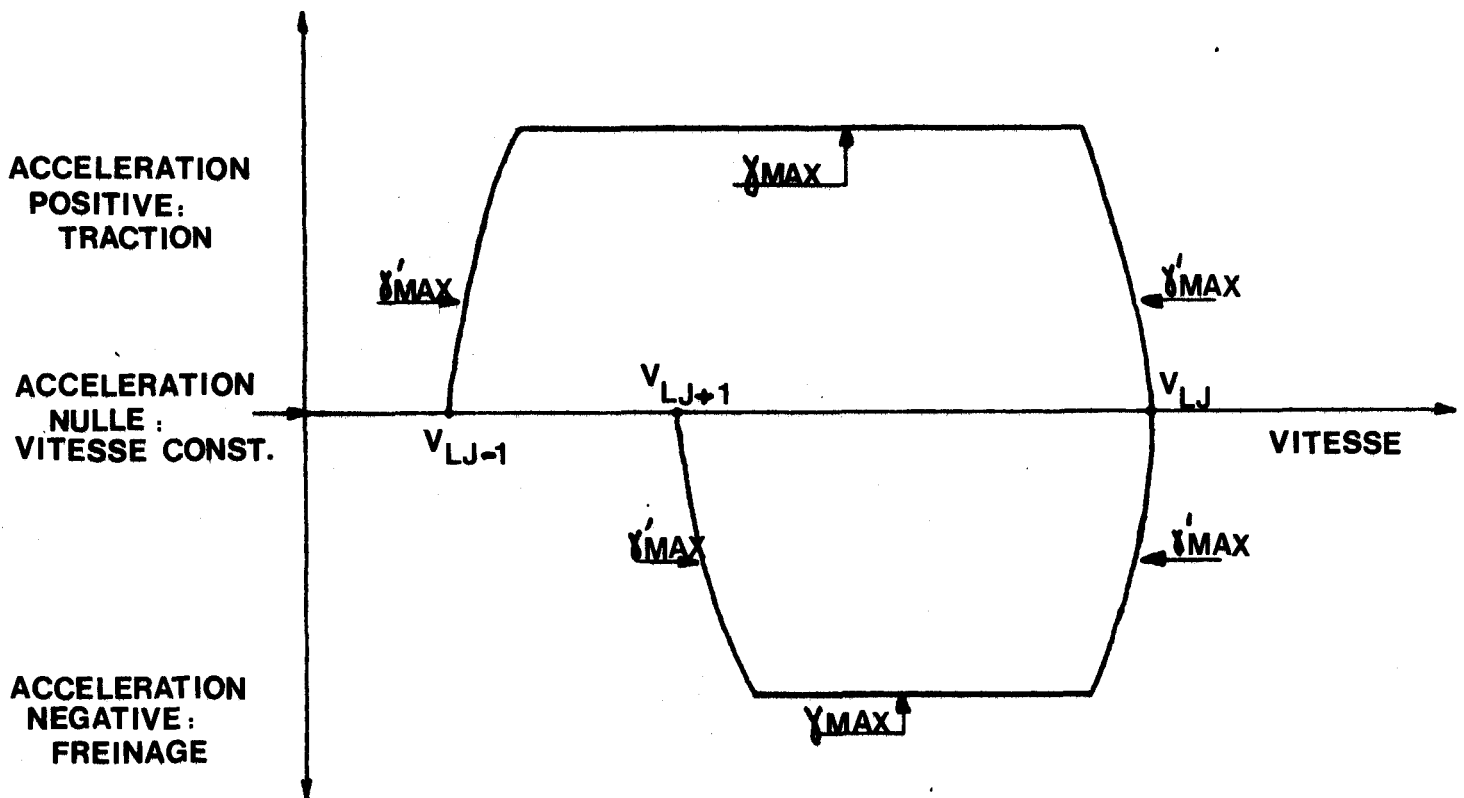


FIG.10 DIAGRAMME DE MARCHÉ DE CONSIGNE (EXEMPLE)

### CHAPITRE. III.

#### TRANSFORMATION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LA RAME

---

On peut envisager la rame comme un système assurant plusieurs fonctions (cf. fig.11).

. *le réglage de l'énergie électrique*, venant des sources d'énergie (réseau) et transmise aux moteurs, est réalisé par les organes de commande des moteurs (hâcheur, cycloconvertisseur ou onduleur).

. *la conversion de l'énergie électrique réglée* en énergie mécanique est réalisée par les moteurs, et délivrée sous la forme d'une vitesse de rotation et d'un couple moteur de l'arbre.

. *la transformation de l'énergie mécanique motrice* en une énergie mécanique provoquant le mouvement de la rame sur la voie, est réalisée par les organes de transmission (réducteur) et les roues.

. *l'énergie mécanique produite est utilisée pour :*

- fournir à la rame une accélération
- combattre les efforts résistants dûs au contact de la rame avec l'air et la voie.

. *la régulation* est assurée par la chaîne d'asservissements qui, comparant le comportement cinématique réel de la rame aux consignes, agit en conséquence sur les organes de commande des moteurs.

Il apparaît que l'identité entre le comportement cinématique réel de la rame et le diagramme de marche de consigne dépend fortement du choix des moteurs et de leurs organes de commande.

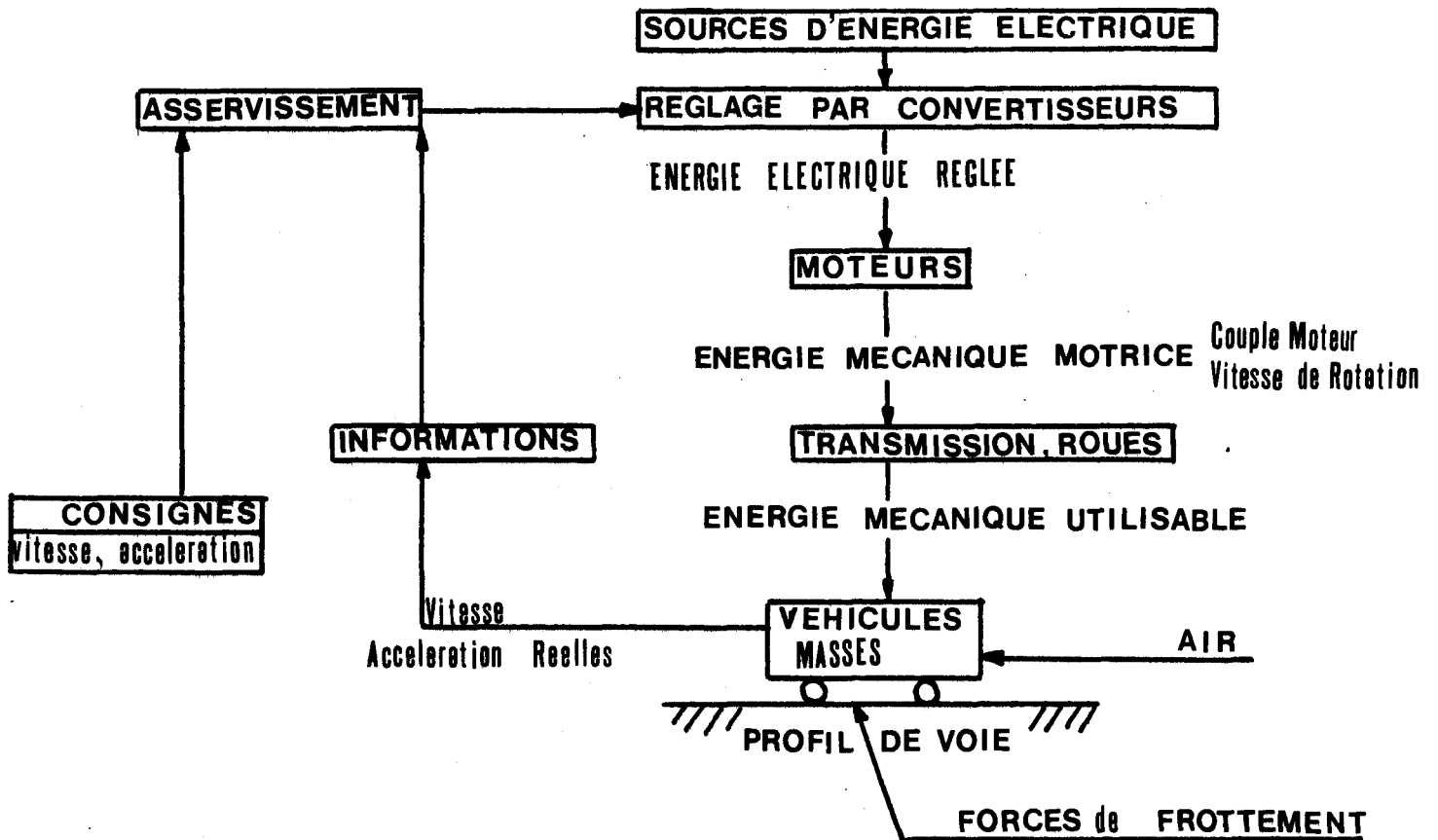


FIG.11 SCHEMA REPRESENTATIF DE LA RAME





III.a. Expressions normales et valeurs limites des énergies électrique et mécanique

. Expressions normales et transformation de l'énergie

Le choix des moteurs fixe les lois de transformation de l'énergie électrique (forme courant, tension) en énergie mécanique (forme couple moteur, vitesse de rotation de l'arbre), et donc le rendement de cette transformation.

L'utilisation de l'énergie mécanique motrice au déplacement de la rame est déterminée par :

- . la transmission : rapport et rendement
- . le véhicule : efforts d'inertie (masses à accélérer)  
efforts résistants à l'avancement (contacts Air et Voie)
- . le profil en élévation de la voie (efforts d'inertie supplémentaires dûs aux pentes).

Résumons ces formes d'énergie par le schéma de la figure.12.

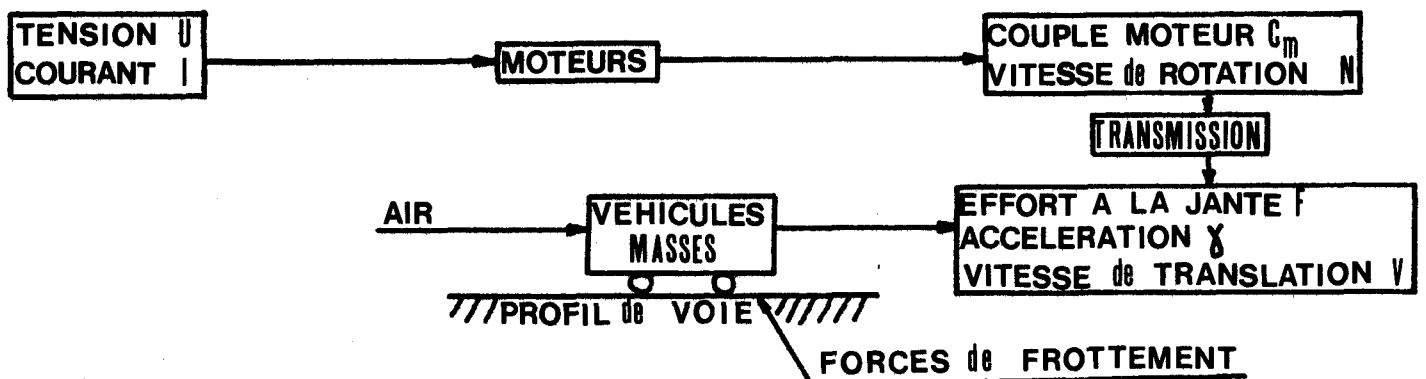


FIG.12

- Valeurs limites des énergies disponibles

Le dimensionnement prévu du réseau et des organes de commande des moteurs limite l'énergie électrique disponible.

. Limitation de tension

Le réseau d'alimentation sera susceptible de fournir, tenant compte des pertes en ligne, une tension maximum  $U_{\max}$ , aux bornes des moteurs.

. Limitation de courant

Par construction, les convertisseurs ne pourront délivrer qu'un courant maximum  $I_{\max}$  aux moteurs.

. Limitation de fréquence

La conception du réseau ou des convertisseurs limite à une valeur maximum la fréquence à laquelle peuvent être fournis Tension et Courant. Par exemple, dans le cas d'un cycloconvertisseur adapté sur un réseau alternatif, il n'est possible de fournir aux moteurs, type asynchrone, qu'une tension électrique de fréquence au plus égale au tiers de la fréquence du réseau.

Ces trois formes limites de l'énergie électrique ont donc pour conséquence de limiter l'énergie mécanique motrice. (fig.13.)

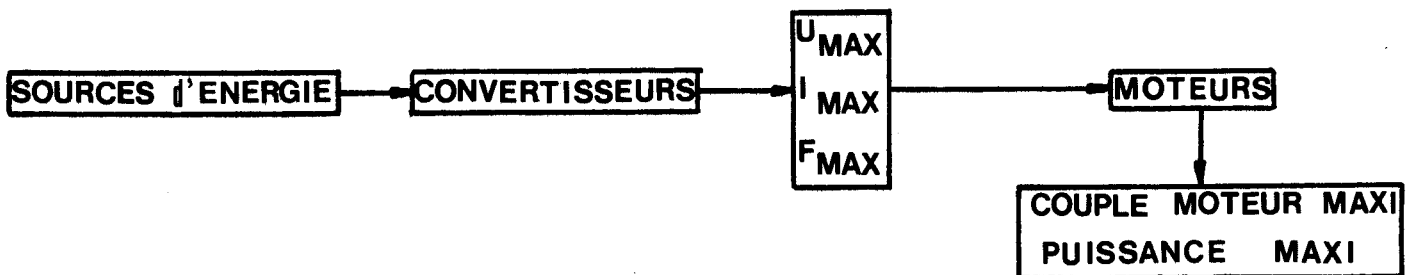


FIG.13

### III.b. Principe de détermination de l'accélération réelle de la rame à une certaine vitesse

Notation indicielle Nous affecterons par la suite :

- une grandeur réelle de l'indice r
- une grandeur exigée par les consignes de l'indice n
- une grandeur possible de l'indice p.

Supposons la rame en déplacement sur la voie avec :

- une vitesse  $V_R$
- une accélération  $\gamma_R$ .

La puissance réellement mise en jeu par la rame résulte du compromis entre :

- la puissance motrice exigée par les consignes  $P_n$
- la puissance disponible aux moteurs  $P_p$ .

On a, en effet, à tout instant :

$$P_r = \text{mini} (P_n, P_p)$$

qu'on peut écrire, en fonction de

$N_r$  vitesse de rotation de l'arbre moteur correspondant à  $V_r$

$C_m$  couple moteur :

$$C_r^m \cdot N_r = \text{mini} (C_n^m \cdot N_r, C_p^m \cdot N_r)$$

Et ainsi :

$$C_r^m = \text{mini} (C_n^m, C_p^m) \quad (1)$$

Comme nous l'exprimerons par la suite, le couple moteur équilibre à tout instant la somme des couples résistants et des couples d'inertie. La comparaison des couples moteurs  $C_n^m$  et  $C_p^m$  se faisant pour une même vitesse de rotation  $N_r$ , les couples résistants, fonctions de  $N_r$  seule, sont donc identiques, et on peut ainsi écrire :

$$\gamma_r = \text{mini} (\gamma_n, \gamma_p) \quad (2)$$

$\gamma_n$  étant l'accélération de consigne

Déterminer l'accélération réelle de la rame revient donc à comparer, à une même vitesse de translation  $V_r$ ,

le couple moteur exigé par les consignes  $C_n^m$

et le couple moteur disponible  $C_p^m$ .

Le schéma suivant (fig.14.) représente les étapes de calculs essentielles à réaliser par simulation.

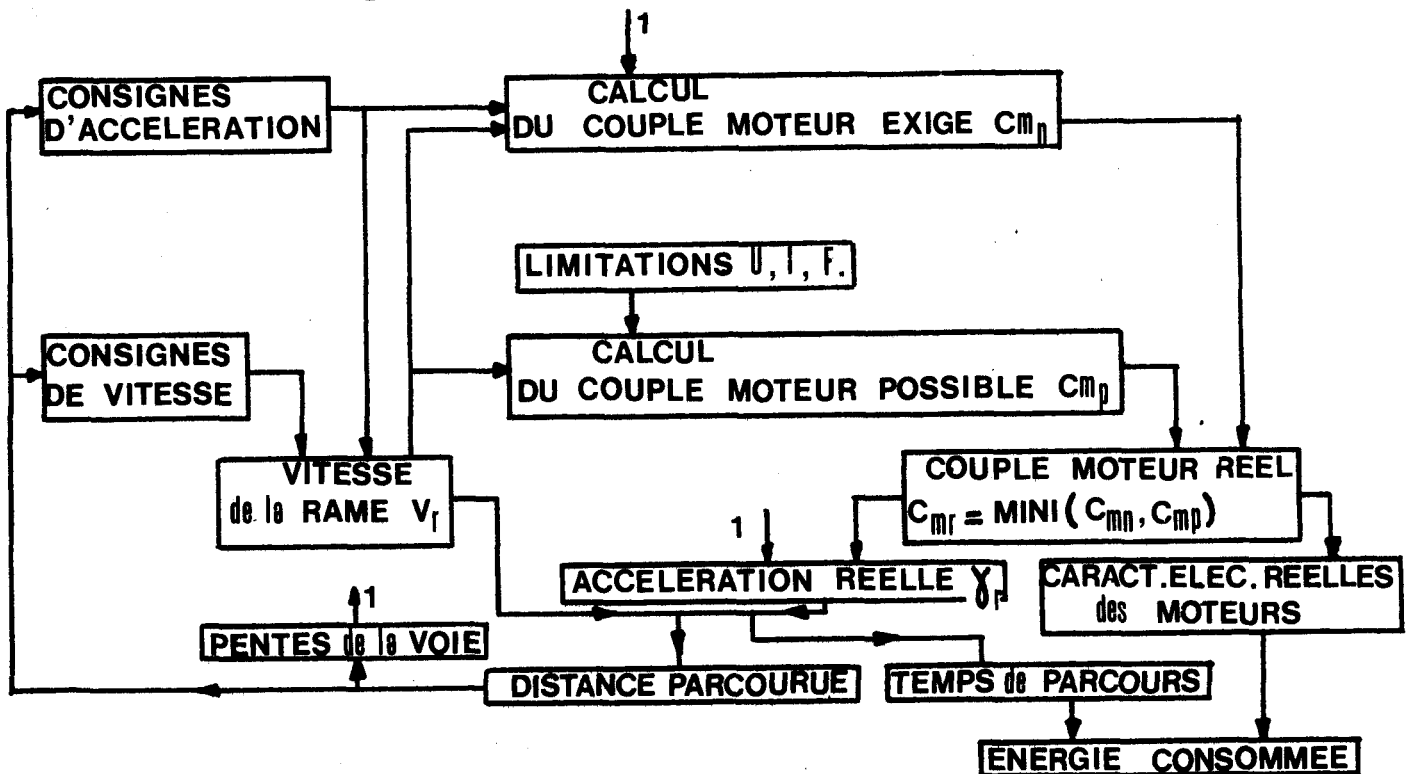


FIG.14

Il s'agit donc, par simulation numérique :

- d'établir les relations cinématiques liant vitesse et accélération réelle de la rame, distance parcourue et temps de parcours pour les différents régimes de marche (chapître.IV.).

- de déterminer les équations permettant de calculer :

- . le couple moteur exigé pour réaliser les consignes
- . l'accélération réelle de la rame à partir du couple moteur réellement délivré (chapître.V.).

- de déterminer

- . le couple moteur possible à une certaine vitesse de la rame
- . les caractéristiques électriques réelles des moteurs à partir du couple moteur réel (chapitre.VI.)

. de calculer la consommation d'énergie électrique lors du parcours de la rame (chapitre.VII.).

## CHAPITRE.IV.

### EQUATIONS DU MOUVEMENT DE LA RAME POUR LES PRINCIPAUX REGIMES DE MARCHE

---

Le calcul sur ordinateur exige le choix d'un INCREMENT d'une grandeur.

Dans ce cas précis, les incréments possibles sont ceux de distance, de temps, d'accélération ou de vitesse.

#### . Incréments de distance et de temps

Le choix de ces incréments n'est pas judicieux pour plusieurs raisons :

Il est alors très difficile de contrôler avec précision les consignes d'accélération et de vitesse.

Il est impossible de comparer facilement les couples moteurs possibles et exigés à une même distance ou un même instant.

#### . Incrément d'accélération

Avec cet incrément,

le contrôle des consignes est aisé

mais, comme il peut exister des phases de marche où l'accélération réelle n'est plus égale à l'accélération de consigne, il est alors impossible de prévoir la valeur de l'incrément donnant à l'accélération sa valeur exacte.

#### . Incrément de vitesse

Avec cet incrément,

le contrôle des consignes est immédiat

il est possible de réaliser exactement la comparaison des couples moteurs possibles et exigés ; calculés à la même vitesse, (cf. relation (1)), ils permettent donc de trouver la valeur exacte de l'accélération réelle.

Les équations du mouvement de la rame, qui lient distance parcourue, temps de parcours, vitesse et accélération, seront donc établies à partir d'un incrément de vitesse qu'on notera DV.

#### IV.a. Les régimes de marche

Ce sont les régimes de TRACTION, VITESSE CONSTANTE, FREINAGE.

##### . Régime de traction (fig.15.)

Pour ce régime, l'accélération de la rame est positive. L'accélération réelle  $\gamma_r$  est la valeur minimum de l'accélération de consigne  $\gamma_n$  et de l'accélération possible  $\gamma_p$ , à chaque vitesse  $V_r$  (cf. relation (2)).

Le diagramme de traction, qui représente la variation de l'accélération réelle en fonction de la vitesse, pourra donc comporter les phases suivantes :

- phase de limitation de jerk à dérivée d'accélération constante
- phase d'accélération constante de valeur égale à  $\gamma_{max}$  de consigne
- phase d'accélération variable correspondant au couple maximum délivrable par les moteurs (limitation de courant)
- phase d'accélération variable correspondant à la loi limite Couple-Vitesse des moteurs (limitation de tension).

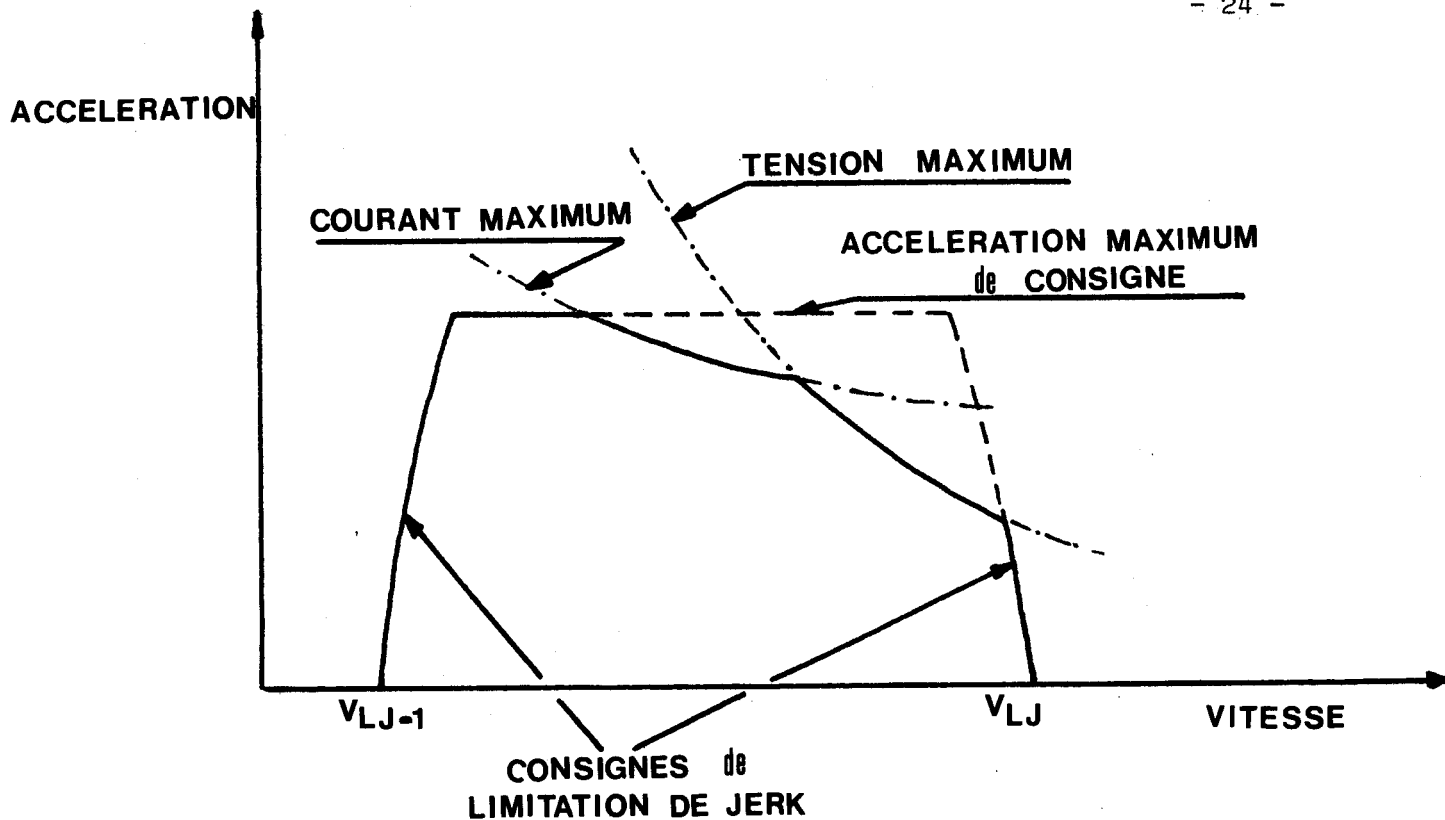


FIG. 15

- Vitesse constante

Ce régime est caractéristique des tronçons de parcours sur lesquels la vitesse réelle devient égale à la vitesse de consigne, constante. Les moteurs maintiennent pour la rame une accélération nulle : c'est un cas particulier du régime de traction.

Le diagramme  $(\gamma, V)$  se réduit au point  $\gamma = 0, V = V_{LJ}$  (fig.16.)

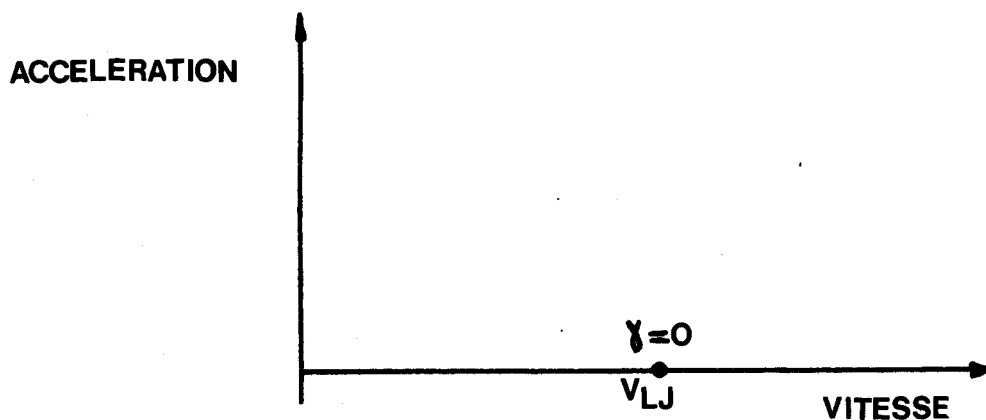


FIG. 16





- Freinage

La vitesse de la rame diminuant, son accélération devient négative.

Cette diminution de vitesse peut être :

- . non contrôlable (fig.17.)
- . contrôlable.

Dans le premier cas, le régime de fonctionnement est appelé MARCHE SUR L'ERRE. Les moteurs ne délivrent plus aucun couple, et la rame est livrée à elle-même : les efforts résistants déterminent son mouvement. La marche sur l'erre ne se rencontre dans le système VAL que durant les temps de commutation Traction - Freinage ; elle est par contre utilisée systématiquement dans les systèmes conventionnels à conduite manuelle.

Dans le second cas, le freinage de la rame est contrôlé grâce à la conjugaison de deux sortes de freins :

- . le frein électrique : les moteurs fonctionnent en génératrices et délivrent un couple moteur négatif. L'énergie mise en jeu peut alors être récupérée par le réseau<sup>(1)</sup>.
- . le frein mécanique, ou oléo-pneumatique.

On admettra que la rame :

- possède un temps de commutation Traction-Freinage suffisamment petit pour être négligé<sup>(2)</sup>,
- possède une conjugaison des freins telle qu'un seul diagramme ( $\gamma, V$ ) de consigne soit toujours respecté.

1) Le rendement de cette récupération est très variable, et, sous un certain aspect, aléatoire.

2) Ces temps de commutation, qui peuvent avoir une influence importante dans les problèmes de pilotage n'ont en fait qu'une importance très faible sur la consommation d'énergie et sur les temps de parcours cumulés des interstations.

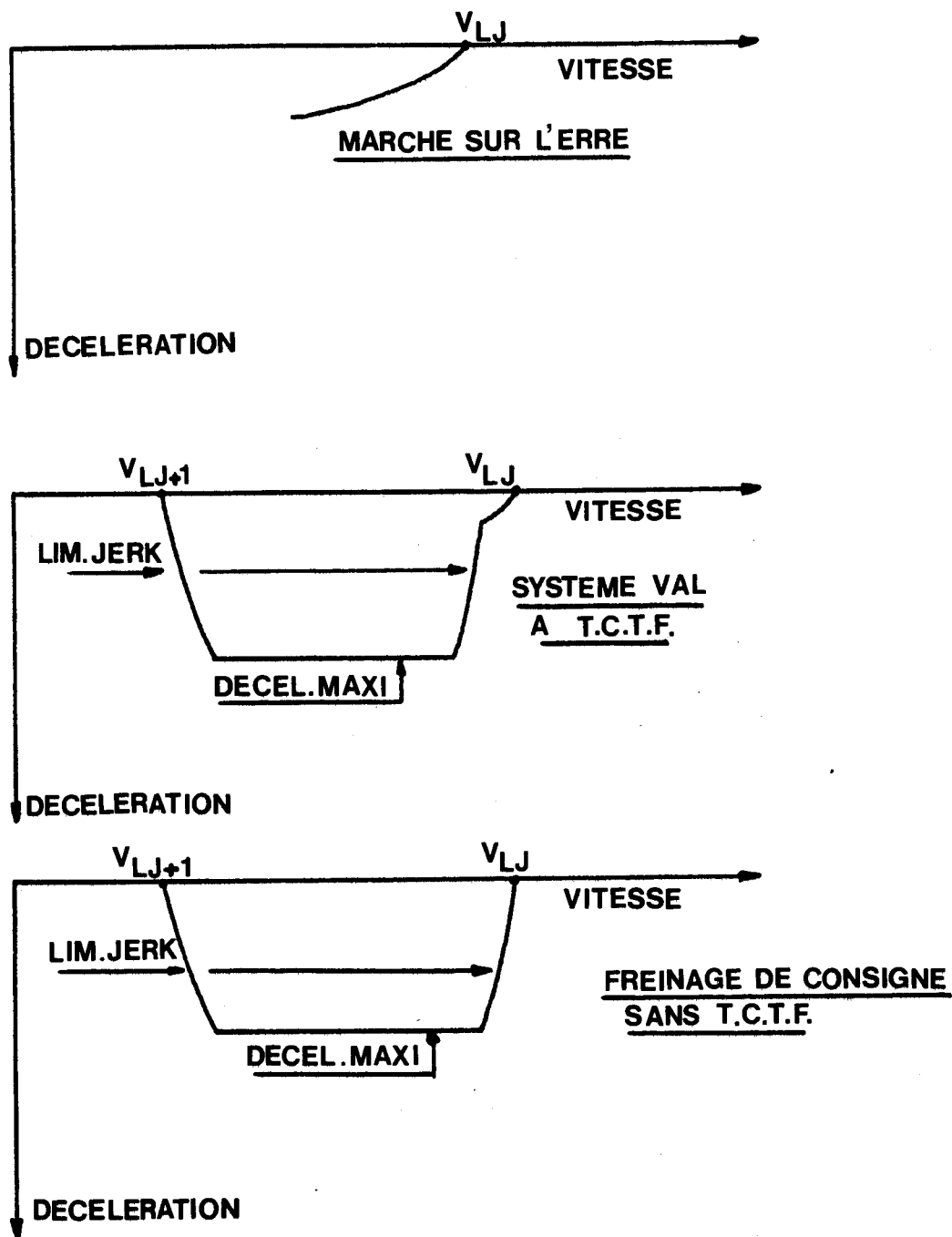


FIG. 17 CAS POSSIBLES DE FREINAGE



IV.b. Equations liant la distance parcourue, le temps de parcours, la vitesse et l'accélération de la rame

On distingue trois types d'équations :

- . à dérivée d'accélération
- . à accélération constante non nulle
- . à accélération nulle.

- Fonctionnement à dérivée d'accélération (fig.20.)

Ce fonctionnement s'applique :

- à la limitation de jerk en début et en fin des régimes de traction et de freinage.

La dérivée d'accélération est alors constante et de valeur égale à celle prescrite par le cahier des charges :

$$\gamma' = \frac{d\gamma}{dt} = \text{constante} = \gamma' \text{ consigne}$$

- aux régimes d'accélération variable dûs aux limitations de tension et de courant. Dans ce cas, on suppose que la dérivée d'accélération est constante pour l'incrément de vitesse  $DV$  choisi suffisamment petit (fig.18.).

Et l'on écrit, sur  $DV$  :

$$\gamma' = \frac{D\gamma}{Dt} = \text{constante}$$

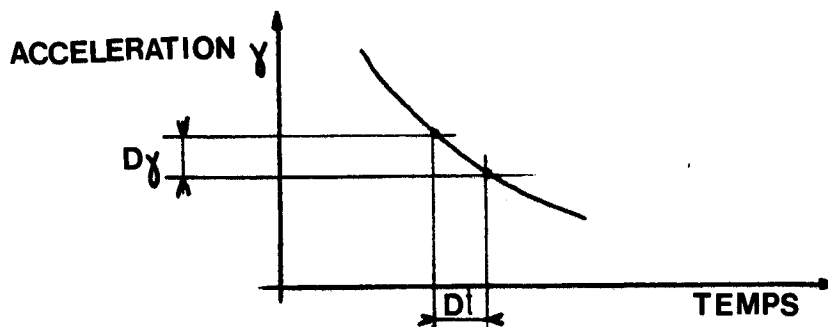


FIG.18

Envisageons un pas de calcul et posons :

$$DV = V_1 - V_0$$

A  $V_1$  correspond l'accélération réelle  $\gamma_1$

A  $V_0$ , l'accélération  $\gamma_0$  (fig.19.)

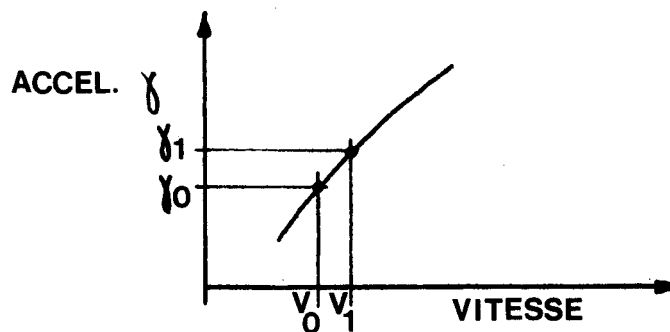


FIG.19

On aura :

$$\gamma_1^2 = 2\gamma' \cdot DV + \gamma_0^2 \quad (3)$$

La variation de temps de parcours sera :

$$Dt = \frac{\gamma_1 - \gamma_0}{\gamma'} \quad (4)$$

La variation de distance parcourue sera :

$$DX = V_0 \cdot Dt + \gamma_0 \cdot \frac{Dt^2}{2} + \gamma' \cdot \frac{Dt^3}{6} \quad (5)$$

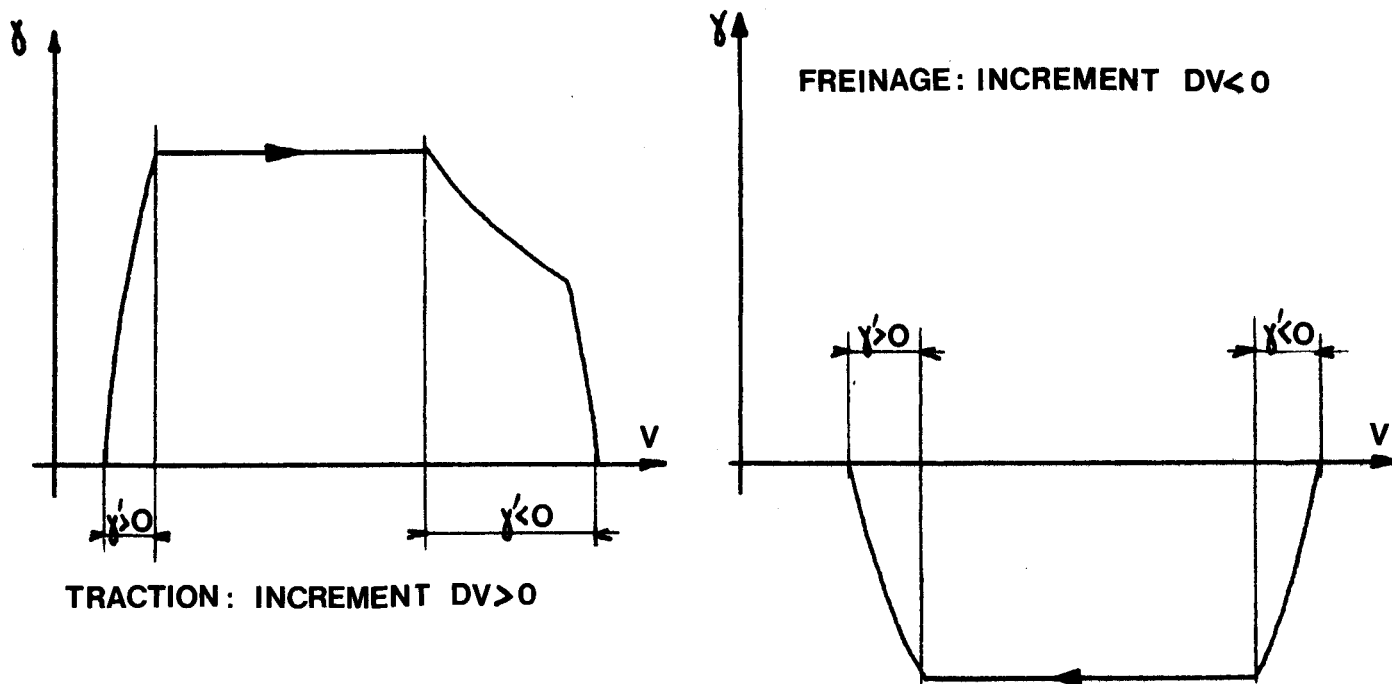


FIG.20

- Fonctionnement à accélération constante

Ce fonctionnement s'applique :

- . lorsque la consigne d'accélération ou de décélération maximum est réalisée,
- . lorsque la rame roule à vitesse constante (accélération nulle).

Les lois se déduisent du cas précédent où l'on fait :  $\gamma' = 0$ .

On a :

$$Dt = \frac{DV}{\gamma_{cte}} \quad (6)$$

et

$$DX = V_o \cdot Dt + \gamma_{cte} \cdot \frac{Dt^2}{2} \quad (7)$$

Lorsque l'accélération de la rame est nulle, l'incrément DV est nul. Afin de permettre la suite des calculs et le déplacement de la rame, il est nécessaire de choisir un incrément de temps Dt, ce qui est possible puisque les valeurs de vitesse et d'accélération sont connues.

Durant toute la phase de vitesse constante :

$$\gamma = 0 \quad (8)$$

$$DX = V \cdot Dt$$

IV.c. Logique du calcul cinématique. Prédétermination des différents régimes de marche

Chacun des régimes de marche, traction, vitesse constante, freinage, comporte une logique propre.

- Logique Traction

Le régime de traction suppose toujours que la rame, entrant dans le tronçon j à la vitesse  $V_{Lj-1}$ , accélère, afin d'atteindre la vitesse limite supérieure  $V_{Lj}$ .

Durant cette phase de marche, l'incrément DV est POSITIF.

On notera :

- $\gamma_{max}$  l'accélération maximum de consigne
- $\gamma_L$  l'accélération maximum due aux limitations de tension et de courant
- $\gamma'_c$  la dérivée d'accélération de consigne
- $\gamma'$  la dérivée d'accélération sur l'incrément DV, pour les régimes de limitations.

Représentons les différentes phases successives de ce régime de traction (fig.21.).

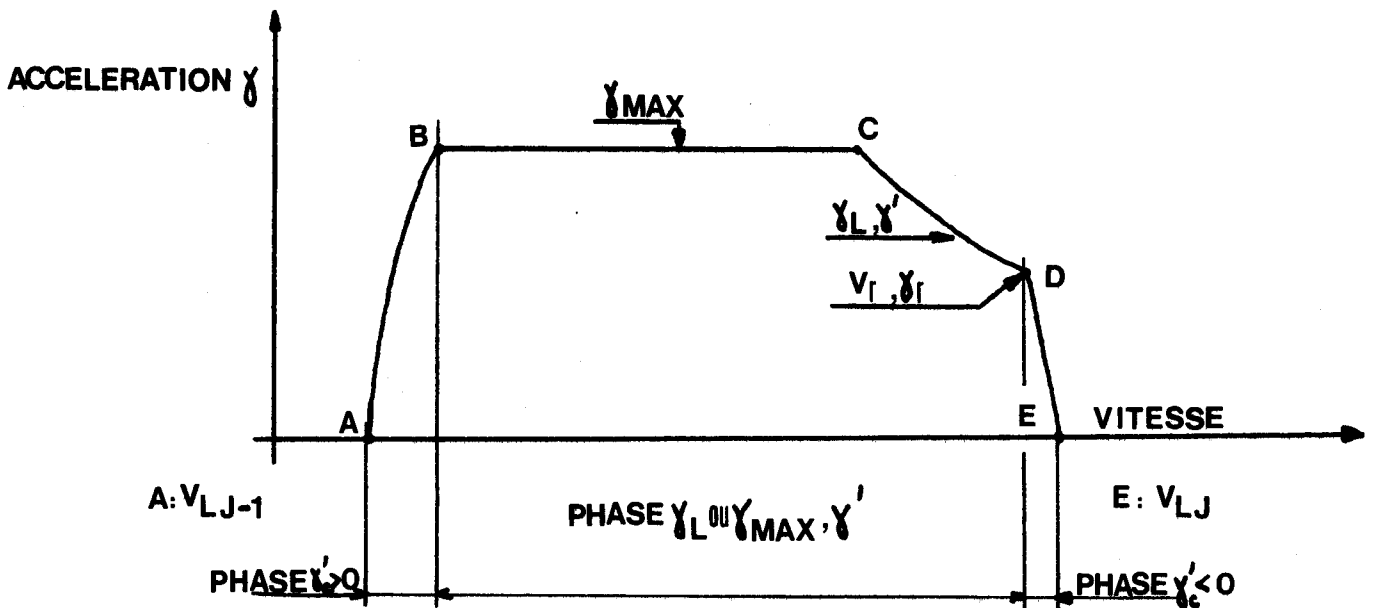


FIG. 21

Sur le diagramme de la figure.21., les différentes phases, entre les points A et D, sont facilement déterminées. Le seul point délicat est la détermination des coordonnées  $V_r, \gamma_r$  du point D à partir duquel il faut donner une valeur négative à la dérivée  $\gamma'_c$  de l'accélération de consigne.

Puisqu'il faut respecter à tout moment la limitation de jerk, la rame, initialement à  $V_r$  et  $\gamma_r$ , devra passer à  $V_{Lj}$  avec une dérivée d'accélération constante négative  $\gamma'_c$ .

Ainsi,

$$V_{Lj} - V_r = \frac{\gamma_r^2}{2|\gamma'_c|} \quad (9)$$

Il est donc nécessaire, pour déterminer les valeurs  $V_r$  et  $\gamma_r$  à partir desquelles débutera cette procédure, de comparer à tout moment l'expression :

$$V_r + \frac{\gamma_r^2}{2|\gamma'_c|} \text{ à la vitesse limite } V_{Lj}$$

La procédure générale de la logique traction peut être représentée sous la forme suivante (fig.22.) :

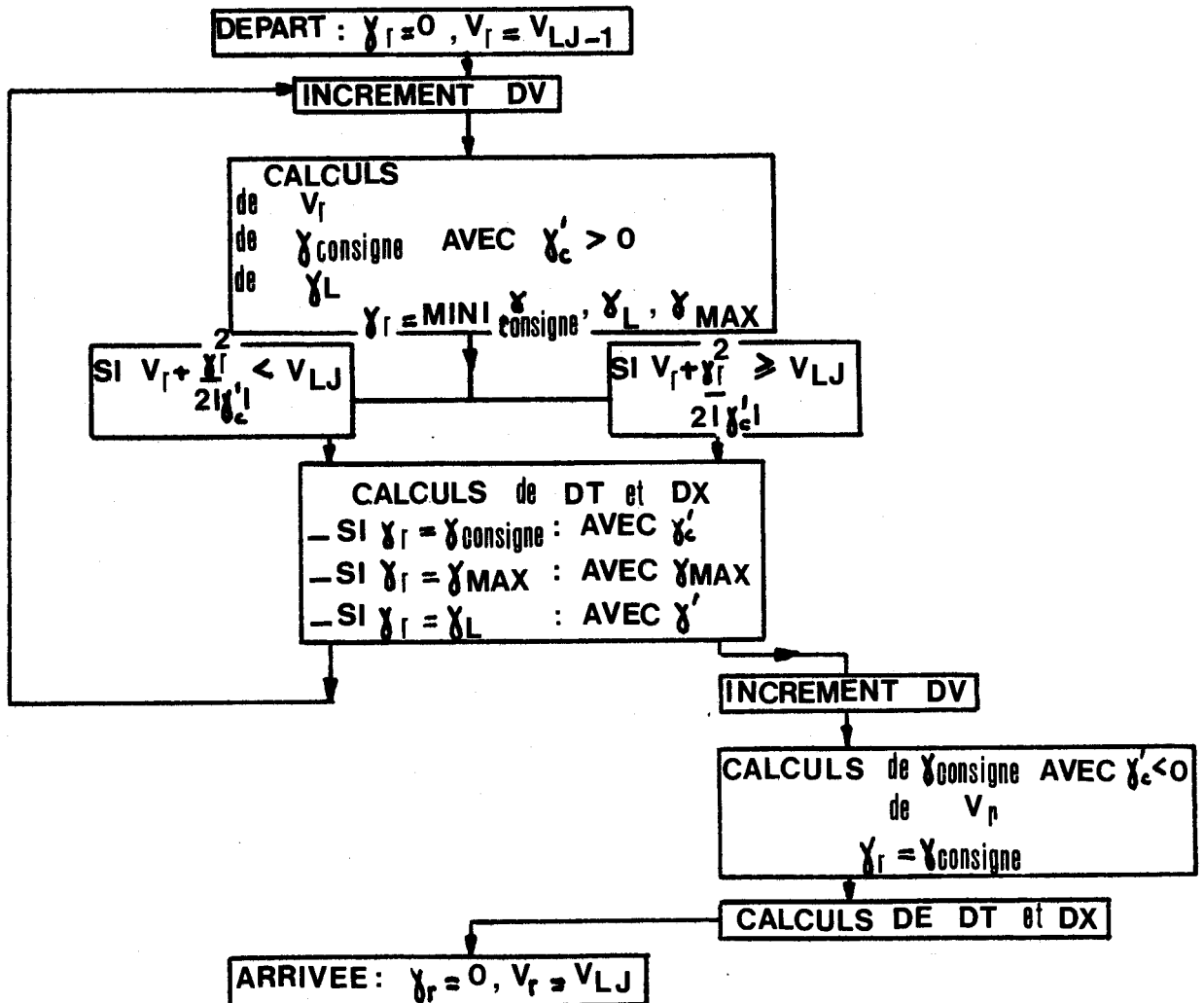


FIG.22

- Logique Vitesse constante (fig.23.)

La rame ayant atteint la vitesse limite  $V_{Lj}$  caractéristique du tronçon, conservera cette vitesse :

Si  $V_{Lj+1} \geq V_{Lj}$  jusqu'à la fin du tronçon  $j$  ( $X = X_j$ )

Si  $V_{Lj+1} < V_{Lj}$  jusqu'à une distance  $X_f$  permettant, en suivant les lois de consigne pour le freinage, de décélérer jusqu'à  $V_{Lj+1}$  à l'entrée du tronçon suivant ( $X_f < X_j$ ).

Cette distance  $X_f$  sera calculée lors de l'étude de la logique de freinage.

Durant toute la phase de marche à vitesse constante, l'incrément est  $Dt$

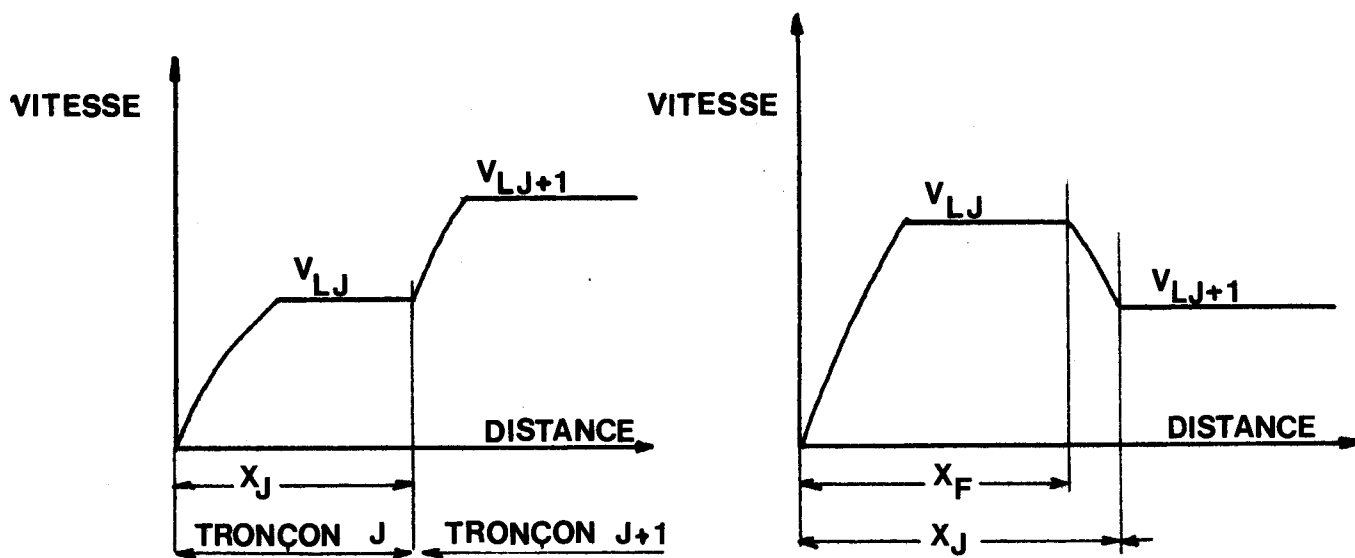


FIG.23



- Logique Freinage

La période de freinage débute à l'instant où l'on décide de freiner : la rame , alors à la vitesse  $V$  , peut ainsi posséder une accélération positive  $\gamma$ . Cette période doit faire entrer la rame dans le tronçon suivant avec une vitesse  $V_{Lj+1}$  imposée et une accélération nulle (fig.25.).

Le cas le plus général de la phase de freinage comporte donc, si l'accélération initiale est positive :

- une petite phase résiduelle de traction (incrément DV positif)
- la phase normale de freinage (incrément DV négatif).

Lorsque le freinage débute alors que la rame est à la vitesse limite  $V_{Lj}$  avec  $\gamma = 0$ , la phase de traction n'existe pas (fig.24.).

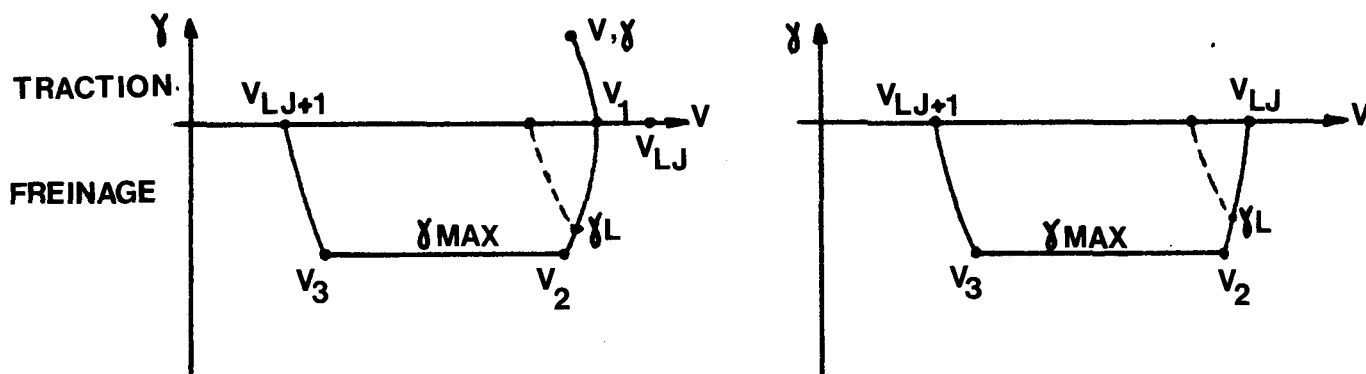


FIG.24 CAS DE FREINAGE

On notera : (cf.fig.24.)

- $\gamma_{max}$  la décélération maximum de consigne
- $\gamma_l$  la décélération maximum possible
- $\gamma'_c$  la dérivée de la décélération de consigne
- $X_j$  la longueur du tronçon  $j$
- $X_f$  la distance sur le tronçon  $j$  à partir de laquelle doit débiter le freinage
- $V_1, V_2, V_3$  les vitesses caractéristiques du diagramme.

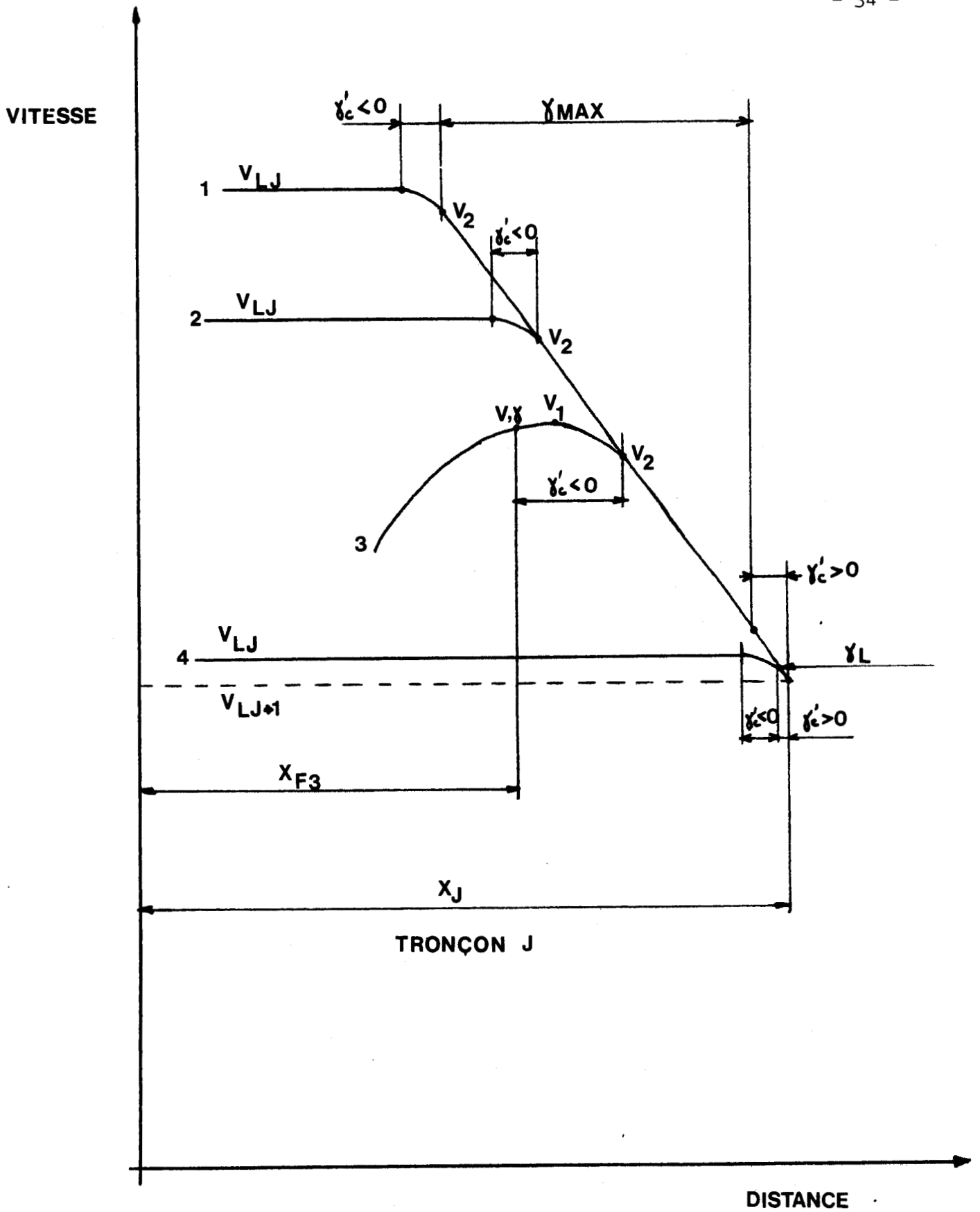


FIG.25 CAS DE FREINAGE



La procédure générale de la logique de freinage peut être représentée par le schéma suivant (fig.26.) :

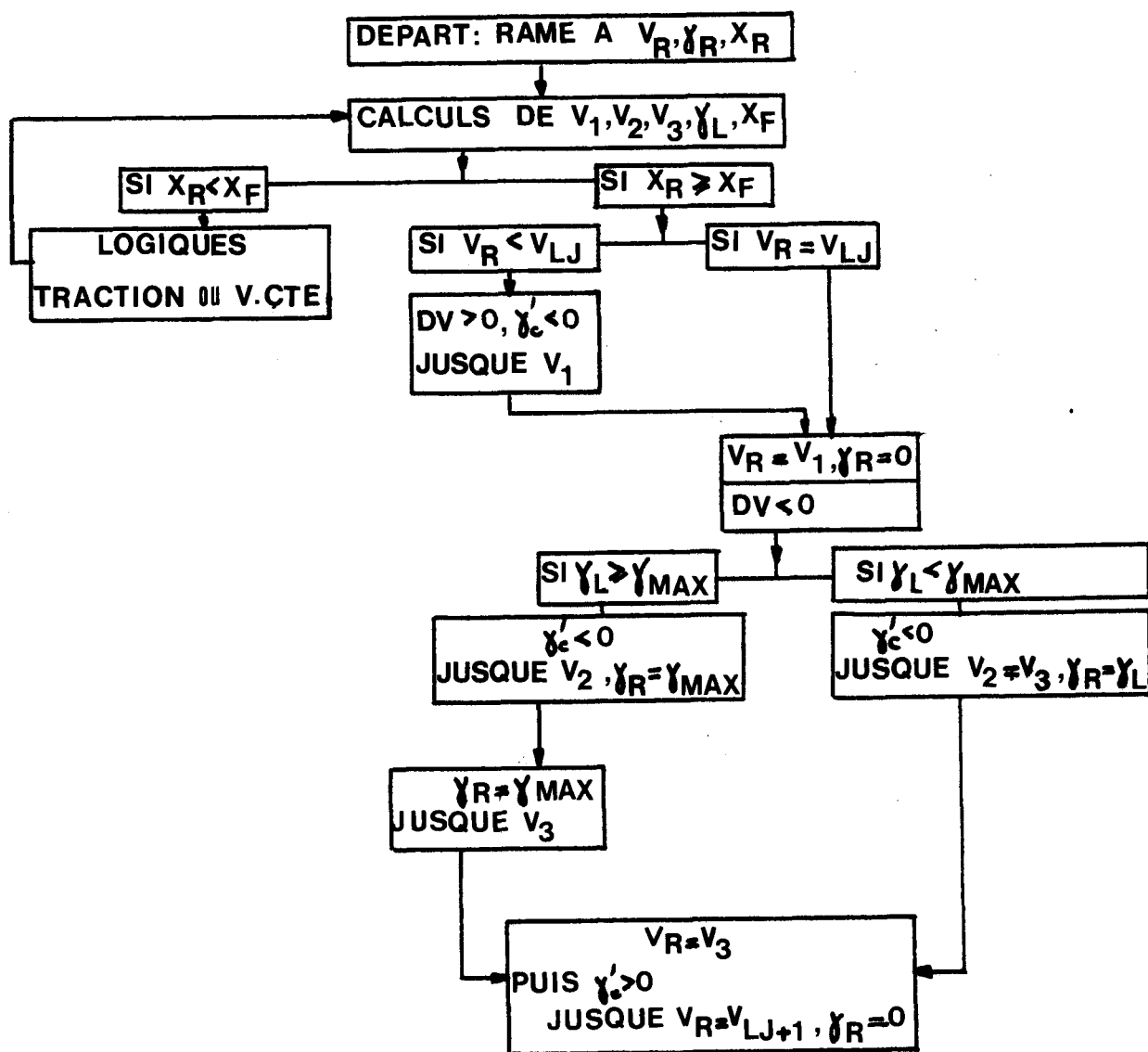


FIG.26



Calcul de la distance  $X_f$

C'est la distance sur le tronçon j à partir de laquelle doit débiter le freinage.

On aura toujours :

$$X_f + DF = X_j$$

DF étant la distance nécessaire au freinage.

Soit le mobile à  $V_r, \gamma_r, X_r$ .

- Détermination de  $V_1$

$$V_1 = V_r + \frac{\gamma_r^2}{2|\gamma'_c|}$$

$$X_1 = X_r + \frac{V_r \gamma_r}{|\gamma'_c|} + \frac{\gamma_r^3}{3\gamma_c'^2}$$

- Détermination de  $V_2$

$$V_2 = V_1 - \frac{\gamma_{ml}^2}{2|\gamma'_c|}$$

avec  $\gamma_{ml}$  valeur de  $\gamma_{max}$  ou  $\gamma_1$

$$X_2 = X_1 + V_1 \left| \frac{\gamma_{ml}}{\gamma'_c} \right| - \frac{|\gamma_{ml}|^3}{6\gamma_c'^2}$$

- Détermination de  $V_3$

$$V_3 = V_{1j+1} + \frac{\gamma_{ml}^2}{2|\gamma'_c|}$$

On trouve  $\gamma_1$  pour  $V_2 = V_3$

Soit :

$$\gamma_1^2 = |\gamma'_c| (V_1 - V_{1j+1})$$

Si  $\gamma_1 < \gamma_{max}$  on aura bien  $V_2 = V_3$  et  $X_3 = X_2, \gamma_{ml} = \gamma_1$

Si  $\gamma_1 \geq \gamma_{max}$   $X_3 = X_2 + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2|\gamma_{ml}|}$  avec  $\gamma_{ml} = \gamma_{max}$

- Détermination de la distance  $X_4$  à laquelle la rame atteint  $V_{lj+1}$

$$X_4 = X_3 + V_3 \left| \frac{\gamma_{ml}}{\gamma'_c} \right| - \frac{|\gamma_{ml}|^3}{3\gamma'_c{}^2}$$

L'expression générale de  $X_4$  est donc :

$$X_4 = X_r + \frac{\gamma_r}{|\gamma'_c|} \left( V_r + \frac{\gamma_r^2}{3|\gamma'_c|} \right) + \left| \frac{\gamma_{ml}}{\gamma'_c} \right| \left( V_1 + V_3 - \frac{\gamma_{ml}^2}{2|\gamma'_c|} \right) + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2|\gamma_{ml}|} \quad (10)$$

avec lorsque  $\gamma_{ml} = \gamma_1$  ,  $V_2 = V_3$

Ainsi :  $DF = X_4 - X_r$

et l'on trouve :  $X_f = X_j - DF$

CHAPITRE.V.

EQUATIONS MECANQUES RELATIVES A LA RAME

---

L'énergie mécanique produite par les moteurs est utilisée :

- pour combattre les efforts résistants à l'avancement du véhicule sur la voie
- pour accélérer la masse totale de la rame.

NOTATIONS

On notera :

		<u>Unités</u>
M	la masse du véhicule en translation (masse à vide + masse des voyageurs)	kg
$\Delta M$	la masse équivalente aux masses tournantes	kg
$J_1$	l'inertie des masses tournantes à la vitesse de rotation de l'arbre moteur	$\text{kg.m}^2$
$J_2$	l'inertie des masses tournantes à la vitesse de rotation des roues	$\text{kg.m}^2$
X	le rapport de transmission	
n	le rendement mécanique de la transmission	
$\Omega_1$	la vitesse de rotation de l'arbre moteur	rad/s
$\Omega_2$	la vitesse de rotation des roues	rad/s
R	le rayon des roues	m
$C_1$	le couple moteur fourni sur l'arbre	N.m
$C_2$	le couple fourni à la jante des roues	N.m
g	l'accélération de la pesanteur	$9,81\text{m/s}^2$
$\gamma$	l'accélération de la rame	$\text{m/s}^2$
V	la vitesse en translation de la rame	m/s
N	la vitesse de rotation de l'arbre moteur	t/mn
F	l'effort à la jante des roues	N
$\alpha$	l'angle de pente de la voie	rad

Transmission de l'énergie mécanique (fig.27.)

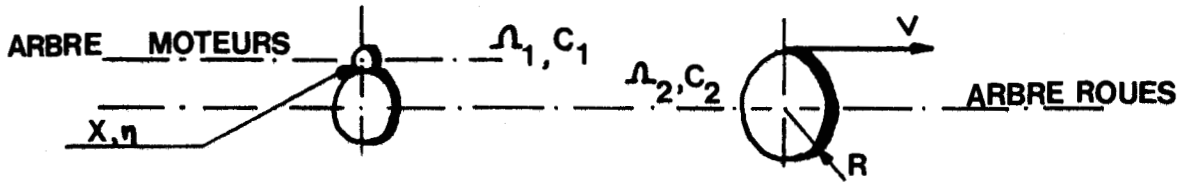


FIG.27

Les caractéristiques du réducteur permettent d'écrire :

$$\frac{\Omega_2}{\Omega_1} = X = \frac{C_1}{C_2} \cdot \eta \quad (11)$$

La vitesse en translation de la rame dépend de la vitesse de rotation des roues ou de celle de l'arbre moteur suivant les relations :

$$V = R \cdot \Omega_2 = \pi \frac{R \cdot X \cdot N}{30} \quad (12)$$

Effort d'inertie à la jante. Couple d'inertie (fig.28.)

Afin de donner à la rame l'accélération  $\gamma$ , les moteurs doivent vaincre les inerties des masses en translation et des masses tournantes, ainsi que l'influence des pentes.

En désignant par  $\alpha_{kj}$  la valeur de la pente, rapport de l'élévation de niveau de la voie à la distance parcourue, l'effort à la jante nécessaire sera :

$$F_{\text{inertie}} = (M + \Delta M)\gamma + M \cdot g \cdot \alpha_{kj} \quad (13)$$

et le couple moteur correspondant :

$$C_1 \text{ inertie} = C_2 \cdot \frac{X}{\eta} + J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}$$

Soit :

$$C_1 \text{ inertie} = \left( J_1 + J_2 \frac{X^2}{\eta} + \frac{MR^2 X^2}{\eta} \right) \frac{d\Omega_1}{dt} + mg \alpha_{kj} R \frac{X}{\eta}$$

En posant :

$$J = \frac{\pi}{30} \cdot \left[ J_1 + (J_2 + MR^2) \frac{X^2}{\eta} \right]$$

$$s = M g R \frac{X}{\eta}$$

On a :

$$C_1 \text{ inertie} = J \frac{dN}{dt} + s \alpha_{kj} \quad (14)$$

$$\alpha_{kj} = \sin.\alpha$$

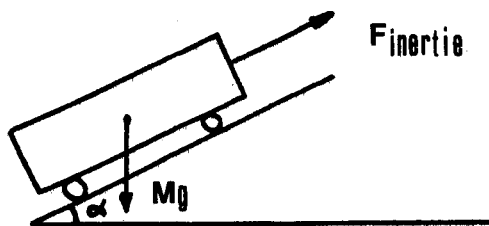


FIG.28

Effort résistant à la jante. Couple résistant.

La rame, en contact avec l'air et la voie, est sollicitée par deux sortes de frottements :

- le frottement sec : résistances au décollage de la masse de la rame et au roulement
- le frottement aérodynamique : résistance de l'air sur le profil géométrique de la rame.

Une troisième sorte de frottement, le frottement visqueux, sollicite les arbres en rotation sur paliers.



(1) le frottement sec (fig.29.)

Soient :

A' l'effort résistant de frottement au décollage de la rame à vitesse nulle ; A' est proportionnel à la masse de la rame

B' le coefficient d'atténuation de A' avec la mise en vitesse de la rame

$E_r$  l'effort constant de résistance au roulement, proportionnel à la masse de la rame.

L'effort résistant à la jante, dû au frottement sec, sera (cf.réf.bibl.A.6.) :

$$F_{fs} = P(A' - B'V) + E_r$$

avec P( ) : partie positive de ..., signifiant que l'effort de décollage intervient jusqu'à  $V = A'/B'$

Ce terme s'annule lorsque la vitesse de la rame décroît.

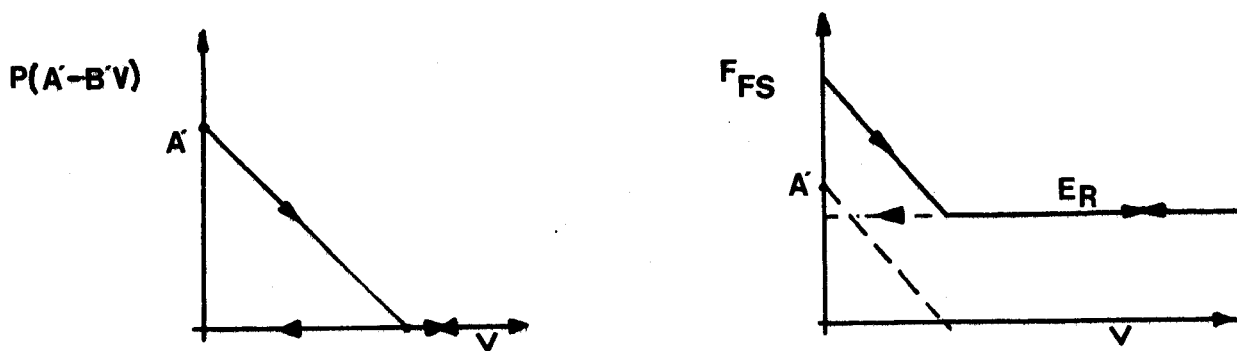


FIG. 29

Le couple résistant dû au frottement sec sera :

$$C_{1fs} = R \cdot \frac{X}{\eta} \cdot P(A' - B'RX\Omega_1) + E_r$$

Soit en posant :

$$A = A' \cdot X \frac{R}{\eta}$$

$$B = \frac{\pi}{30} \cdot B' \frac{R^2 X^2}{\eta}$$

et  $C_r = E_r R \frac{X}{\eta}$

$$C_{1fs} = P(A - B N) + C_r$$

(2) le frottement aérodynamique (fig.30.)

L'effort de frottement aérodynamique est proportionnel au carré de la vitesse de la rame.

Si D' désigne le coefficient caractéristique du profil géométrique de la rame, l'effort résistant à la jante sera :

$$F_{fa} = D' V^2$$

et le couple résistant :

$$C_{1fa} = R \frac{X}{\eta} (D' R^2 X^2 \Omega_1^2)$$

et, en posant :  $D = \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot D' \frac{R^3 X^3}{\eta}$

$$C_{1fa} = D N^2$$

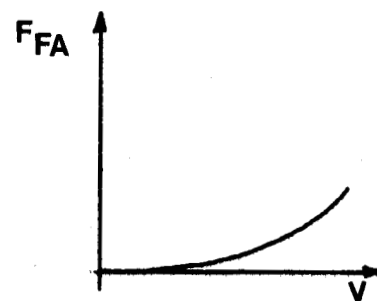


FIG.30

(3) le frottement visqueux (fig.31.)

Soit f le coefficient de frottement visqueux des organes tournants, le couple résistant s'écrit :

$$C_{1fv} = f \left(1 + \frac{X^2}{\eta}\right) \Omega_1$$

soit, avec :  $F = \frac{\pi}{30} \cdot f \left(1 + \frac{X^2}{\eta}\right)$

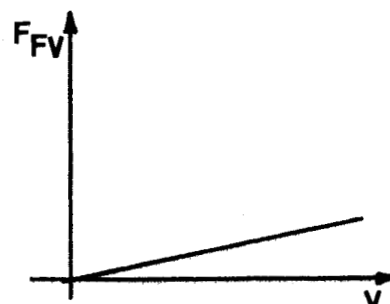


FIG.31

$$C_{1fv} = F N$$

L'effort résistant à la jante des roues est donc :

$$F_{fv} = \frac{f}{R^2} V$$

Effort total à la jante. Couple moteur total

Les moteurs doivent fournir à la jante des roues un effort total équilibrant les efforts d'inertie et les efforts résistants.

Il est de la forme :

$$F = (M + \Delta M)\gamma + Mg\alpha_{kj} + P(A' - B'V) + E_r + D'V^2 + \frac{f}{R^2} V \quad (15)$$

A chaque instant le couple moteur total doit donc être :

$$C_1 = J \frac{dN}{dt} + s\alpha_{kj} + P(A - BN) + C_r + D N^2 + FN \quad (16)$$

relation pouvant être présentée d'une manière plus simple, en posant :

$$C_u = \text{couple utile à l'accélération} = J \frac{dN}{dt}$$

$$C_p = \text{couple de pente} : s\alpha_{kj}$$

$$C_{rés} = \text{couple résistant} = P(A - BN) + C_r + DN^2 + F N$$

$$C_1 = C_m$$

$$C_m = C_u + C_p + C_{rés} \quad (16bis)$$

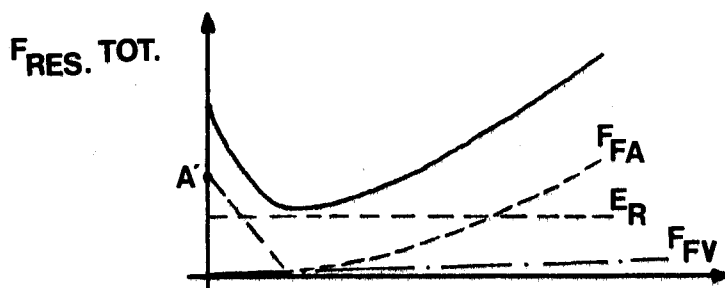


FIG. 32

V.a. Détermination du couple moteur nécessaire à la réalisation des consignes

Supposons la rame à la vitesse  $V_r$ , correspondant à une vitesse de rotation de l'arbre moteur  $N_r$ . Se trouvant à l'abscisse  $X_r$  du tronçon considéré, soit  $\alpha_{kj}$  la valeur de la pente à cet endroit. La rame reçoit la consigne d'accélération  $\gamma_n$ .

Le couple moteur nécessaire à la réalisation de la consigne sera (cf. relation 16 bis) :

$$C_{mn} = C_{un} + C_{pr} + C_{rés r}$$

soit, en développant selon (16) et (12) :

$$C_{mn} = \left( J \frac{30}{\pi R X} \right) \gamma_n + s \alpha_{kj} + P(A - B N_r) + C_r + D N_r^2 + F N_r \quad (17)$$

V.b. Détermination de l'accélération réelle de la rame à partir du couple moteur réel

Supposons le couple moteur réel déterminé par la relation (1) :

$$C_{mr} = \min(C_{mn}, C_{mp})$$

La relation (16Bis) devient :

$$C_{mr} = C_{ur} + C_{pr} + C_{rés r}$$

et : 
$$C_{ur} = C_{mr} - C_{pr} - C_{rés r}$$

Ainsi, tenant compte de (16), l'accélération réelle de la rame sera :

$$\gamma_r = \left( \frac{C_{mr} - C_{pr} - C_{rés r}}{J} \right) \frac{\pi R X}{30} \quad (18)$$

## CHAPITRE.VI.

### EQUATIONS ELECTRIQUES RELATIVES A LA RAME

---

La modélisation numérique des moteurs doit permettre de déterminer :

- le couple moteur possible  $C_{mp}$  à une certaine vitesse de la rame
- les caractéristiques Tension, Courant des moteurs à partir du couple moteur réellement délivré  $C_{mr}$ .

Il semble actuellement intéressant de simuler deux types de moteurs particulièrement adaptés à la traction électrique :

- le moteur série à courant continu à commande par HACHEUR
- le moteur asynchrone à courant alternatif à commande par CYCLOCONVERTISSEUR ou ONDULEUR AUTONOME.

#### VI.a. Rame comportant des moteurs série à courant continu

On supposera que le HACHEUR délivre aux bornes de chaque moteur de la rame :

- Une tension moyenne continue de valeur  $U$ , limitée par le réseau à  $U_{max}$
- Un courant moyen continu de valeur  $I$ , limitée à  $I_{max}$ .

NOTATIONS On notera :

		<u>Unités</u>
$U, U_{\max}$	les tensions moyenne et maximum d'alimentation	Volts
$I, I_{\max}$	les courants moyen et maximum dans l'induit des moteurs	Ampères
$J$	le courant moyen dans l'inducteur	"
$R_1, R_2, R_s$	les résistances respectives de l'induit, de l'inducteur, de shuntage de l'inducteur	Ohms
$I'$	le courant moyen traversant la résistance de shuntage	Ampères
$\emptyset$	le flux inducteur	Webers
$C_m$	le couple moteur	N.m
$E$	la force contre-électromotrice	Volts
$N$	la vitesse de rotation de l'arbre moteur	Tours/mn

HYPOTHESES On négligera :

- les pertes dans le fer : par courants de Foucault et Hystérésis
- les pertes par ventilation (c'est-à-dire l'énergie dépensée par le ventilateur)
- les pertes mécaniques  
de valeurs relativement faibles devant les pertes Joule des enroulements des moteurs
- les effets des inductances d'induit et d'inducteur lors des variations du courant dans le temps (en toute rigueur, il faut tenir compte des inductances pour les calculs du hâcheur, mais elles ne jouent qu'un rôle négligeable dans le bilan énergétique).

### VI.a.1. Mode de commande des moteurs

Le hâcheur délivre aux bornes des moteurs une tension  $U$  et un courant  $I$  essentiellement variables. Cependant, l'existence des limitations de tension et courant permet de distinguer trois zones de fonctionnement (fig.33.) :

- l'une à  $U$  et  $I$  variables mais non maxima
- l'autre à  $I_{\max}$  constant et  $U$  pouvant varier jusque  $U_{\max}$
- la dernière à  $U_{\max}$  constant et  $I$  pouvant varier jusque  $I_{\max}$ .

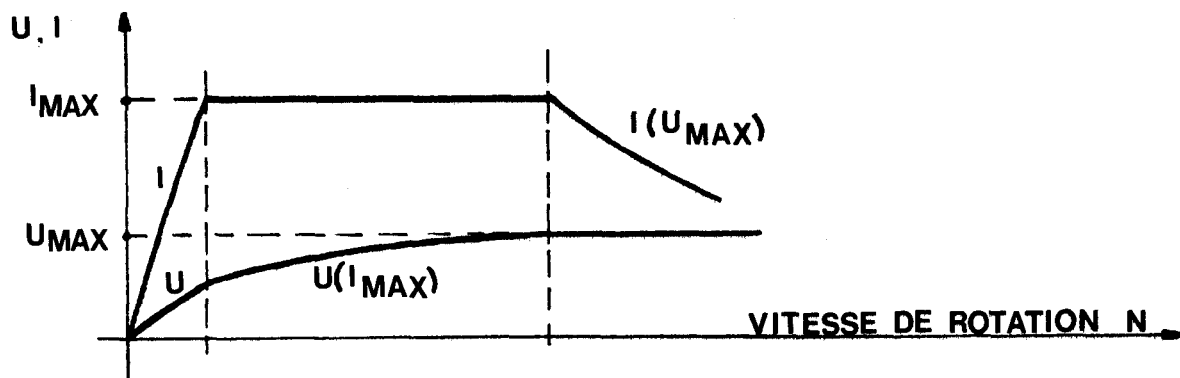


FIG. 33

On supposera que le montage électronique de commande des moteurs ne permet pas le shuntage progressif de l'inducteur ; la résistance  $R_G$ , en parallèle sur l'inducteur et donc le taux de shuntage  $\tau$  seront considérés comme fixes (c'est le cas des prototypes du V.A.L. ; mais il serait possible de concevoir des hâcheurs où le shuntage serait variable par commande électronique).

VI.a.2. Simulation numérique

Le moteur série à courant continu peut être représenté par le schéma simplifié suivant : (fig.34.)

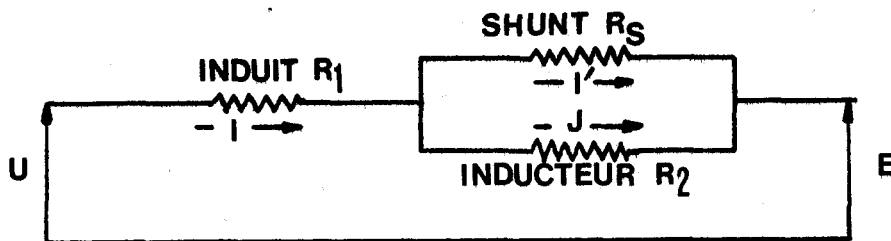


FIG. 34

Son comportement est celui d'un système asservi, où, la tension d'alimentation  $U$  est constamment comparée à la fcém  $E$ , où la grandeur de sortie est le couple moteur  $C_m$  (fig.35.).

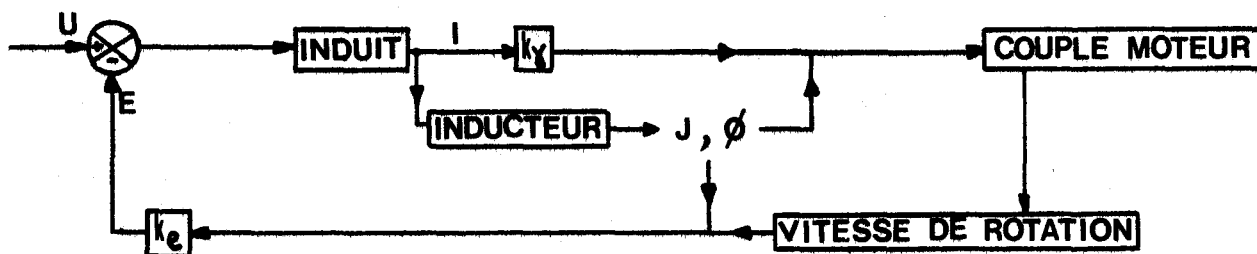


FIG. 35

$k_e$  et  $k_\gamma$  sont des constantes caractéristiques du moteur.

Le schéma suivant représente l'intégration du système asservi équivalent au moteur dans la rame (fig.36.).



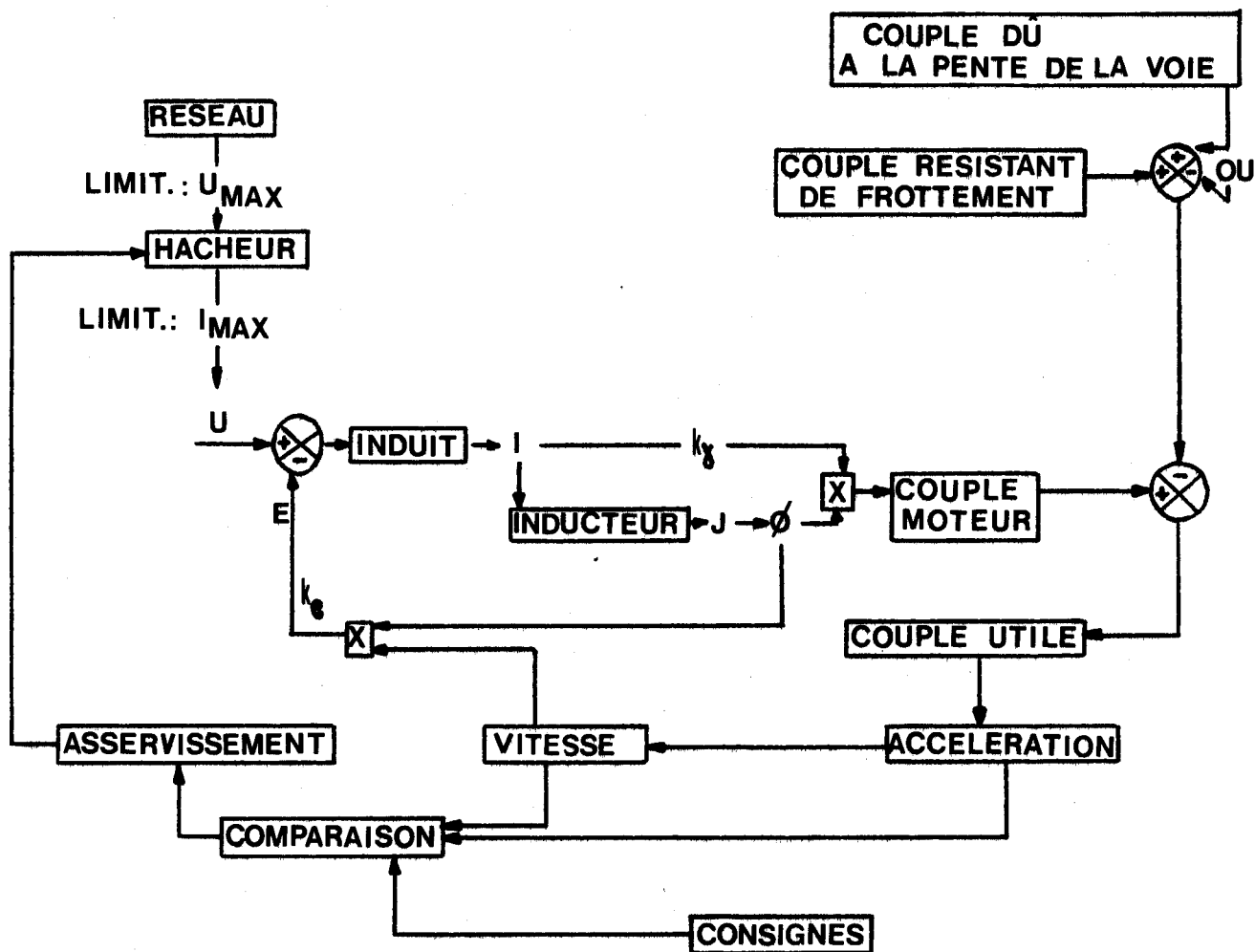


FIG. 36



### Equations générales

Elles sont tirées du schéma électrique simplifié (fig.34.)  
et de la théorie générale des moteurs à courant continu (réf.bibl.B).

### Loi des Tensions et courants

On écrit :

$$U - E = I \left( R_1 + \frac{R_2 R_s}{R_2 + R_s} \right)$$

or,  $I = I' + J$

et  $R_s I' = R_2 J$

d'où :

$$I = J \left( \frac{R_s + R_2}{R_s} \right)$$

Le courant induit peut s'écrire en fonction du courant inducteur :

$$I = mJ \quad \text{avec} \quad m = 1 + \frac{R_2}{R_s} \quad (19)$$

La différence des tensions U et E s'exprime donc en fonction du courant inducteur par :

$$U - E = J \left( 1 + \frac{R_2}{R_s} \right) \left( R_1 + \frac{R_2 R_s}{R_2 + R_s} \right)$$

soit :  $U - E = Z \cdot J$  avec  $Z = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_s}$  (20)

### Expression du couple moteur et de la f.c.ém.

En admettant les hypothèses faites du point de vue des pertes dans le moteur, le bilan des puissances mises en jeu s'écrit :

$$UI = \text{Pertes Joule} + EI$$

ou encore :  $UI = \text{Pertes Joule} + C_m \cdot \pi/30 \cdot N$

avec :  $C_m \cdot \pi/30 \cdot N = E \cdot I$  (21)

$k_\gamma$  et  $k_e$  étant des constantes caractéristiques du moteur, liées par la relation :

$$k_e = k_\gamma \cdot \pi/30 ,$$

on exprime :

. le couple moteur par :

$$C_m = k_\gamma \cdot \phi \cdot I$$
 (22)

. la fcém par :

$$E = k_e \cdot \phi \cdot N$$
 (23)

Ces deux expressions dépendent du flux d'induction  $\phi$  créé par l'inducteur.

Détermination du flux d'induction. Relations liant le couple moteur aux courants induit et inducteur

L'intensité du courant inducteur  $J$  détermine pour l'inducteur trois zones de fonctionnement (fig.37.) :

- une zone de non saturation pour  $J \leq J_0$
- une zone de saturation pour  $J \geq J_s$
- une zone intermédiaire appelée COUDE de saturation pour  $J_0 \leq J \leq J_s$

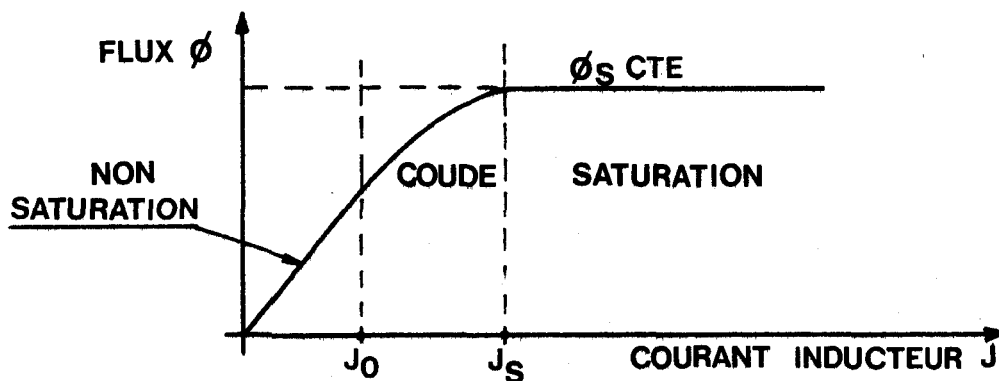


FIG.37

Chaque zone présente une relation caractéristique entre le flux d'induction et l'intensité du courant inducteur.

- en non saturation

le flux  $\phi$  est proportionnel au courant  $J$  jusqu'à une valeur  $J_0$  de ce courant.

Ainsi :

$$\text{pour } J \leq J_0 \qquad \phi = k \cdot J \qquad (24)$$

$k$  représente la valeur de l'inductance de l'inducteur.

- en saturation

A partir d'une valeur  $J_s$ , le flux reste constant.

Ainsi :

$$\text{pour } J \geq J_s \qquad \phi = k' \cdot J_s \qquad (25)$$

la constante  $k'$  est déterminée par les conditions aux limites entre les zones de saturation et de coude.

- en coude de saturation

Entre  $J_0$  et  $J_s$ , la forme mathématique du flux en fonction de  $J$ , est établie à partir des constatations expérimentales sur les lois de variation du couple moteur en fonction du courant induit.

On peut remarquer expérimentalement que, dans la zone de coude, la variation de  $C_m$  est quasi linéaire en fonction du courant induit, ceci pour différents taux de shuntage (fig.38.)

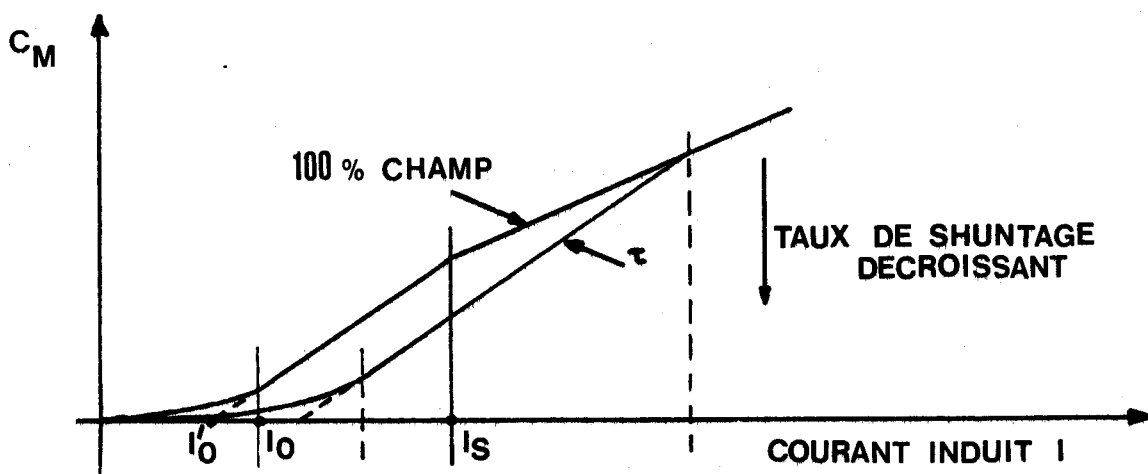


FIG.38

On note :

$I_0$  le courant induit correspondant à  $J_0$

$I_s$  " " " " "  $J_s$

$I'_0$  l'abscisse à l'origine de la droite correspondant au coude, ceci pour un taux de shuntage donné  $\tau$ .

On prendra comme convention de désigner par  $\tau$  le pourcentage de champ restant, c'est-à-dire le rapport  $J/I$ .

Ainsi :

$$\tau = 1/m$$

Avec une bonne approximation dans la région du coude :

$$C_m = K(I - I'_0) \quad (26)$$

$K$  étant la pente des droites.

Ainsi,

$$C_m = K I \left(1 - \frac{I'_0}{I}\right) = KI \left(1 - \frac{m J'_0}{m J}\right)$$

$J'_0$  désignant le courant inducteur correspondant à  $I'_0$ .

soit :

$$C_m = k_\gamma \cdot I \cdot \frac{K}{k_\gamma} \left(1 - \frac{J'_0}{J}\right)$$

La forme générale du couple moteur étant :

$$C_m = k_\gamma \cdot \phi \cdot I \quad (\text{cf. relation (22)})$$

on en déduit l'expression du flux pour la région du coude :

$$\text{pour } J_0 \leq J \leq J_s \quad \phi = \frac{K}{k_\gamma} \left(1 - \frac{J'_0}{J}\right) \quad (27)$$

Remarque

(1) On sait par (19) que :

$$I_0' = m J_0'$$

En fonction du taux de shuntage, l'abscisse à l'origine de la droite (Couple-courant induit) pour la région du coude, est :

$$I_0' = \frac{J_0'}{\tau}$$

(2) les valeurs de K et  $J_0'$  seront déterminées sur la courbe expérimentale du couple moteur en fonction du courant induit, pour un taux de shuntage  $\tau = 100\%$ .

(3) Calcul de k'

A la limite, entre les zones de coude et de saturation, pour  $J = J_s$  :

$$\phi = k' \cdot J_s = \frac{K}{k_Y} \left(1 - \frac{J_0'}{J_s}\right)$$

et

$$k' = \frac{K}{k_Y} \frac{(J_s - J_0')}{J_s^2}$$

Il est ainsi possible, pour les 3 zones de fonctionnement de l'inducteur, d'établir les relations liant le couple moteur aux intensités moyennes des courants induit et inducteur. (cf. relations 19 et 22)

Zone de fonctionnement	$\phi$ (cf. fig. 39.)	$C_m = f(I)$ (cf. fig. 40.)	$C_m = f(J)$
Non saturation $J \leq J_0$	$k \cdot J$ (24)	$\frac{k \cdot k_Y \cdot I^2}{m}$ (28)	$k \cdot k_Y \cdot m \cdot J^2$ (30)
Coude $J_0 \leq J \leq J_s$	$\frac{K}{k_Y} \left(1 - \frac{J_0'}{J}\right)$ (27)	$K(I - I_0')$ (26)	$K \cdot m (J - J_0')$ (31)
Saturation $J \geq J_s$	$k' \cdot J_s$ (25)	$k' \cdot k_Y \cdot J_s \cdot I$ (29)	$k' \cdot k_Y J_s m J$ (32)

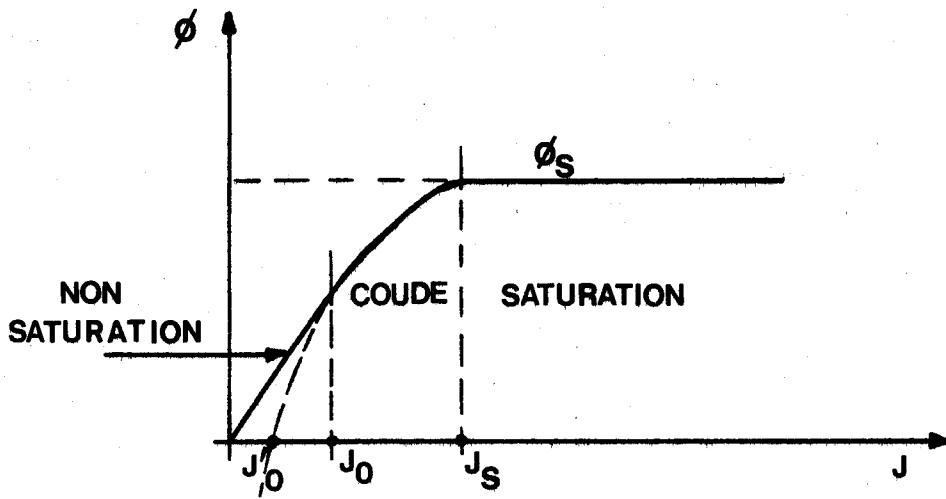


FIG. 39

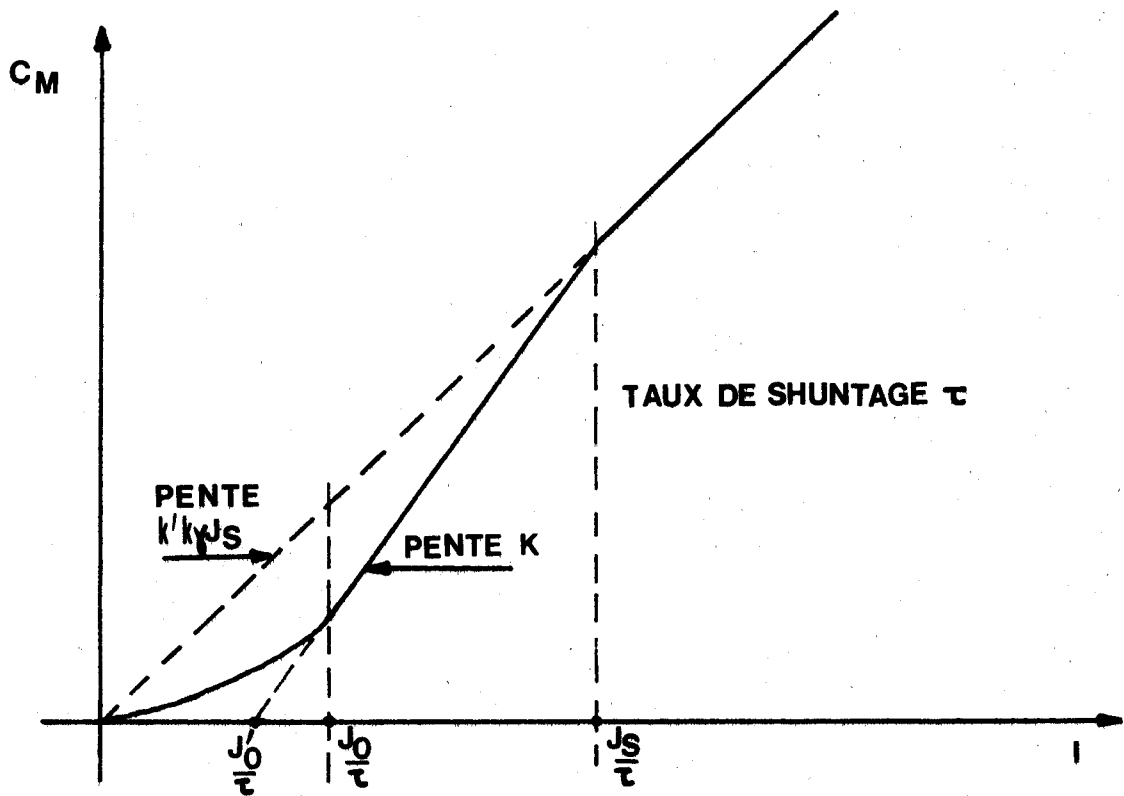


FIG 40

VI.a.3. Détermination du couple moteur possible à une certaine vitesse de la rame

Les limitations de tension et de courant ont pour conséquence de limiter les possibilités des moteurs. Envisageons l'influence de  $U_{\max}$  et  $I_{\max}$  sur le couple moteur, lorsque la rame se déplace à la vitesse  $V_r$ , à laquelle correspond une vitesse de rotation des arbres moteurs  $N_r$ .

$$N_r = \frac{30}{\pi R X} V_r \quad (\text{cf. relation 12})$$

On peut exprimer dans chacun des cas la valeur du courant inducteur possible et du couple moteur possible, en tenant compte des relations :

$$(23) \quad E = k_e \phi N$$

$$(20) \quad U - E = ZJ \quad \text{que l'on peut également écrire :}$$

$$J = \frac{U - E}{Z} = \frac{U - k_e \phi N}{Z}$$

Les valeurs de  $J_p$  et  $C_{mp}$  sont alors déterminées à partir des relations  $\phi = f(J)$  et  $C_m = f(J)$ , établies pour chaque zone de fonctionnement de l'inducteur.

1er cas. Limitation de tension  $U_{\max}$

• Zone de saturation  $J_p \geq J_s$

Des relations (25) et (32), on tire :

$$J_p = \frac{U_{\max} - k' \cdot k_e \cdot J_s \cdot N_r}{Z} \quad \text{et} \quad C_{mp} = k' \cdot k_\gamma \cdot m \cdot J_s \cdot J_p \quad (33)$$



. Zone de non saturation  $J_p \leq J_0$

Des relations (24) et (30), on tire :

$$J_p = \frac{U_{\max} - k_e \cdot k_r \cdot J_p \cdot N}{Z} \quad \text{soit} \quad J_p = \frac{U_{\max}}{Z + k_e \cdot k_r \cdot N}$$

$$\text{et } C_{mp} = k \cdot k_\gamma \cdot m \cdot J_p^2 \quad (34)$$

. Zone de coude de saturation  $J_0 \leq J_p \leq J_s$

De la relation (27), on tire :

$$J_p = \frac{U_{\max} - k_e N \frac{K}{k_\gamma} \left(1 - \frac{J_0}{J_p}\right)}{Z}$$

Soit :

$$J_p = \frac{J_p U_{\max} - k_e N \frac{K}{k_\gamma} (J_p - J_0)}{J_p Z}$$

$J_p$  est donc la racine positive de l'équation de second degré :

$$Z(J_p)^2 + \left( \frac{K k_e N}{k_\gamma} - U_{\max} \right) (J_p) - \frac{K \cdot k_e \cdot J_0 \cdot N}{k_\gamma} = 0$$

dont le discriminant est :

$$\Delta = U_{\max}^2 + \frac{K k_e N}{k_\gamma} \left( \frac{K k_e N}{k_\gamma} - 2U_{\max} + 4ZJ_0 \right)$$

Ainsi :

$$J_p = \frac{U_{\max} - \frac{K k_e N}{k_\gamma} + \sqrt{\Delta}}{2Z}$$

et tenant compte de la relation (31) :

$$C_{mp} = K \cdot m (J_p - J_0) \quad (35)$$

2ème cas. Limitation de courant  $I_{\max}$

Cette limitation apporte à  $C_{mp}$  sa valeur maximum.

On a alors :

$$J_p = \frac{I_{\max}}{m}$$

Suivant la position de  $J_p$  par rapport à  $J_o$  et  $J_s$ , la valeur du flux d'induction  $\phi_p$  peut être définie (par les relations 24, 25, et 27) :

Le couple moteur possible est :

$$C_{mp} = k_\gamma \cdot \phi_p \cdot I_{\max} \quad (36)$$

VI.a.4. Détermination des caractéristiques Tension. Courant des moteurs à partir du couple moteur réel

Le couple moteur réel est la valeur minimum des couples moteurs, demandé pour réaliser les consignes d'accélération, et possible, tenant compte des limitations (cf. relation 1). Soit  $C_{mr}$  sa valeur.

Exprimons le courant inducteur réel  $J_r$  et le flux réel  $\phi_r$  pour chaque zone de fonctionnement de l'inducteur.

. Zone de saturation  $J_r \geq J_s$

Compte tenu des relations (32) et (25), on a :

$$J_r = \frac{C_{mr}}{k' \cdot k_\gamma \cdot m \cdot J_s} \quad \text{et} \quad \phi_r = k' \cdot J_s \quad (37)$$

. Zone de non saturation  $J_r \leq J_0$

Compte tenu des relations (30) et (24), on a :

$$J_r = \sqrt{\frac{C_{mr}}{k \cdot k_\gamma \cdot m}} \quad \text{et} \quad \phi_r = k \cdot J_r \quad (38)$$

. Zone de coude de saturation  $J_0 \leq J_r \leq J_s$

Compte tenu des relations (31) et (27), on a :

$$J_r = \frac{C_{mr}}{K \cdot m} + J_0' \quad \text{et} \quad \phi_r = \frac{K}{k_\gamma} \left( 1 - \frac{J_0'}{J_r} \right) \quad (39)$$

On en déduit les expressions réelles :

- du courant induit :  $I_r = m \cdot J_r$
- de la f.c.é.m. :  $E_r = k_e \cdot \phi_r \cdot N_r \quad (40)$
- de la tension aux bornes :  $U_r = E_r + Z \cdot J_r$

VI.b. Rame comportant des moteurs asynchrones

On supposera que le cycloconvertisseur ou l'onduleur autonome délivre pour chaque phase de chacun des moteurs de la rame :

- une tension efficace statorique de valeur  $V_s$  limitée par le réseau à  $V_{s \text{ max}}$ .
- un courant efficace statorique de valeur  $I_s$ , limitée à  $I_{s \text{ max}}$ .
- une fréquence statorique de valeur  $f_s$ , soit fixée par le réseau, soit limitée par la conception de l'organe de commande à une valeur  $f_{s \text{ max}}$ .

Notations

On notera :

$q$	le nombre de phases au stator	
$p$	le nombre de paires de pôles	
$\Omega'$	la vitesse de rotation du rotor	en rad/s
$R_s$	la résistance statorique par phase	}
$R_r$	la résistance rotorique correspondante	
$l_s$	l'inductance par phase statorique	}
$l_r$	l'inductance rotorique correspondante	
$M$	la mutuelle inductance entre stator et rotor par phase	
$\omega_s$	la pulsation des courants statoriques	}
$\omega_r$	la pulsation des courants rotoriques	
$V_s$	la tension efficace pour une phase statorique	en Volts
$\phi$	le flux d'entrefer	en Webers
$E$	la tension induite due au courant magnétisant	en Volts
$I_s$	la valeur efficace du courant par phase statorique	}
$I_r$	la valeur efficace du courant rotorique correspondant	
$I_m$	la valeur efficace du courant magnétisant	
$C_m$	le couple moteur total	en N.m

Exemple d'un réseau triphasé

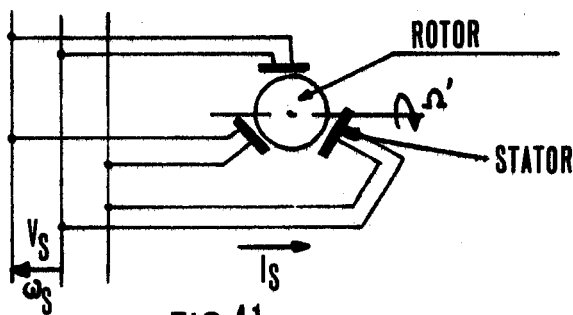


FIG.41

Hypothèses

On négligera :

- les effets de la saturation
- les pertes dans le fer
- les pertes mécaniques
- les pertes supplémentaires dues aux harmoniques de courant créées par l'organe de commande (tension de sortie pas tout à fait sinusoïdale), et produisant en outre :
  - . des couples moteurs ou résistants supplémentaires
  - . des couples d'oscillation pendulaire (cf.réf.bibl.C.1.)

IV.b.1. Mode de commande des moteurs

Pour être adapté à la traction électrique, le moteur asynchrone doit posséder une grande souplesse dans la variation de sa vitesse de rotation et de son couple moteur. L'alimentation électrique  $V_s, I_s, \omega_s$  doit donc être facilement variable.

La littérature spécialisée conseille deux zones de fonctionnement pour le moteur asynchrone utilisé en traction électrique (cf.réf.bibl.C ) (fig.42.).

- l'une à flux d'entrefer constant, où le rapport de la tension induite  $E$  à la pulsation statorique  $\omega_s$  est maintenu constant grâce à un asservissement. Le fait de maintenir constant le courant statorique  $I_s$

à une valeur convenable  $I_s \text{ max}$ , permet alors de travailler à Couple moteur constant, tout en gardant une pulsation rotorique  $\omega_r \text{ max}$ , caractérisant le fonctionnement nominal du moteur.

- l'autre à affaiblissement de champ, où la valeur de la tension induite est limitée à  $E_{\text{max}}$ , à partir d'une pulsation statorique de base  $\omega_{sb}$ .

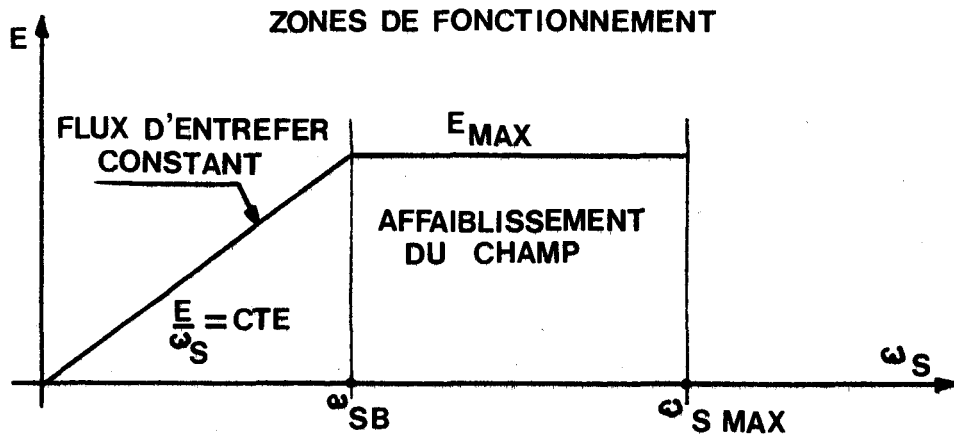


FIG. 42

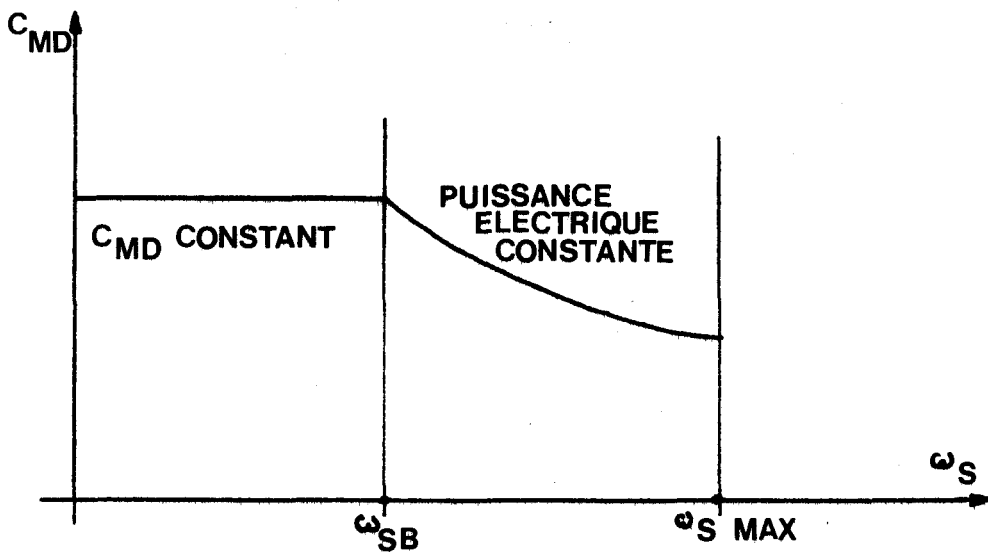


FIG. 43 EX. DE VARIATION DU COUPLE MOTEUR DEMANDE  $C_{MD}$

Suivant le dimensionnement du moteur, le fonctionnement prévu est ou n'est pas réalisé (fig.44. et .45.).

FIG.44 MOTEUR SURDIMENSIONNE

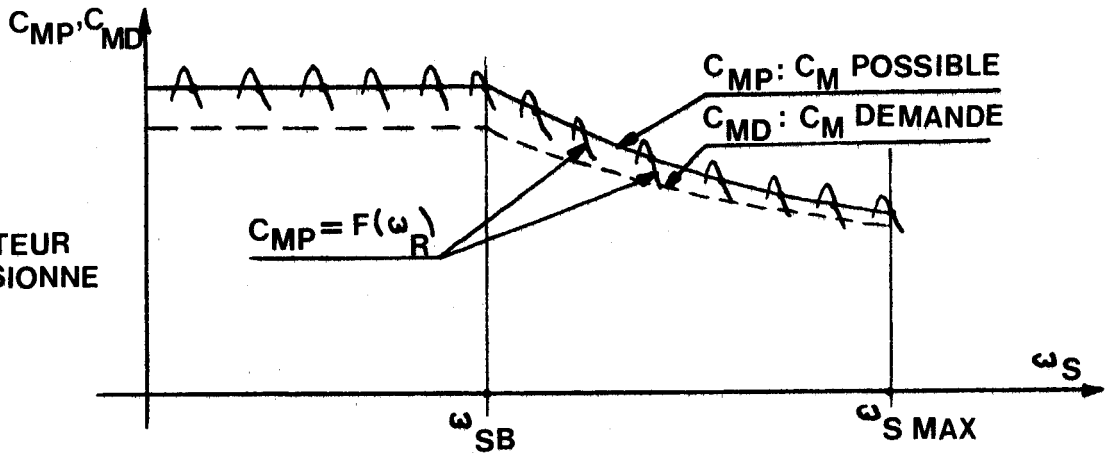
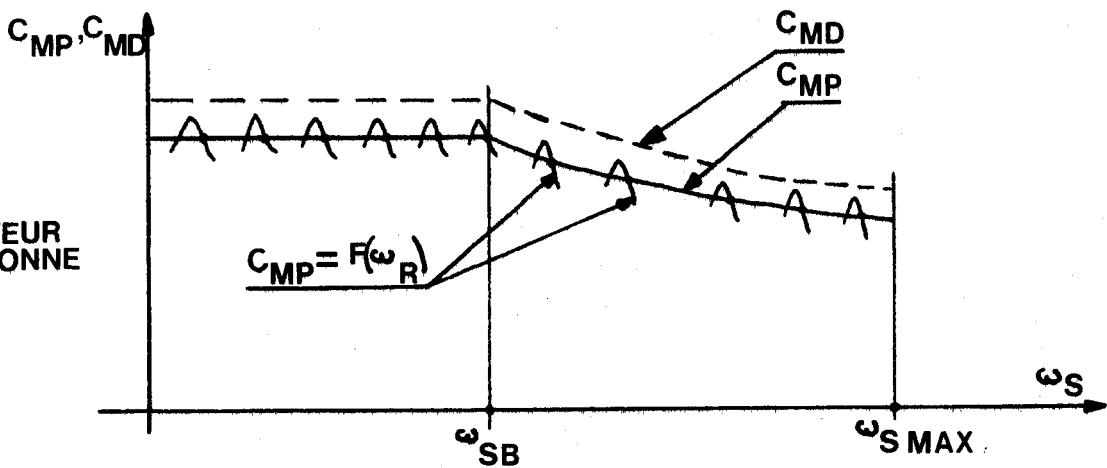


FIG.45 MOTEUR SOUS DIMENSIONNE



Il est donc nécessaire de se déterminer :

- dans la zone de fonctionnement à flux d'entrefer constant :
  - . la valeur du flux et donc le rapport constant  $E/\omega_s$
  - . le courant statorique  $I_{s max}$  assurant la pulsation rotorique  $\omega_r max$  et donc le couple moteur maximum possible
  - . la valeur de la pulsation de base  $\omega_{sb}$ .
- dans la zone de fonctionnement à affaiblissement du champ :
  - . les valeurs du couple moteur possible à  $\omega_r max$
  - . la valeur de la pulsation statorique  $\omega_{s max}$ .

IV.b.2. Simulation numérique

Le moteur asynchrone peut être représenté par un schéma équivalent ramenant toutes les grandeurs électriques au stator et à la pulsation statorique  $\omega_s$  (fig.46. et.47.).

On notera :

$Z_s$  l'impédance par phase vue du stator

$L_s$  la somme  $l_s + M$

$L_r$  la somme  $l_r + M$

SCHEMA 1

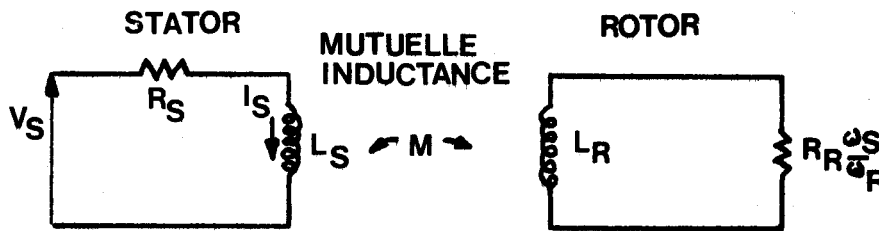


FIG.46

SCHEMA 2

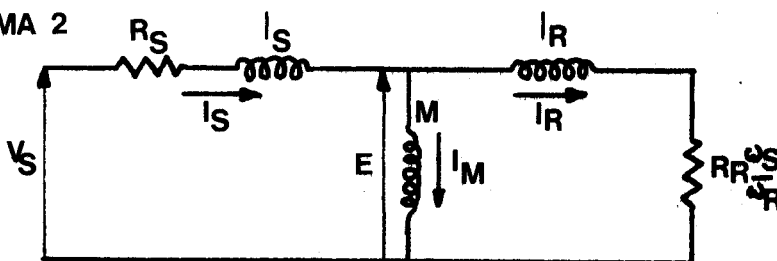


FIG.47

L'impédance par phase s'écrit :

$$Z_s = R_s + j l_s \omega_s + \frac{j \omega_s M (j \omega_s l_r + \frac{R_r \omega_s}{\omega_r})}{j \omega_s M + j \omega_s l_r + R_r \frac{\omega_s}{\omega_r}}$$

$$M^2 \omega_s$$

Soit :

$$Z_s = R_s + j L_s \omega_s + \frac{R_r}{\omega_r} + j L_r \quad (41)$$



Le comportement du moteur asynchrone est celui d'un système asservi, où, les grandeurs d'entrée étant données ( $V_s, \omega_s$ ), la pulsation rototique réagit sur la valeur de l'impédance  $Z_s$  et détermine les courants  $I_s$  et  $I_r$  ainsi que le couple moteur  $C_m$ , grandeur de sortie (fig.48.).

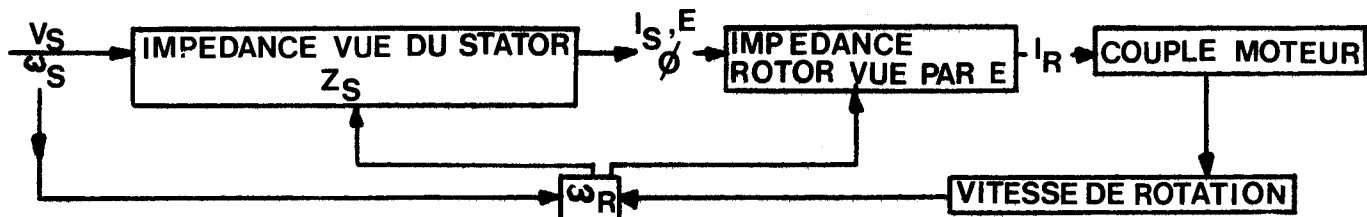


FIG.48

Le système asservi équivalent au moteur peut être intégré à l'ensemble de la rame (fig.49.).

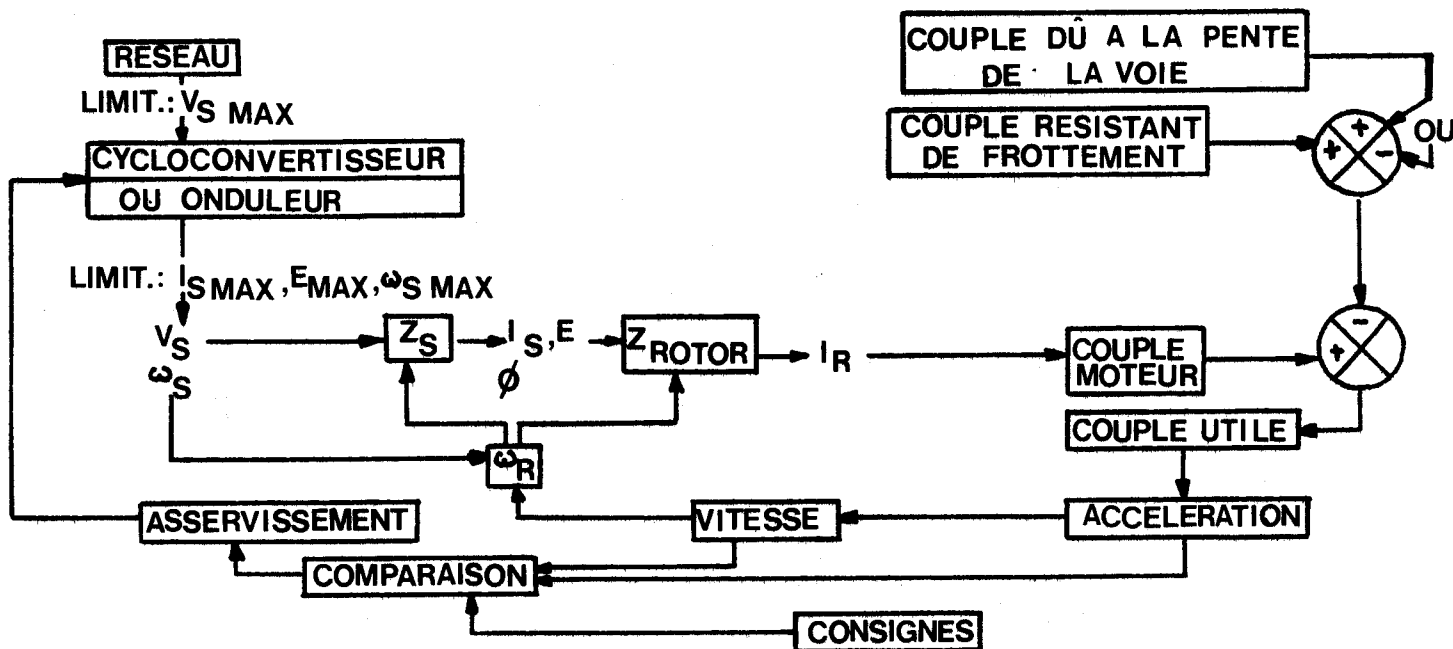


FIG.49

- Equations générales

Elles sont tirées du 2ème schéma électrique équivalent (fig.47.) et de la théorie générale sur les moteurs asynchrones (réf.bibl.C).

. Loi des tensions et courants

Si X représente la valeur efficace d'une grandeur, on notera x l'expression complexe qui lui correspond.

A tout instant, on peut écrire :

$$v_s = e + (R_s + j\omega_s l_s) i_s \quad (42)$$

de plus,  $Z_s$  étant l'impédance par phase vue du stator,

$$v_s = Z_s \cdot i_s \quad (43)$$

l'expression de  $i_s$  sera :

$$i_s = \frac{v_s}{R_s + jL_s \omega_s + \frac{M^2 \omega_s}{\frac{R_r}{\omega_r} + jL_r}} \quad (44)$$

et l'expression de  $i_r$  ramené au stator :

$$i_r = \frac{e}{R_r \frac{\omega_s}{\omega_r} + jL_r \omega_s} \quad (45)$$

Afin de faciliter la programmation dans la simulation des moteurs asynchrones, il semble intéressant d'exprimer toutes les grandeurs électriques en fonction du module du flux d'entrefer  $\phi$ ,

c'est-à-dire, puisque : 
$$j \phi = \frac{e}{\omega_s} \quad (46)$$

en fonction du rapport  $E/\omega_s = k$

*Expression du courant rotorique efficace  $I_r$  en fonction de  $k$*

On sait que :

$$i_r = \frac{e}{R_r \frac{\omega_s}{\omega_r} + j l_r \omega_s} \quad (\text{cf. relation (45)})$$

Ainsi :

$$i_r = \left( \frac{e}{\omega_s} \right) \cdot \frac{1}{\frac{R_r}{\omega_r} + j l_r}$$

et comme :

$$I_r^2 = \left( \frac{E}{\omega_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + l_r^2}$$

On a :

$$I_r = \frac{k}{\sqrt{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + l_r^2}} \quad (47)$$

*Expression du courant statorique efficace  $I_s$  en fonction de  $k$*

On sait que :

$$i_s = i_m + i_r \quad (\text{cf. fig. 47.})$$

soit :

$$i_s = e \left( \frac{1}{jM\omega_s} + \frac{1}{\frac{R_r \omega_s}{\omega_r} + jL_r \omega_s} \right)$$

ou encore :

$$i_s = \left( \frac{e}{\omega_s} \right) \frac{(R_r/\omega_r + jL_r)}{-L_r M + jMR_r/\omega_r} \quad (48)$$

Comme :

$$I_s^2 = \left( \frac{E}{\omega_s} \right)^2 \cdot \frac{1}{M^2} \cdot \frac{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + L_r^2}{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + L_r^2}$$

On a :

$$I_s = \frac{k}{M} \cdot \sqrt{\frac{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + L_r^2}{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + L_r^2}} \quad (49)$$

Expression de la tension statorique efficace  $V_s$  en fonction de  $k$

On sait que :

$$v_s = Z_s \cdot i_s \quad (\text{cf. relation .43.})$$

Ainsi :

$$V_s^2 = (\text{mod.} Z_s)^2 \cdot I_s^2$$

Or, compte tenu de l'expression de  $Z_s$  (relation 41) et de  $I_s$  (relation 49) :

$$(\text{mod.} Z_s)^2 = \frac{\left[ \frac{R_s R_r}{\omega_r} + \omega_s (M^2 - L_r L_s) \right]^2 + \left( L_s R_r \frac{\omega_s}{\omega_r} + R_s L_r \right)^2}{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + L_r^2}$$

et :

$$V_s^2 = \frac{k^2}{M^2} \cdot \frac{\left[ \frac{R_s R_r}{\omega_r} + \omega_s (M^2 - L_r L_s) \right]^2 + (L_s R_r \frac{\omega_s}{\omega_r} + R_s L_r)^2}{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + l_r^2}$$

On a donc :

$$V_s = \frac{k}{M} \cdot \sqrt{\frac{\left[ \frac{R_s R_r}{\omega_r} + \omega_s (M^2 - L_r L_s) \right]^2 + (L_s R_r \frac{\omega_s}{\omega_r} + R_s L_r)^2}{\left( \frac{R_r}{\omega_r} \right)^2 + l_r^2}} \quad (50)$$

. Loi des pulsations

La vitesse de rotation du rotor est telle que :

$$\Omega' = \frac{\omega_s - \omega_r}{p}$$

La loi des pulsations s'écrit :

$$\omega_s = \omega_r + p\Omega' \quad (51)$$

Si N désigne la vitesse de rotation de l'arbre moteur en t/mn :

$$\omega_s = \omega_r + \underline{p} N \quad \text{avec} \quad \underline{p} = \frac{\pi}{30} p \quad (51\text{bis})$$

. Expression du couple moteur en fonction du rapport k

Si l'on admet les hypothèses faites du point de vue des pertes dans le moteur, on peut lier  $P_T$ , puissance transmise au rotor à  $P_m$ , puissance mécanique utilisable par :

$$P_m = \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right) P_T$$

Les pertes Joule rotoriques seront :

$$P_{jr} = \frac{\omega_r}{\omega_s} P_T$$

qu'on peut encore écrire :

$$P_{jr} = q R_r I_r^2$$

Ainsi :

$$P_T = q R_r I_r^2 \frac{\omega_s}{\omega_r}$$

et donc :

$$P_m = q \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - 1\right) R_r I_r^2$$

Or la puissance mécanique s'exprime aussi par :

$$P_m = C_m \cdot \Omega'$$

d'où :

$$C_m = \frac{P_m}{\frac{\omega_s - \omega_r}{p}}$$

et

$$C_m = q \cdot p \frac{R_r}{\omega_r} \cdot I_r^2 \quad (52)$$

qu'on peut exprimer en fonction du rapport k :

$$C_m = \frac{q \cdot p \cdot k^2 \cdot R_r \omega_r}{R_r^2 + l_r^2 \omega_r^2} \quad (52bis)$$

- Analyse du couple Moteur

Représentons les variations du couple moteur en fonction de la pulsation des courants rotoriques (cf. relations 46 et 52bis).

. Dans la zone de fonctionnement à flux d'entrefer constant, le coefficient  $k$  est constant et possède sa valeur maximum.

Il existe alors une seule courbe de couple en fonction de la pulsation rotorique, quelle que soit la pulsation statorique (fig.50.).

. Dans la zone d'affaiblissement du champ,  $E$  est limitée à  $E_{\max}$  à partir de  $\omega_{sb}$ . Le coefficient  $k$  décroît donc suivant  $E_{\max}/\omega_s$  et le couple moteur suivant  $E_{\max}^2/\omega_s^2$  (fig.51.)

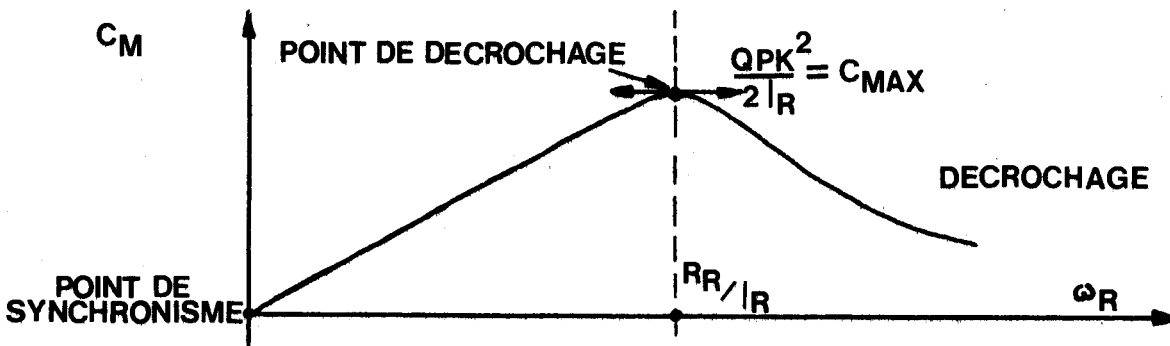


FIG.50 FLUX CONSTANT  $\omega_s \leq \omega_{sb}$

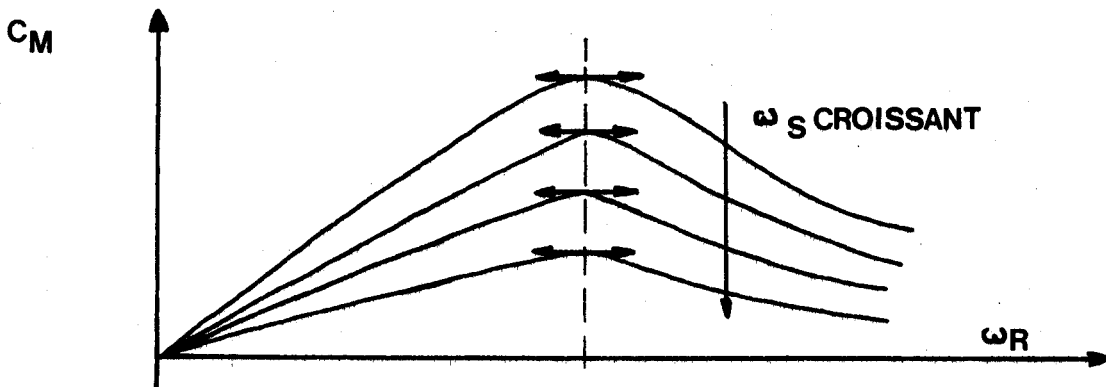


FIG.51 AFFAIBLISSEMENT DU CHAMP  $\omega_s > \omega_{sb}$

. Lorsque la pulsation statorique, avec l'augmentation de vitesse de rotation, atteint  $\omega_{smax}$ , la valeur du coefficient k devient :

$$E_{max} / \omega_{smax}$$

C'est à nouveau un fonctionnement à flux d'entrefer constant mais où la pulsation rotorique décroît avec l'augmentation de vitesse :

$$\omega_r = \omega_{smax} - \underline{p} N$$

Le couple moteur devient nul à la vitesse de synchronisme  $N_s = \frac{\omega_{smax}}{\underline{p}}$ , limite de vitesse pour la rame.

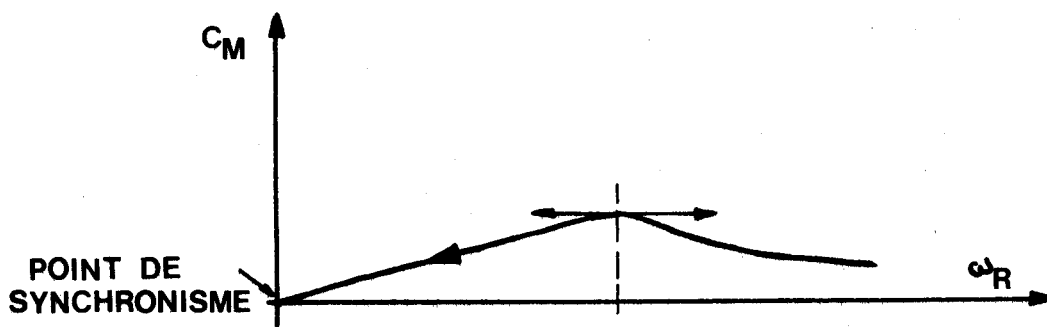


FIG.52 FLUX CONSTANT  $\omega_s = \omega_s MAX$

La partie de courbe conseillée pour un fonctionnement stable du moteur est celle comprise entre le point de décrochage et le point de synchronisme.

Si  $\omega_s < \omega_{smax}$ , il est toujours possible de fixer  $\omega_r$  à une valeur optimale, de manière à obtenir le meilleur rendement (fig.53.).

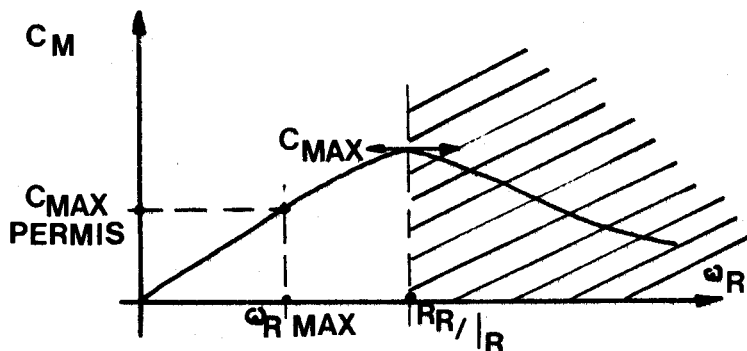


FIG. .53



Pour un dimensionnement donné des moteurs, il est donc possible de prévoir l'évolution réalisable du couple moteur en fonction de la pulsation statorique  $\omega_s$  (fig.54.).

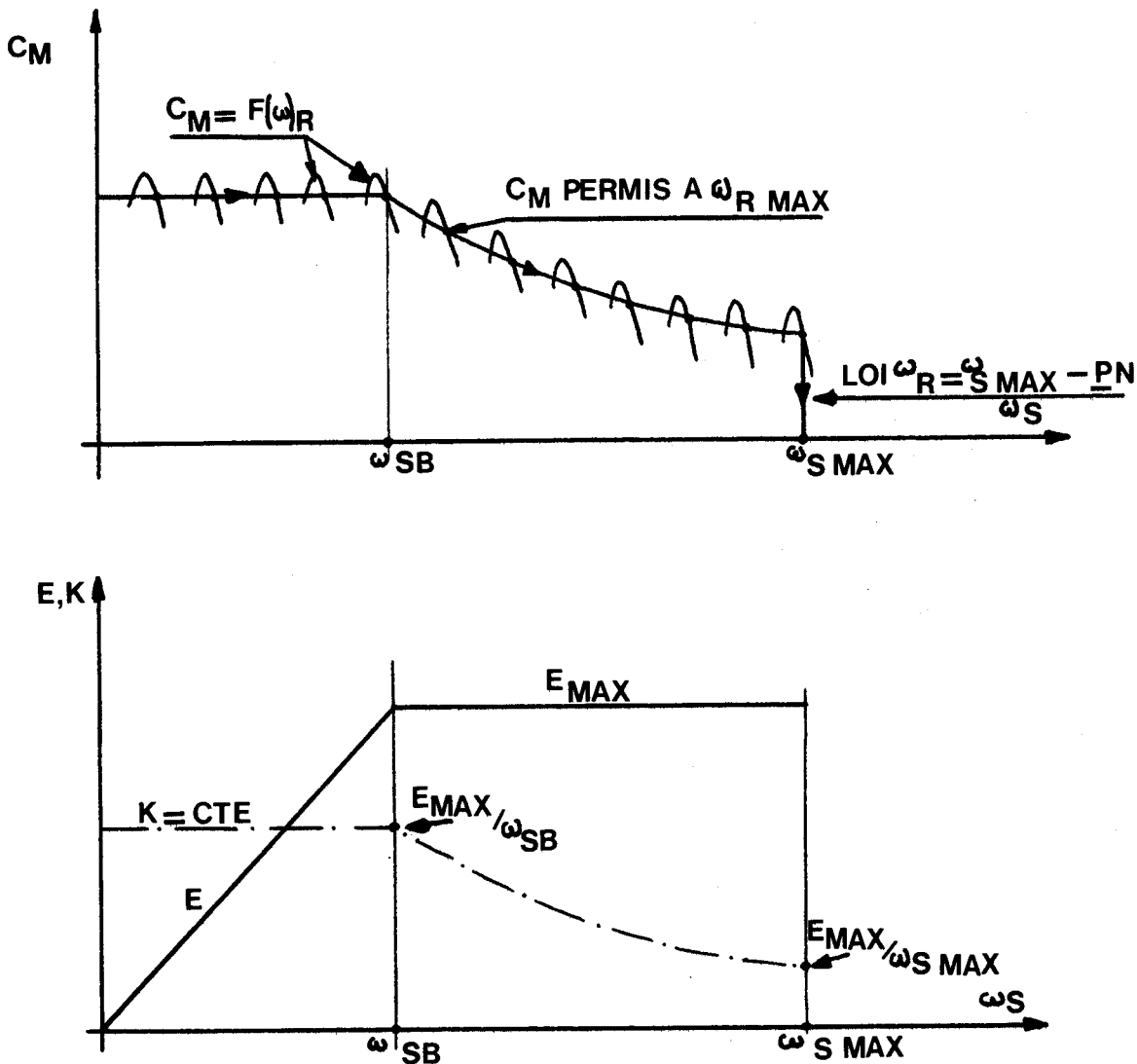


FIG. 54

- Détermination de  $I_{smax}$  assurant  $\omega_{rmax}$  pour un fonctionnement à flux d'entrefer constant

Compte tenu de la relation (49), on écrira :

$$I_{smax} = \frac{k}{M} \sqrt{\frac{\left(\frac{R_r}{\omega_{rmax}}\right)^2 + L_r^2}{\left(\frac{R_r}{\omega_{rmax}}\right)^2 + l_r^2}} \quad (53)$$

VI.b.3. Détermination du couple moteur possible à une certaine vitesse de la rame

Suivant la position de la pulsation statorique par rapport à la pulsation statorique de base  $\omega_{sb}$  et la pulsation maximum  $\omega_{smax}$ , l'expression de  $C_{mp}$  est caractéristique de chaque zone de fonctionnement ; elle est tirée de la relation (52.bis).

On supposera que la rame se déplace à la vitesse  $V_r$ , à laquelle correspond une vitesse de rotation des rotors :

$$N_r = V_r \cdot \frac{30}{\pi R X} \quad (\text{cf. relation 12})$$

1er cas  $\omega_s \leq \omega_{sb}$ . Fonctionnement à flux d'entrefer constant.

On est bien dans le cas prévu si :

$$\omega_{rmax} + \frac{p}{2} N_r \leq \omega_{sb}$$

Alors :

$$C_{mp} = \frac{qpk^2 R_r \omega_{rmax}}{R_r^2 + l_r^2 \omega_{rmax}^2} = \text{constante} \quad (54)$$

2ème cas  $\omega_{sb} \leq \omega_s \leq \omega_{smax}$ . Fonctionnement à affaiblissement du champ

On est bien dans le cas prévu si :

$$\omega_{sb} \leq \omega_{rmax} + \frac{p}{2} N_r \leq \omega_{smax}$$

Alors :

$$C_{mp} = \frac{qp E_{max}^2 R_r \omega_{rmax}}{(\omega_{rmax} + \frac{p}{2} N_r)^2 (R_r^2 + l_r^2 \omega_{rmax}^2)} \quad (55)$$

3ème cas  $\omega_s = \omega_{smax}$ . Fonctionnement à fréquence statorique maxi

On est bien dans le cas prévu si :

$$\omega_{rmax} + \frac{p}{2\pi} N_r \geq \omega_{smax}$$

alors :  $\omega_r = \omega_{smax} - \frac{p}{2\pi} N_r$

et

$$C_{mp} = \frac{qp E_{max}^2 R_r (\omega_{smax} - \frac{p}{2\pi} N_r)}{\omega_{smax}^2 [R_r^2 + l_r^2 (\omega_{smax} - \frac{p}{2\pi} N_r)^2]} \quad (56)$$

VI, b.4. Détermination des caractéristiques Tension, Courant, Fréquence des moteurs à partir du couple moteur réel

Le couple moteur réel est toujours égal soit au couple moteur demandé pour réaliser les consignes d'accélération, soit au couple moteur maximum possible, tenant compte des limitations dans chaque zone de fonctionnement. Soit  $C_{mr}$  sa valeur.

La valeur de lapulsation rotorique réelle ne peut être connue directement. Il est nécessaire de la calculer pour chacune des zones de fonctionnement.

La valeur réelle est celle qui est compatible, dans une zone, avec les conditions exigées pour la pulsation statorique.

1er Calcul

Supposons que le fonctionnement est à flux d'entrefer constant.

On a :

$$C_{mr} = \frac{qp k^2 R_r \omega_{rr}}{R_r^2 + l_r^2 \omega_{rr}^2}$$

On aboutit à l'équation du second degré :

$$(C_{mr} l_r^2) \omega_{rr}^2 - (qpk^2 R_r) \omega_{rr} + C_{mr} R_r^2 = 0$$

d'où l'on tire la plus petite des deux racines puisque le point de fonctionnement doit se trouver entre le décrochage et le synchronisme.  
Soit :

$$\omega_{rr} = \frac{qpk^2 R_r - \sqrt{\Delta}}{2C_{mr} l_r^2} \quad (57)$$

avec 
$$\Delta = (qpk^2 R_r)^2 - 4C_{mr}^2 l_r^2 R_r^2$$

et 
$$\sqrt{\Delta} = R_r \sqrt{q^2 p^2 k^4 - 4C_{mr}^2 l_r^2}$$

Si la condition : 
$$\omega_{rr} + \underline{p} N_r \leq \omega_{sb}$$

est réalisée :  $\omega_{rr}$  est bien la valeur réelle.

Si elle n'est pas réalisée : on passe aux calculs suivants.

2ème calcul

Supposons que le fonctionnement est à affaiblissement du champ.

On a :

$$C_{mr} = \frac{qp E_{\max}^2 R_r \omega_{rr}}{(\omega_{rr} + \underline{p} N_r)^2 (R_r^2 + l_r^2 \omega_{rr}^2)}$$

On aboutit à une équation du quatrième degré en  $\omega_{rr}$  difficilement résolvable.

En admettant que le point de fonctionnement se trouve suffisamment loin du point de décrochage, on peut négliger le terme  $l_r^2 \omega_{rr}^2$  devant  $R_r^2$ ,  
et l'on écrit :

$$C_{mr} = \frac{qp E_{\max}^2 \omega_{rr}}{R_r (\omega_{rr} + \underline{p} N_r)^2}$$

L'équation de résolution est alors du second degré :

$$\omega_{rr}^2 (R_r C_{mr}) + \omega_{rr} (2pN_r R_r C_{mr} - qpE_{max}^2) + C_{mr} R_r p^2 N_r^2 = 0$$

D'où l'on tire la racine utile :

$$\omega_{rr} = \frac{qp E_{max}^2 - 2p N_r R_r C_{mr} - \sqrt{\Delta}}{2R_r C_{mr}} \quad (58)$$

avec :

$$\Delta = q^2 p^2 E_{max}^4 - 4 qp p E_{max}^2 N_r R_r C_{mr}$$

et

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{qp E_{max}^2 (qp E_{max}^2 - 4p N_r R_r C_{mr})}$$

Si la condition :  $\omega_{rr} + p N_r \leq \omega_{smax}$

est réalisée :  $\omega_{rr}$  calculé est bien la valeur réelle.

Si elle n'est pas réalisée, on passe au dernier calcul.

### 3ème calcul

Le fonctionnement est à fréquence statorique maximum.

Ainsi :

$$\omega_{rr} = \omega_{smax} - p N_r \quad (59)$$

avec  $\omega_{smax} = 2\pi f_{smax}$

$f_{smax}$  étant la fréquence maximum fournie.

### Calcul de la fréquence statorique réelle

Connaissant la valeur réelle  $\omega_{rr}$  de la pulsation rotorique :

$$f_{sr} = \frac{\omega_{rr} + p N_r}{2\pi} = \frac{\omega_{sr}}{2\pi} \quad (60)$$

Calcul de la tension induite  $E_r$  du coefficient  $k_r$  (cf. relation .46.)

. Si  $\omega_{sr} \leq \omega_{sb}$   $k_r$  a pour valeur le module prévu du flux constant  
 et  $E_r = k\omega_{sr}$  (61)

. Si  $\omega_{sb} \leq \omega_{sr} \leq \omega_{smax}$   $E_r = E_{max}$   
 et  $k_r = \frac{E_{max}}{\omega_{sr}}$  (62)

. Si  $\omega_{sr} = \omega_{smax}$   $E_r = E_{max}$   
 et  $k_r = \frac{E_{max}}{\omega_{smax}}$  (63)

Calcul du courant rotorique réel (cf. relations.52. et .47.)

On a :

$$I_{rr} = \sqrt{\frac{C_{mr} \omega_{rr}}{qpR_r}} \quad \text{ou} \quad \frac{k_r}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{\omega_{rr}}\right)^2 + l_r^2}} \quad (64)$$

Calcul du courant statorique réel (cf. relation.49.)

On a :

$$I_{sr} = \frac{k_r}{M} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{R_r}{\omega_{rr}}\right)^2 + l_r^2}{\left(\frac{R_r}{\omega_{rr}}\right)^2 + l_r^2}} \quad (65)$$

Calcul de la tension statorique réelle (cf. relation.50.)

On a :

$$V_{sr} = \frac{k_r}{M} \cdot \sqrt{\frac{\left[\frac{R_{sr}}{\omega_{rr}} + \omega_{sr}(M^2 - L_r L_s)\right]^2 + \left(L_{sr} \frac{\omega_{sr}}{\omega_{rr}} + R_{sr} L_r\right)^2}{\left(\frac{R_r}{\omega_{rr}}\right)^2 + l_r^2}} \quad (66)$$

CHAPITRE.VII.

CALCUL DE LA CONSOMMATION EN ENERGIE ELECTRIQUE DE LA RAME

VII.a. Energie totale

L'énergie totale, consommée par la rame, lors de son déplacement sur la voie, est la somme :

- de l'énergie consommée par les moteurs en régime de traction ( $W_3$ ) et transformée en énergie mécanique ( $W_{méca}$ )
- de l'énergie consommée sous forme calorifique lors du transport du courant dans les lignes ( $W_{total} - W_1$ )
- de l'énergie consommée dans les organes de commande des moteurs ( $W_1 - W_2$ )
- des pertes dont on n'a pas tenu compte dans la simulation des moteurs (pertes fer, pertes mécaniques ...) ( $W_4$ ).

Soient  $\eta_1$  le rendement des lignes de transport du courant  
 $\eta_2$  le rendement des organes de commande des moteurs.

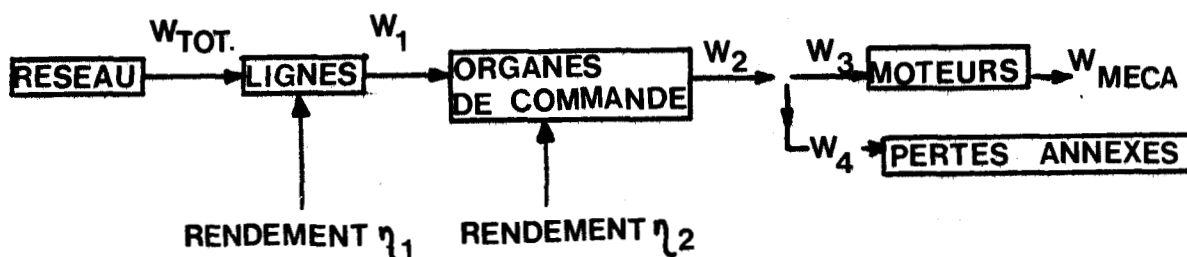


FIG. 55

Pour une rame, l'énergie totale consommée est :

$$W_{\text{total}} = \frac{(W_3) + (W_4)}{\eta_2 \cdot \eta_1} \quad (67)$$

En admettant que les organes de commande permettent, lors du freinage de la rame, la récupération par le réseau de l'énergie électrique produite par les moteurs fonctionnant en génératrices ( $W_r$ ), l'énergie totale réellement consommée sera :

$$W_{\text{total}} = \frac{W_3 + W_4}{\eta_2 \cdot \eta_1} - W_r \quad (68)$$

Le cadre de notre thèse étant limité à l'étude de la motorisation, nous ne nous intéresserons qu'au calcul de la seule énergie  $W_3$ , consommée par les moteurs en régime de traction.

### VII.b. Energie de traction pour rame à moteurs série

Soient :

U la tension moyenne aux bornes d'un moteur

I le courant moyen traversant l'induit, à un instant t

$W_0$  l'énergie consommée par la rame à l'instant  $t_0$

$W_1$  " " " " " " "  $t_1$

$Dt = t_1 - t_0$  l'incrément de temps correspondant à un incrément DV.

Pour un moteur à courant continu, la puissance instantanée s'écrit en fonction de l'énergie W :

$$P(t) = \frac{dW}{dt} = U(t) \cdot I(t) \quad (69)$$

L'accroissement d'énergie consommée par la rame, comportant n moteurs identiques, pendant l'incrément DV, sera :

$$dW_0^1 = W_1 - W_0 = n \int_{t_0}^{t_1} U(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad (70)$$



Pour simplifier le calcul de l'énergie, on peut linéariser l'expression en supposant que, pendant l'incrément DV, on a :

$$U(t) = U_0 + \frac{U_1 - U_0}{Dt} \cdot t = U_h \quad (71)$$

$$I(t) = I_0 + \frac{I_1 - I_0}{Dt} \cdot t = I_h \quad (72)$$

pour t variant de 0 à Dt.

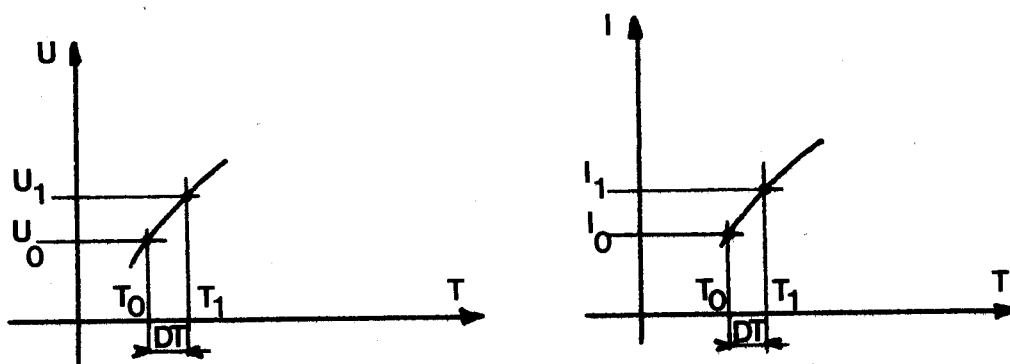


FIG.56

L'expression (70) s'écrit alors :

$$DW_0^1 = n \int_0^{Dt} U_h \cdot I_h \cdot dt$$

et, en tenant compte de (71) et (72) :

$$DW_0^1 = n \cdot Dt \cdot \left( \frac{U_0 I_0 + U_1 I_1}{3} + \frac{U_1 I_0 + U_0 I_1}{6} \right) \quad (73)$$

### VII.c. Energie de traction pour rame à moteurs asynchrones

Soient :

- $R_s$  et  $R_r$  les résistances des phases statoriques et rotoriques
- $q$  le nombre de phases d'un moteur
- $p$  le nombre de paires de pôles

- $I_r$  la valeur efficace par phase des courants rotoriques  
de pulsation  $\omega_r$
- $I_s$  la valeur efficace par phase des courants statoriques  
de pulsation  $\omega_s$
- $P_T$  la puissance transmise au rotor d'un moteur sous forme active
- $C_m$  le couple moteur fourni par un moteur de la rame
- $W_0$  l'énergie consommée par la rame à l'instant  $t_0$
- $W_1$  " " " " " " "  $t_1$
- $Dt = t_1 - t_0$  l'intervalle de temps correspondant à un incrément DV.

Pour un moteur asynchrone, la puissance réellement consommée sous forme active est :

$$P = P_T + \underbrace{q R_s I_s^2}_{\text{Pertes Joules au stator}}$$

Si  $R_s$  est suffisamment faible, on peut, avec une bonne approximation, négliger les pertes Joule du stator et dire :

$$P = P_T = q R_r I_r^2 \frac{\omega_s}{\omega_r}$$

La puissance instantanée s'écrit donc, en tenant compte de la relation (52) :

$$P(t) = \frac{C_m(t) \cdot \omega_s(t)}{p} \quad (74)$$

Pour une rame, comportant  $n$  moteurs, l'accroissement d'énergie consommée durant l'incrément DV sera :

$$DW_0^1 = W_1 - W_0 = \frac{n}{p} \int_{t_0}^{t_1} C_m(t) \omega_s(t) \cdot dt \quad (75)$$

En linéarisant  $C_m(t)$  et  $\omega_s(t)$  sur l'incrément DV, on a :

$$C_m(t) = C_{m_0} + \frac{C_{m_1} - C_{m_0}}{Dt} \cdot t = C_{mh} \quad (76)$$

et

$$\omega_s(t) = \omega_{s_0} + \frac{\omega_{s_1} - \omega_{s_0}}{Dt} \cdot t = \omega_{sh} \quad (77)$$

pour  $t$  variant de 0 à  $Dt$ .

L'expression (75) devient :

$$DW_o^1 = \frac{n}{p} \cdot \int_0^{Dt} C_{mh} \cdot \omega_{sh} \cdot dt$$

et, en tenant compte des relations (76) et (77) :

$$DW_o^1 = \frac{n}{p} \cdot Dt \cdot \left( \frac{\omega_{s_o} C_{m_o} + \omega_{s_1} C_{m_1}}{3} + \frac{\omega_{s_1} C_{m_o} + \omega_{s_o} C_{m_1}}{6} \right) \quad (78)$$

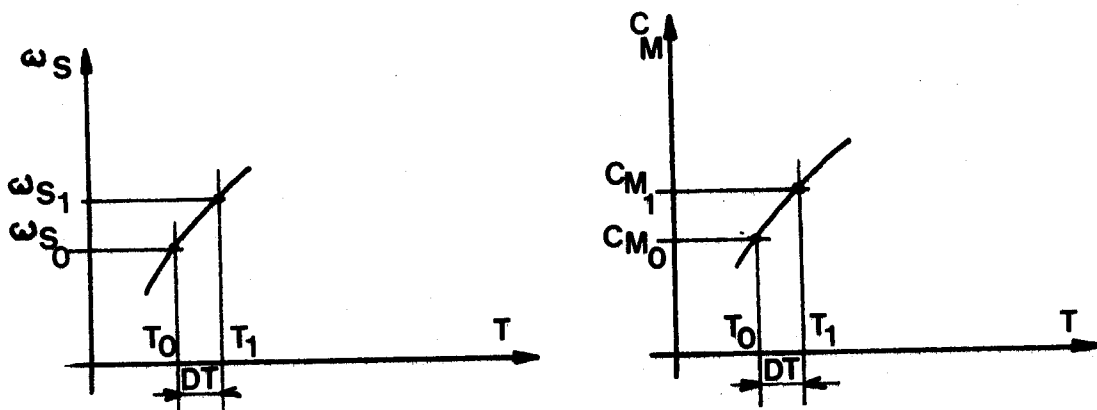


FIG. 57

## CHAPITRE.VIII.

### PROGRAMME DE SIMULATION

---

La modélisation numérique précédente a été programmée sur calculatrice HEWLETT-PACKARD modèle 9810A.

L'organigramme de ce programme, valable en n'importe quel langage, est détaillé en page suivante.

#### VIII.a. Fonctionnement

On range en MEMOIRES FIXES :

- . les CONSIGNES de vitesse et d'accélération
- . les caractéristiques électriques des MOTEURS
- . les caractéristiques mécaniques de la RAME
- . les LIMITATIONS de tension, courant, fréquence.

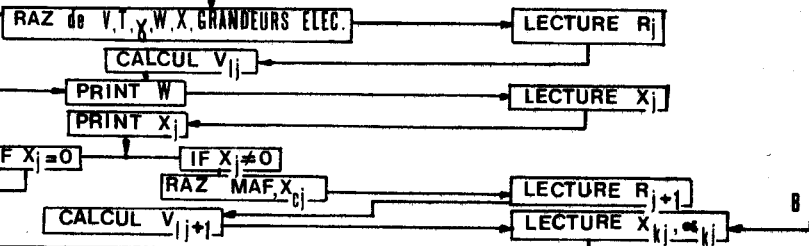
L'ordre de départ remet à zéro les MEMOIRES DE CALCUL et entame la succession des procédures.

La calculatrice est alors autonome sur tout le parcours, dans la mesure où celui-ci est convenablement décrit grâce au stockage (par exemple sur bande perforée), des grandeurs suivantes :

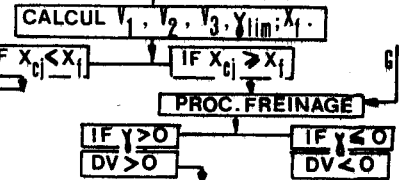
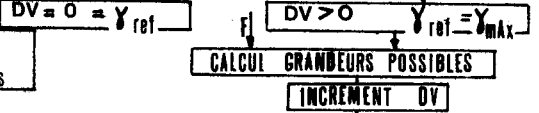
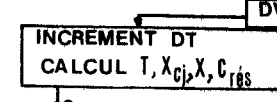
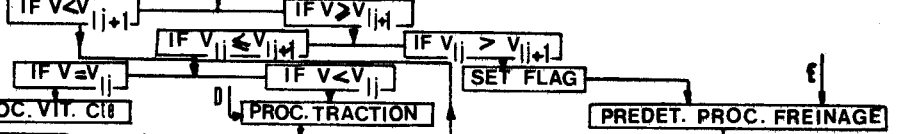
- distances des tronçons ( $X_j$ )
- rayons de courbure des tronçons ( $R_j, R_{j+1}$ )
- distances cumulées ( $X_{kj}$ ) des sous-tronçons et valeurs des pentes ( $\alpha_{kj}$ ) correspondantes
- temps d'arrêt en station.

CHARGEMENT MEMOIRES FIXES :  
CONSIGNES, CARACT. ELEC. & MECA., LIMIT.

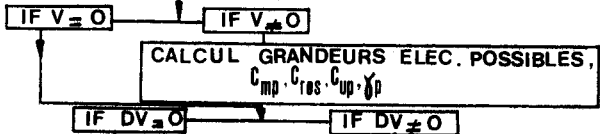
ORDRE DEPART



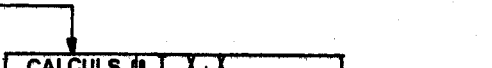
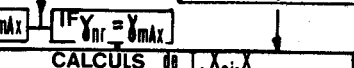
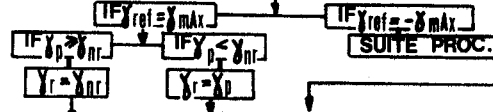
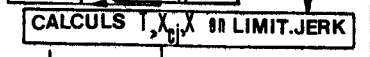
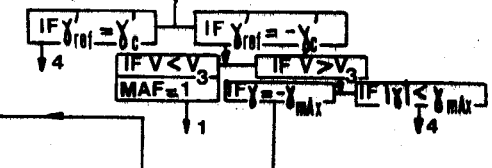
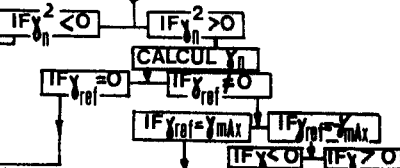
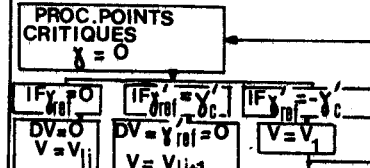
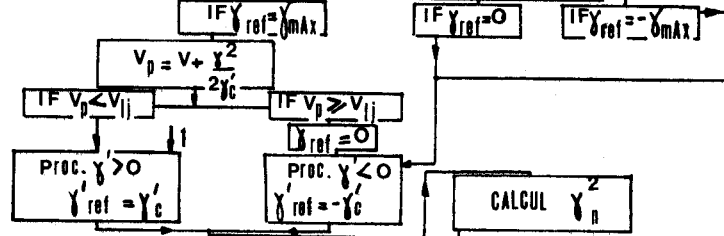
AIGUILLAGE DE REGIME



PROC. MOTEURS



PROC. LIMIT, JERK

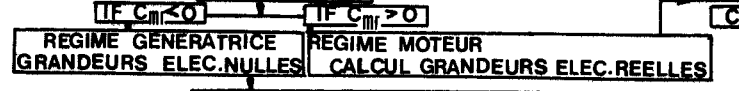


CALCUL des GRANDEURS REELLES

GRANDEURS REELLES = GRANDEURS POSSIBLES

CALCUL de C<sub>mr</sub>

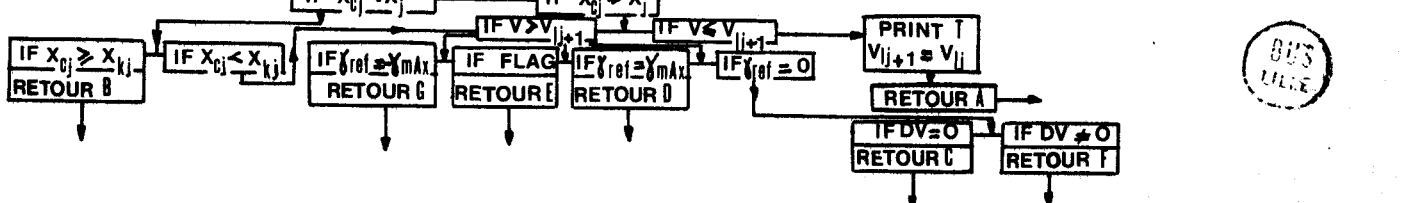
CALCUL CONSOMMATION ENERGETIQUE



REINITIALISATION GRANDEURS

PROC. TRACE COURBES

BOUCLAGE



ORGANIGRAMME DU PROGRAMME DE MODELISATION DE LA RAME

Légende

V	Vitesse réelle de la rame
$V_{1j}$	Vitesse limite du tronçon j
$V_{1j+1}$	Vitesse limite du tronçon j+1
$V_1$	Vitesse maximum en freinage pour laquelle $\gamma = 0$
$V_2$	Vitesse maximum en freinage pour laquelle $\gamma = (-\gamma_{\max})$
$V_3$	Vitesse minimum en freinage pour laquelle $\gamma = (-\gamma_{\max})$
$V_p$	Vitesse de la rame augmentée de $\gamma^2/2\gamma_c'$
DV	Incrément de vitesse
T	Temps de parcours total
$T_s$	Temps d'arrêt dans une station
Dt	Incrément de temps pour $V = \text{constante}$
$R_j$	Rayon de courbure du tronçon j
$R_{j+1}$	Rayon de courbure du tronçon j+1
X	Distance parcourue totale
$X_j$	Distance du tronçon j
$X_{kj}$	Distance du sous-tronçon kj (valeur cumulée sur j)
$X_{cj}$	Distance parcourue sur le tronçon j
$X_f$	Distance sur le tronçon j à partir de laquelle doit débiter le freinage
$\alpha_{kj}$	Pente de la voie du sous-tronçon kj
W	Energie électrique consommée
$\gamma$	Accélération réelle de la rame
$\gamma_{\text{réf}}$	Mémoire caractéristique du régime de marche
$\gamma_{\text{lim}}$	Décélération maximum possible en régime de freinage
$\gamma_{\text{max}}$	Taux d'accélération ou de décélération maximum de consigne

$\gamma'_{\text{réf}}$	Mémoire du signe de la dérivée d'accélération
$\gamma'_c$	Valeur maximum de la dérivée d'accélération de consigne
$\gamma_n$	Accélération de consigne calculée suivant limitation de jerk
$\gamma_{nr}$	Accélération de consigne définitive : $\text{mini}(\gamma_n, \frac{\pm}{\gamma_{\text{max}}})$
$\gamma_r$	Accélération équivalente à $\gamma$ , issue de $\gamma_r = \text{mini}(\gamma_{nr}, \gamma_p)$
$\gamma_p$	Accélération possible de la rame
MAF	Mémoire de freinage déterminant le signe de la dérivée d'accélération
$C_{\text{rés}}$	Couple résistant total
$C_{\text{mp}}$	Couple moteur possible tenant compte des limitations
$C_{\text{up}}$	Couple utile à l'accélération de la rame possible
$C_{\text{mr}}$	Couple moteur réel
grandeurs élec.	Tensions, courants, fréquences, flux ...
PRINT	Ordre d'impression
LECTURE	Ordre de lecture de grandeurs stockées sur bande perforée
IF ...	Si la condition ... est réalisée
RAZ	Remise à zéro
SET FLAG	Mise en mémoire de FLAG
PROC	Procédure

### VIII.b. Possibilités

Ce programme de simulation permet, pour chaque tronçon, de calculer le temps de parcours et la consommation énergétique de la rame et de les imprimer

, de tracer graphiquement (en utilisant une table traçante couplée à la calculatrice) les grandeurs jugées utiles, qu'elles soient :

- cinématiques (vitesse, accélération, distance, temps)
- mécaniques (couples divers)
- électriques (tension, courants, fréquence, flux ...)
- ou énergétiques.

Tous les paramètres, en mémoires fixes ou stockés sur bande perforée, sont susceptibles d'être facilement changés ; on voit la possibilité d'étudier rapidement l'influence de chacun sur le comportement général de la rame.

Le type même des moteurs de la rame peut être changé ; après avoir établi les nouvelles équations électriques de la rame, il suffit de les placer à l'endroit prévu dans le programme, ceci ne modifiant en aucune façon la logique de son déroulement.

Le principe de cette simulation reste donc très général et permet de caractériser le comportement d'un système de transport quelconque à traction électrique automatique. L'application en a été faite à des rames comportant des moteurs série à courant continu ou asynchrones à courant alternatif.

#### VIII.c. Limites

Les limites de ce programme concernent principalement les différents hypothèses émises :

- on néglige le temps de commutation traction-freinage pendant lequel la rame roule sur l'erre
- on néglige le temps de réponse et les erreurs dûes aux chaînes d'asservissement des organes de commande
- on suppose sans influence sur la consommation énergétique les pertes dans les moteurs autres que calorifiques
- l'énergie calculée est celle, consommée par les moteurs seuls, en régime de traction.

#### VIII.d. Performances

Le compromis entre la précision des calculs et le temps de calcul est très sensible lorsqu'on programme cette modélisation sur HEWLETT-PACKARD.



En effet, la précision exigeant l'emploi d'incrémentes petits, le temps de calcul et de tracé des courbes est relativement important.

Cependant, le type de calculatrice utilisée possède deux avantages essentiels :

- la simplicité de sa programmation et donc la possibilité d'une grande rapidité d'intervention
- son prix de revient en exploitation dérisoire.

Au stade d'un avant-projet d'étude de système, elle reste tout à fait intéressante.

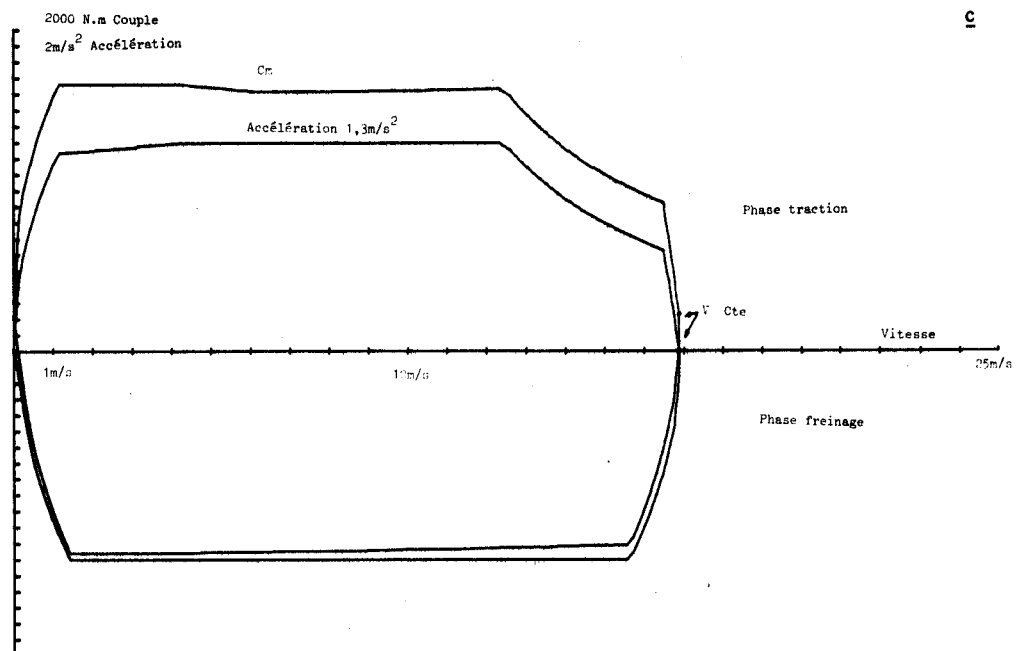
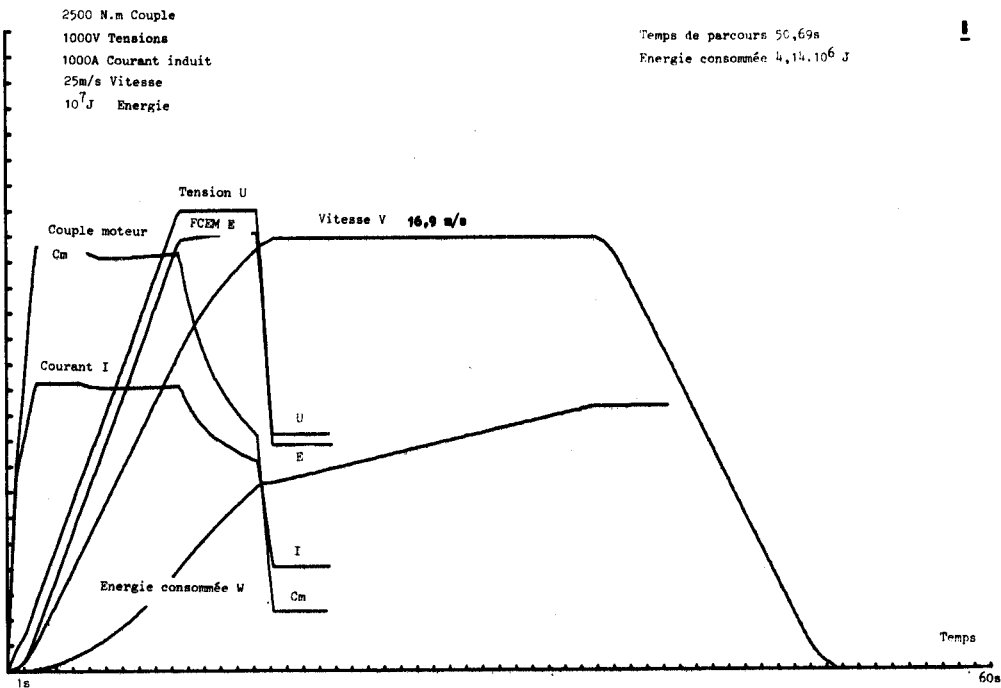
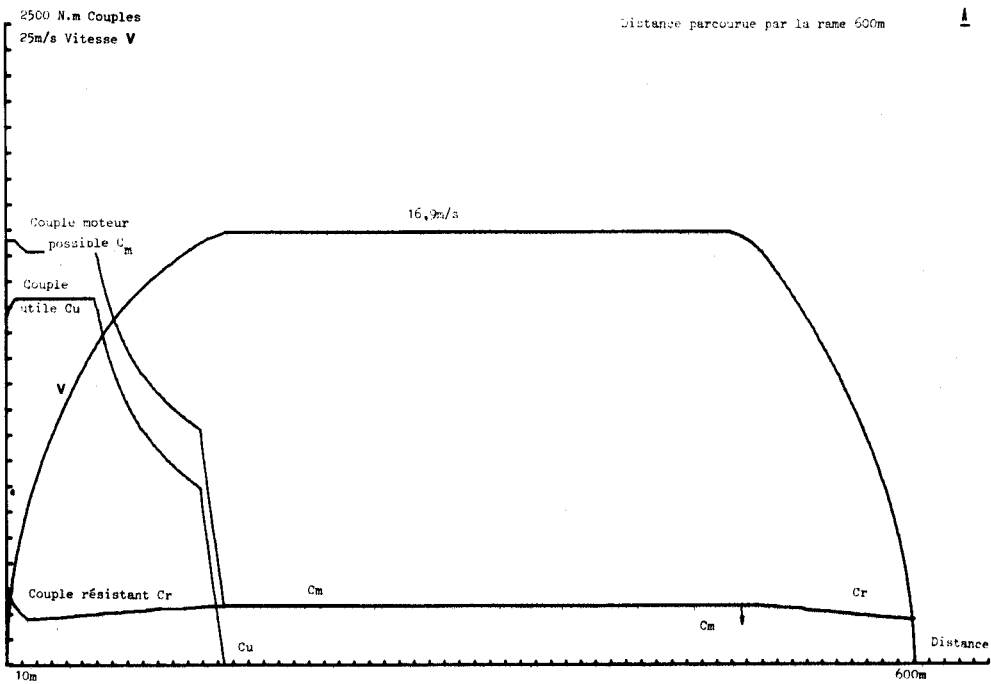
En utilisant l'ordinateur, le compromis précision - rapidité n'existe pratiquement plus. L'ordinateur deviendrait nécessaire si l'on projetait de grouper l'étude paramétrique complète et fine du système, et son étude économique, ceci pour l'ensemble des rames et un trafic variable suivant les stations et l'heure de la journée.

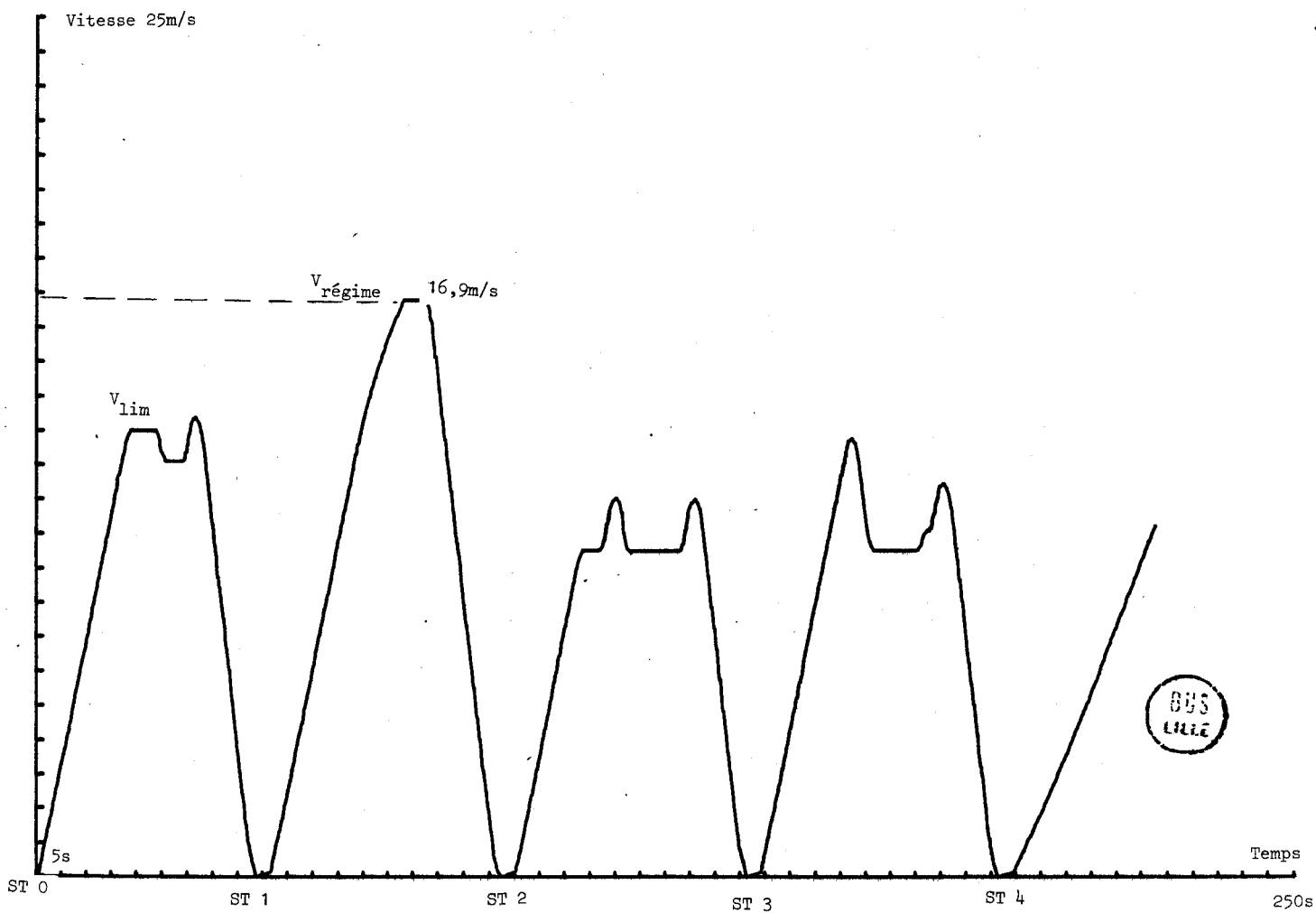
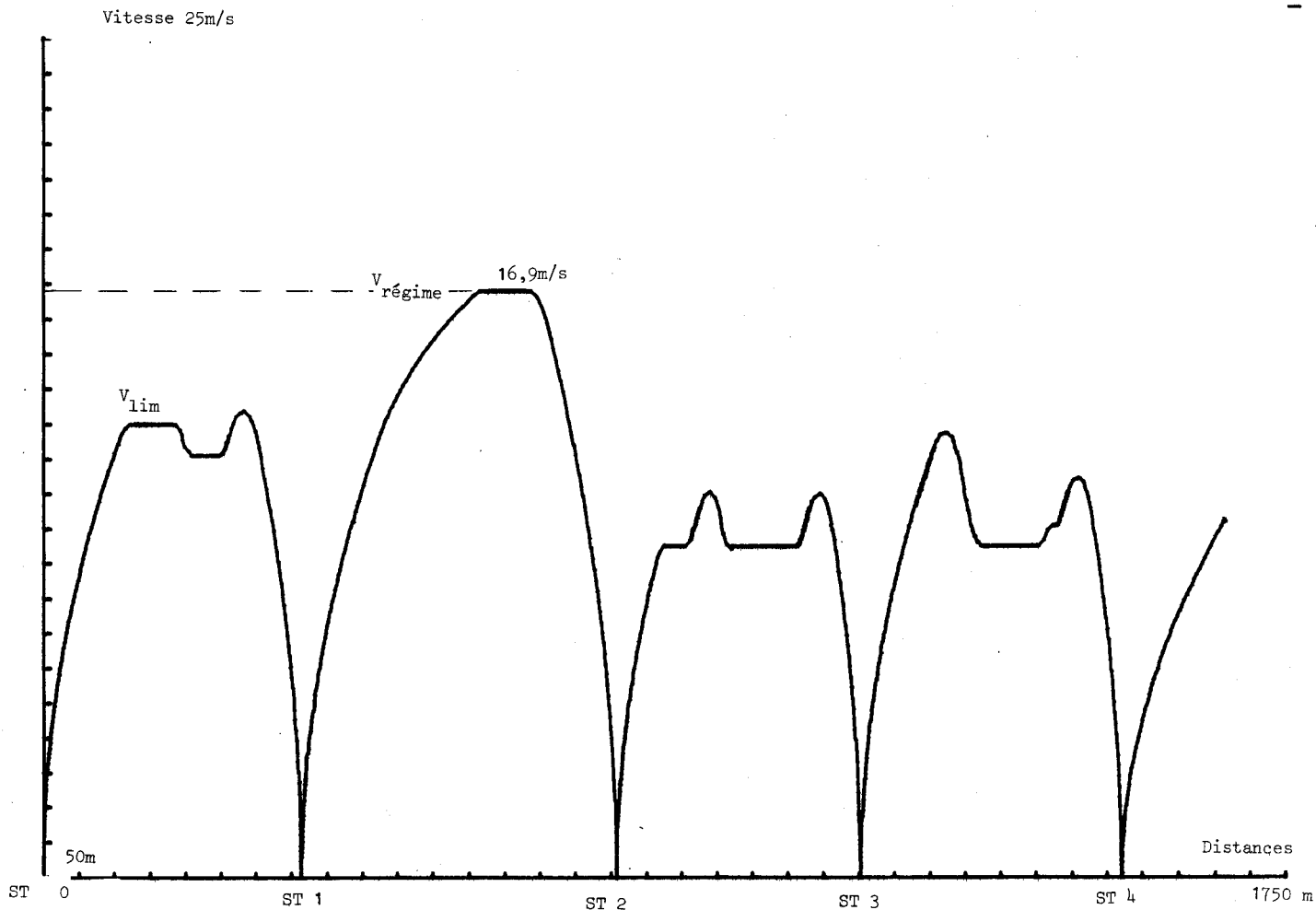
### VIII.e. Illustrations

Les planches qui suivent (A, B, C, D, E), mettent en évidence la possibilité de tracer toutes les grandeurs caractéristiques de la rame, qu'on juge intéressantes, tout en calculant le temps de parcours et l'énergie consommée par cette rame.

. Les planches A, B, C illustrent le comportement d'une rame parcourant une interstation ; elles présentent, lors de ce parcours, les variations de la vitesse, de l'accélération, du temps de parcours, de la distance parcourue, des divers couples, tensions et courants et de l'énergie consommée relatifs à la rame.

. Les planches D et E montrent la possibilité de tracer en continu les caractéristiques de la rame sur plusieurs interstations : en exemple, le tracé de la vitesse en fonction de la distance parcourue et du temps de parcours.





## 2ème PARTIE

### APPLICATIONS DE LA MODELISATION

*Etude des principaux paramètres influençant le temps de parcours et la consommation énergétique relatifs au parcours d'une rame du V.A.L. sur une interstation*

ETUDE DES PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUENCANT LE TEMPS DE PARCOURS  
ET LA CONSOMMATION ENERGETIQUE RELATIFS AU PARCOURS D'UNE RAME  
DU V.A.L. SUR UNE INTERSTATION.

Il nous a semblé intéressant d'appliquer les calculs précédents de simulation à l'exemple concret des rames prévues pour le V.A.L., et d'étudier l'influence des principaux paramètres sur le temps de parcours, la consommation énergétique d'une rame, lors de son parcours sur une interstation.

I.1. Résultats de l'étude paramétrique appliquée au V.A.L.

Nous pouvons tirer de l'étude paramétrique préliminaire les renseignements suivants :

- composition d'une rame : nombre et type de voitures, modules de base des voitures, capacité de transport.
- niveaux de qualité adoptés.
- . choix technologiques : nombre et type des moteurs série, dimensionnement des hâcheurs, du réseau d'alimentation ; masses à vide des rames, masses tournantes.

. Composition d'une rame

Une voiture du V.A.L. permet de transporter :

- en heure de pointe normale : 64 voyageurs
- en surpointe exceptionnelle : 88 voyageurs
- en surcharge : 120 voyageurs.

Afin de respecter l'intervalle maximum entre rames à l'heure de pointe, tout en assurant l'écoulement du flux de voyageurs, il faut utiliser des rames de deux ou trois voitures (cf.réf.bibl.A.1).

Les voitures pouvant être du type MOTRICE ou REMORQUE, on peut envisager, pour les comparer, des rames constituées de la façon suivante :

MOTRICE - MOTRICE (MM)  
MOTRICE - REMORQUE (MR)  
MOTRICE - REMORQUE - MOTRICE (MRM)

. Niveaux de qualité adoptés

L'étude paramétrique a permis d'optimiser, en restant dans les normes acceptables de confort :

- le taux d'accélération :  $1,3\text{m/s}^2$
- le taux de freinage :  $-1,3\text{m/s}^2$
- le taux maximum de la dérivée d'accélération ou de décélération par rapport au temps :  $0,65\text{m/s}^3$

. Choix technologiques

. Chaque MOTRICE comportera deux moteurs série à courant continu du type GLM 0332, montés en série.

. Le réseau d'alimentation pourra fournir aux bornes de ces moteurs une tension de ligne maximum  $U_{\text{max}} = 800\text{V}$

. Le hacheur sera dimensionné de telle manière qu'il puisse fournir un courant moyen maximum :  $I_{\text{max}} = 550\text{A}$ .

. les masses à vide et tournantes des voitures ont été déterminées comme suit

	MOTRICE	REMORQUE
Masse à vide (kg)	13027	8416
Masses tournantes (kg)	2123	453

La masse moyenne d'un voyageur est estimée à 70kgs.

I.2. Valeurs numériques nécessaires à la simulation de la rame comportant des moteurs série de type GLM0332 à commande par hâcheur

Ces valeurs numériques sont celles des caractéristiques mécaniques et électriques de la rame.

. Caractéristiques mécaniques

- Transmission                      Rapport  $1/6,83 = X = 0,1464$   
Rendement :  $\eta = 0,929$
- Roues                                  Développement : 2,91m  
Rayon R = 0,463m
- Accélération de la pesanteur :  $g = 9,81m/s^2$
- Efforts résistants                      (cf.réf.bibl.A.6)

L'effort résistant total sur une voiture de masse 14 tonnes est :

$$F(N) = P(1450 - 360 V) + 1550 + 2,98V^2 \quad \text{avec } V \text{ en m/s}$$

La relation (16) exprimait le couple résistant total :

$$C_{rés} (N.m) = P(A-BN) + C_r + FN + DN^2 \quad \text{avec } N \text{ en t/mn}$$

Les coefficients de cette relation, seront donc, pour une voiture de masse  $M_{\text{transl}}$  en kg :

$$A = 105,838 \cdot \frac{M}{14 \cdot 10^3} \quad (\text{N.m})$$

$$B = 0,1866$$

$$F = 0$$

$$C_r = 113,138 \cdot \frac{M}{14 \cdot 10^3} \quad (\text{N.m})$$

$$D = 1,097 \cdot 10^{-5}$$

- Coefficients d'inertie et de pente

Nous savons (cf.relation 16) que :

$$C_{\text{moteur}} = J \frac{dN}{dt} + s \alpha_{kj} + C_{\text{rés}}$$

$\uparrow$                        $\uparrow$   
 C inertie              C pente

avec N en t/mn  
 $\alpha_{kj}$  en %

Rappelons que :

$$M_{\text{tot}} = M_{\text{vide}} + \Delta M_{\text{organes tournants}} + M_{\text{voyageurs}}$$

$$M_{\text{transl}} = M_{\text{vide}} + M_{\text{voyageurs}}$$

Les valeurs des coefficients d'inertie et de pente seront :

$$J = M_{\text{tot}} \cdot 5,1832 \cdot 10^{-4}$$

$$s = M_{\text{transl}} \cdot 0,716$$



- Vitesse de rotation et couple moteur

$$N(t/mn) = 39,08 \text{ V(km-h)}$$

$$C_{\text{mot}} \text{ (N.m)} = \frac{F_{\text{jante}} \text{ (N)}}{13,7}$$

. Caractéristiques électriques

Déterminons les grandeurs électriques équivalentes à celles d'une motrice comportant deux moteurs GLM 0332 montés en série.

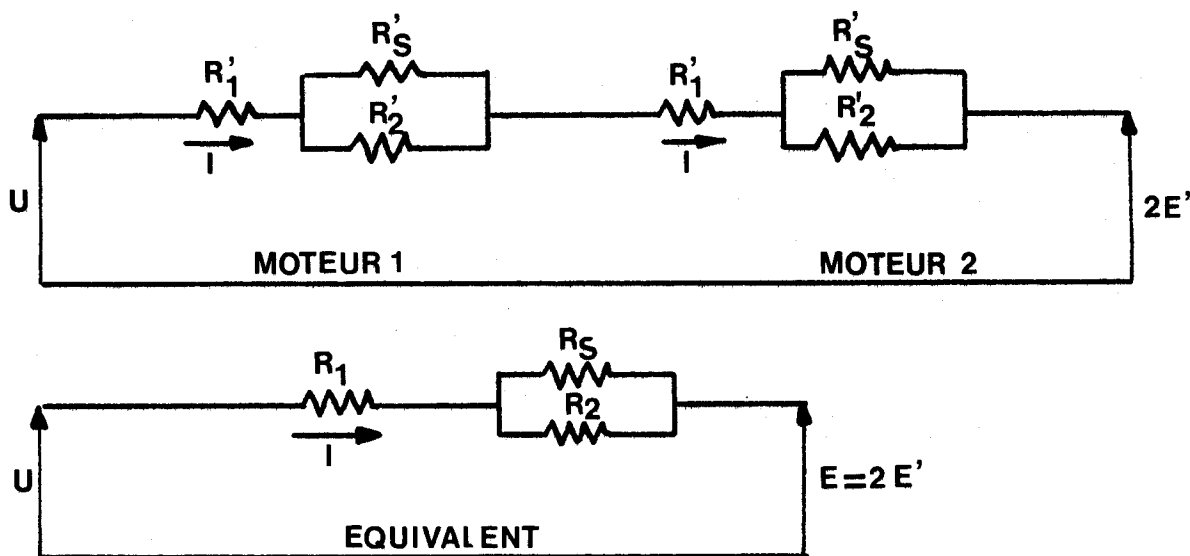


FIG. 58

Les différents relevés expérimentaux (cf. Annexe.1.) nous permettent d'écrire :

Grandeurs électriques pour une MOTRICE	Taux de shuntage des moteurs $\tau$			
	100%	72%	53%	41%
$U_{\max \max}$			800V	
$U_{\max \text{ nom.}}$			720V	
$I_{\max \max}$			550A	
$I_{\max \text{ nom.}}$		$\geq$	450A	
$R_1 = 2R'_1$			$8,026 \cdot 10^{-2} \Omega$	à 110°C
$R_2 = 2R'_2$			$2,986 \cdot 10^{-2} \Omega$	
$k$			$1,79 \cdot 10^{-3} \text{H}$	à 200A
$K = 2K'$			6	
$J_0$			245A	
$J'_0$			120A	
$k_\gamma = 2k'_\gamma$			6,983	
$k_e = 2k'_e$			0,731	
$I'_0 = \frac{J'_0}{\tau}$	120A	167A	226A	293A
$R_s = 2R'_s$	$\infty$	$7,66 \cdot 10^{-2} \Omega$	$3,36 \cdot 10^{-2} \Omega$	$2,07 \cdot 10^{-2} \Omega$
$Z$	$0,11012 \Omega$	$0,1414 \Omega$	$0,18144 \Omega$	
$m = \frac{1}{\tau}$	1	1,39	1,89	2,44

Les planches suivantes (1, 2 et 3) permettent de vérifier, lors de la modélisation de la rame, les caractéristiques prévues des moteurs de traction GLM 0332, dans trois cas de shuntage :

- 100% (planche.1.)
- 72% (planche.2.)
- 53% (planche.3.)

Ces planches mettent en évidence les courbes . de vitesse  
 . de couples  
 . de courant et tension

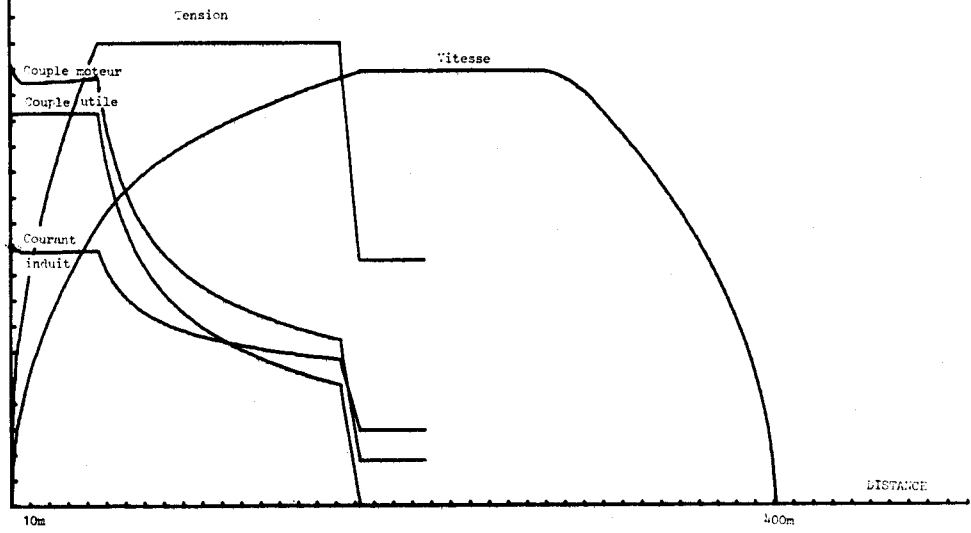
en fonction de la distance parcourue par la rame sur une interstation test de 400m.



2500N-m COUPLES  
25m/s VITESSE  
1000A COURANT  
1000V TENSION

RAME A DEUX MOTEURS GLM 0332  
TAUX DE SHUNTAGE 100%

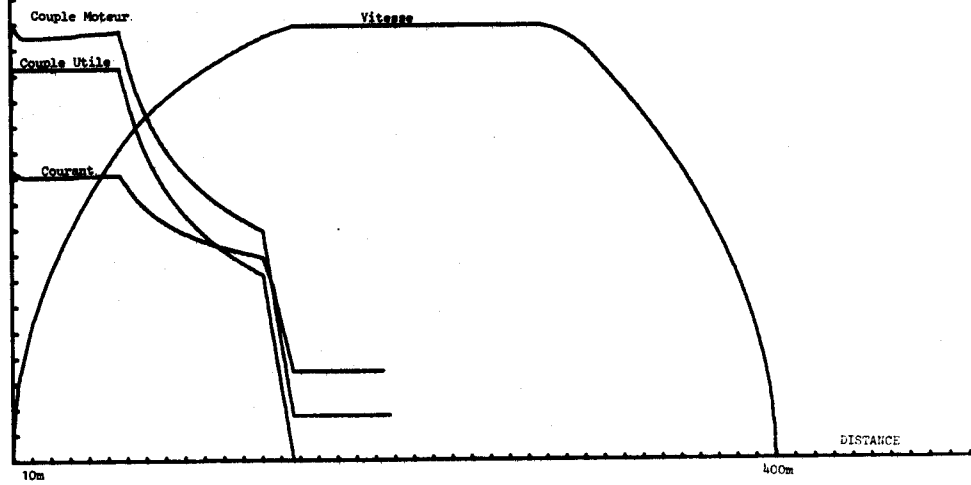
1



2500 N-m COUPLES  
25m/s VITESSE  
1000 A COURANT

RAME A DEUX MOTEURS GLM 0332  
TAUX DE SHUNTAGE 72%

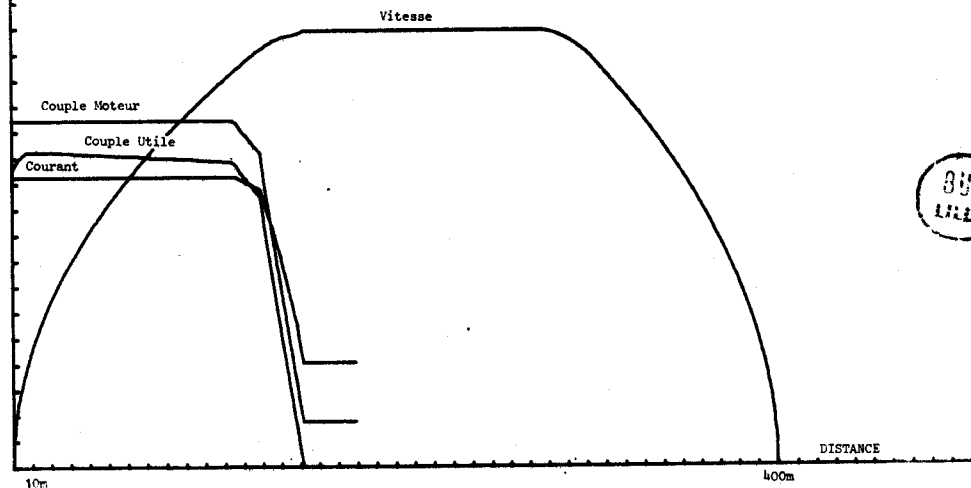
2



2500 N-m COUPLES  
25 m/s VITESSE  
1000 A COURANT

RAME A DEUX MOTEURS GLM 0332  
TAUX DE SHUNTAGE 52%

3



### 1.3. Influence des principaux paramètres

Les paramètres du système sont extrêmement nombreux : les combinaisons possibles et les critères de comparaison de leur influence sur le comportement général de la rame sont multiples.

. Nous avons donc retenu les paramètres principaux et fait varier leurs valeurs dans une fourchette restreinte autour de leurs valeurs nominales (moteurs) ou moyennes (vitesse de régime, profil de voie, masse transportée, distance d'interstation).

Les paramètres étudiés peuvent être classés de la manière suivante :

- paramètres dépendant des données urbaines ou de choix politiques :

- a. la masse transportée et le type de rame
- b. les pentes de la voie
- c. les rayons de courbure de la voie
- d. les distances d'interstations

- paramètres dépendant des choix technologiques :

- e. la limitation de courant
- f. la limitation de tension
- g. le taux du shuntage des moteurs
- h. le rapport de transmission

- paramètres à optimiser :

- i. les vitesses de consigne : de régime et maximum.

. Nous avons limité les points de comparaisons des diverses combinaisons aux influences suivantes sur le comportement de la rame :

- le temps de parcours d'une interstation
- la consommation énergétique correspondante
- la vitesse maximum possible
- l'accélération maximum possible
- le comportement thermique des moteurs.

### 1.3.a. Influence de la masse transportée

Masse	paramètre variable
Pente	nulle
Rayon de courbure	Maxi
Vitesse Régime	16,9m/s
Vitesse maxi	possible
Tension maxi	720V
Courant maxi	450A
Rapport de transmission	1/6,83
Distance d'Interstation	600m
Taux de shuntage	72%

Pour chaque type de rame utilisé (MM, MR ou MRM),  
lorsque le nombre de voyageurs transportés augmente :

- . le temps et la distance correspondant au régime d'accélération augmentent (planches 4, 5 et 6)
- . le temps de parcours de l'interstation et l'énergie consommée augmentent (planches 7 et 8)

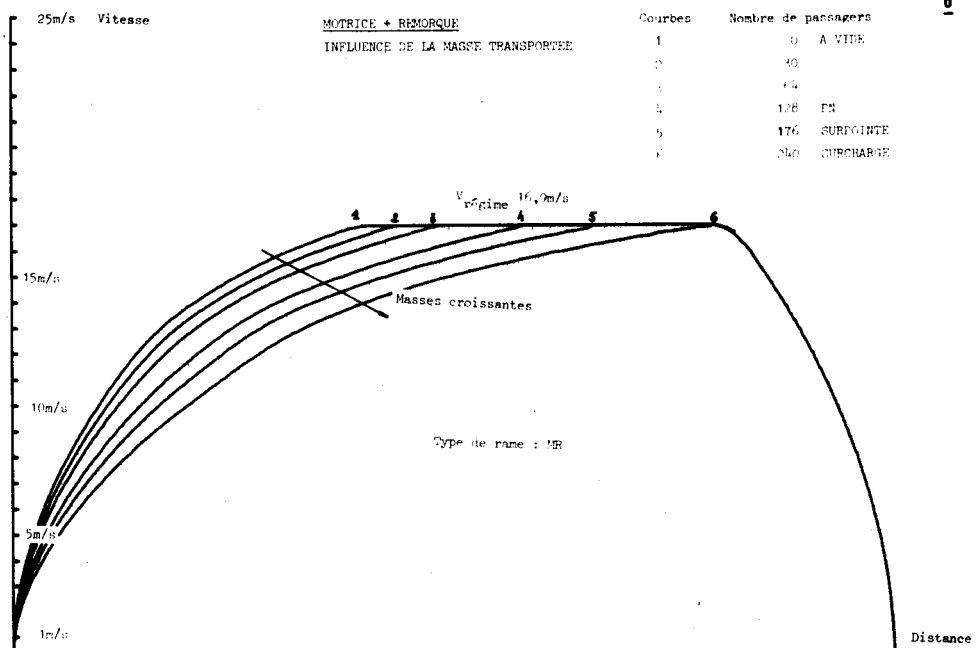
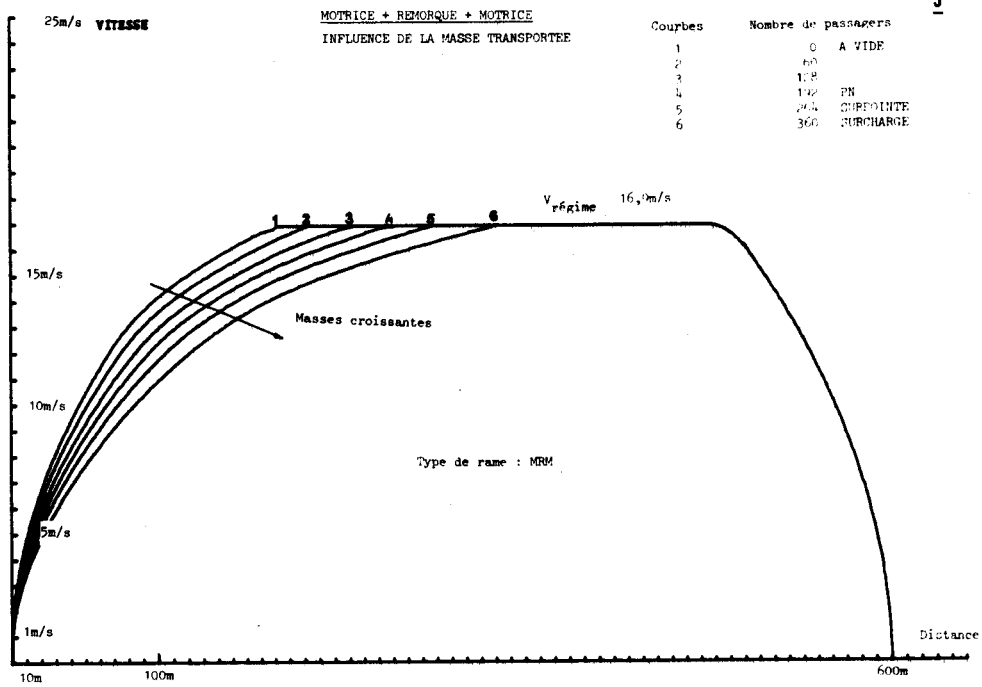
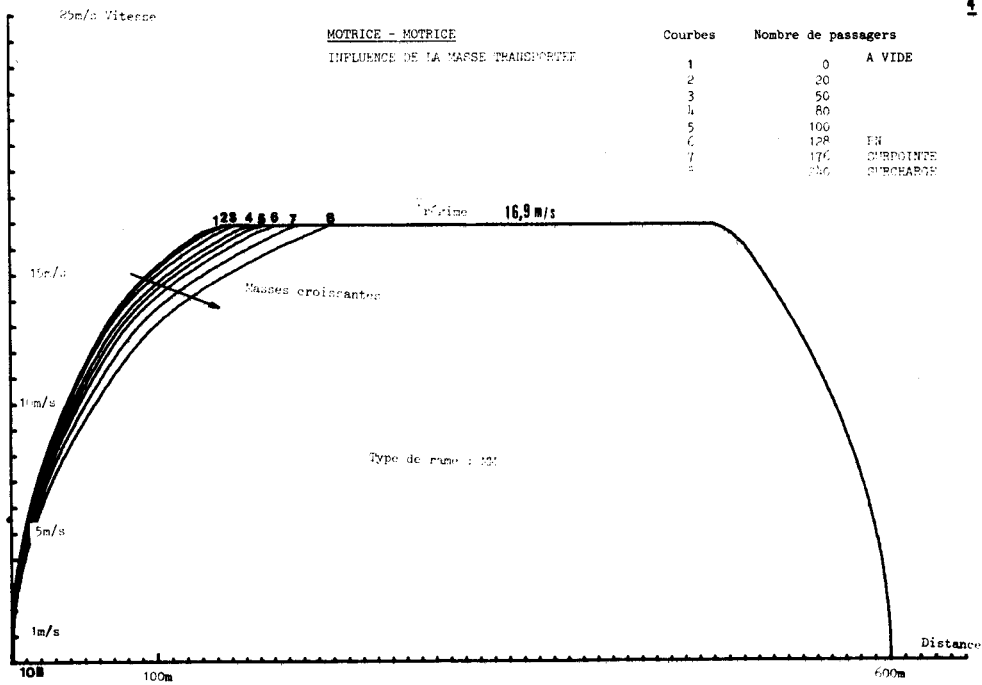
Toutefois ces variations des performances avec la charge sont surtout sensibles pour les rames MR et MRM.

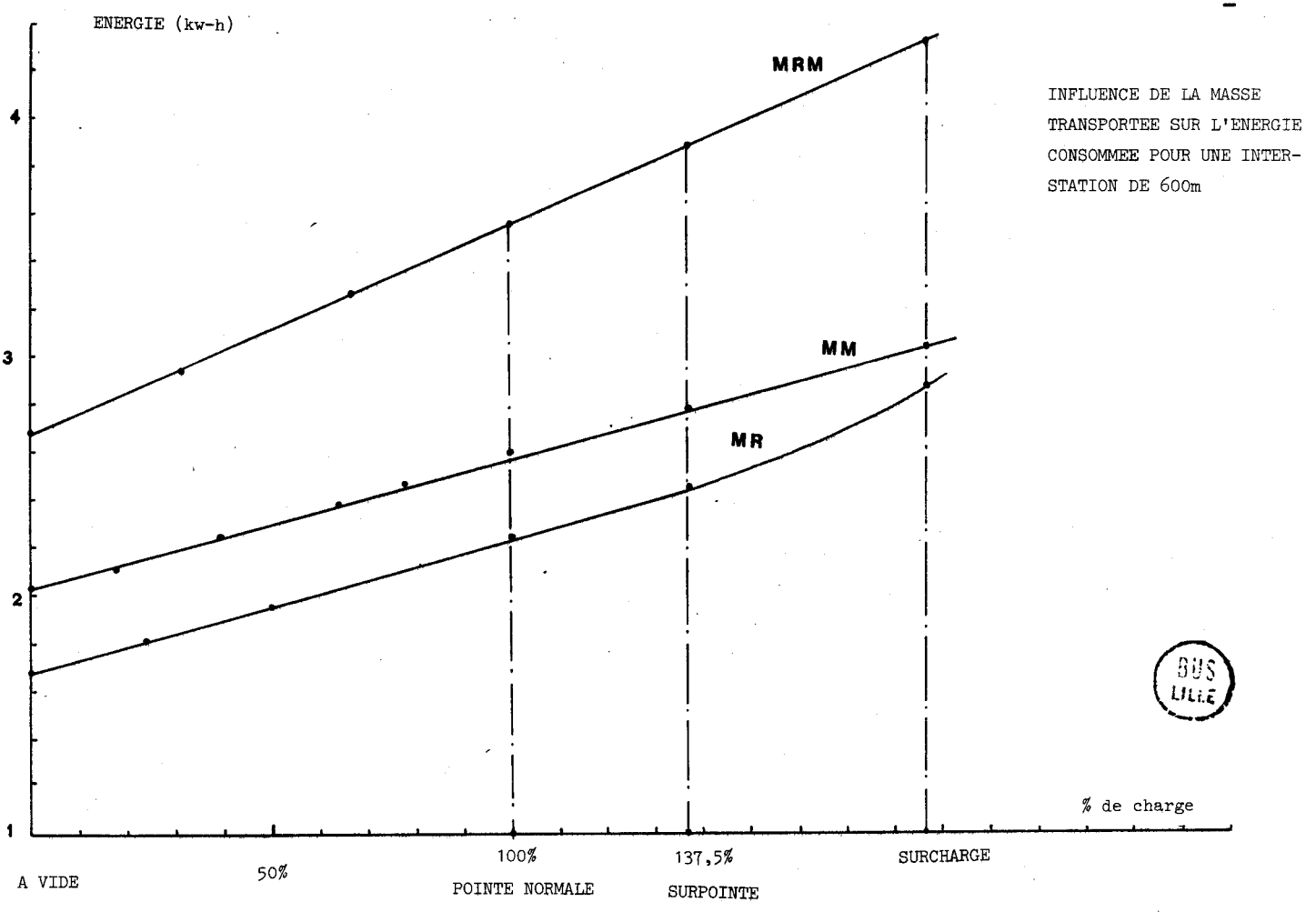
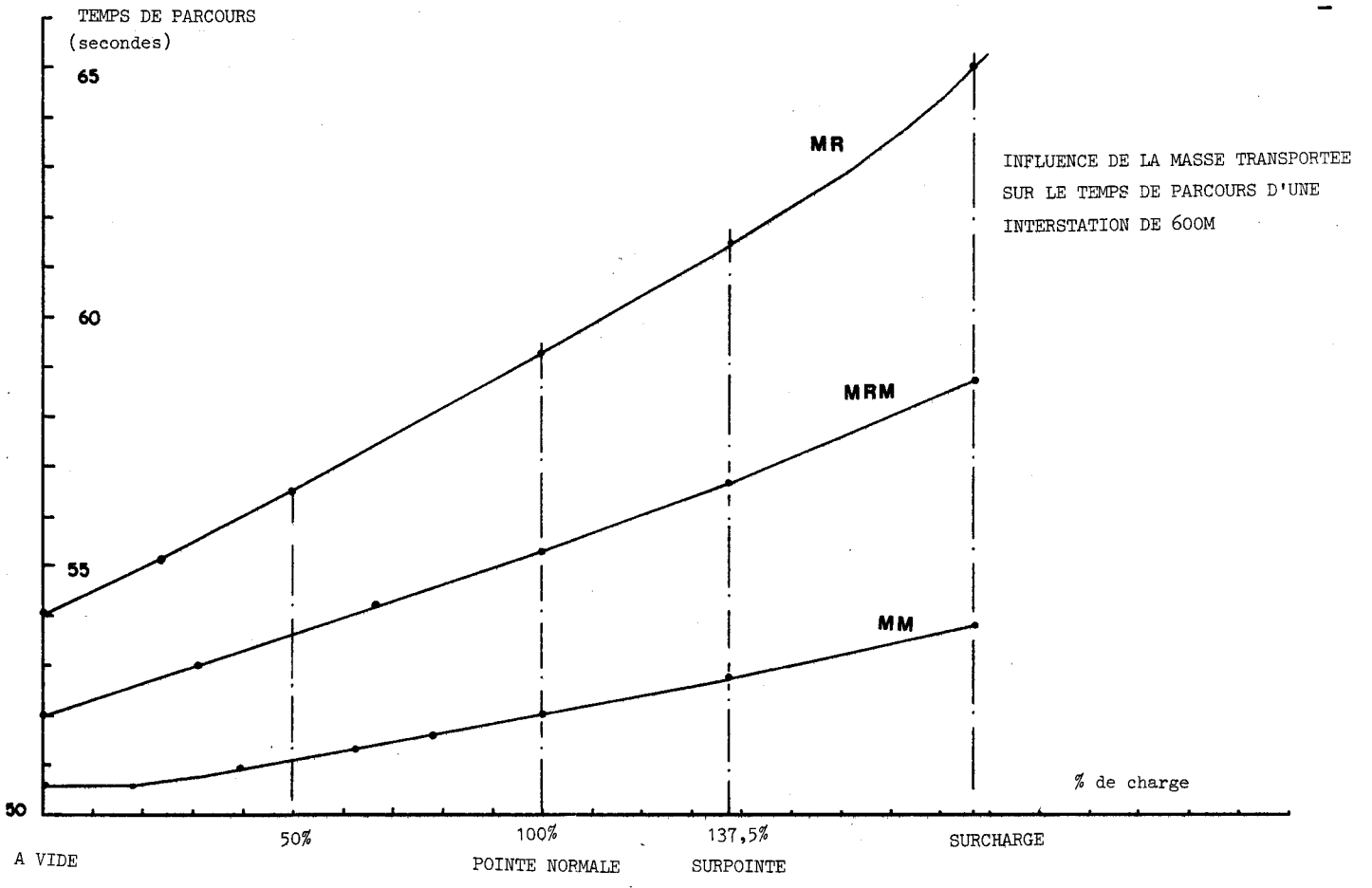
La comparaison, à un même pourcentage de charge par rapport à la charge de pointe normale, des trois types de rames, montre que :

- le temps de parcours augmente des types MM à MRM puis à MR (planche 7)
- l'énergie consommée augmente des types MR à MM puis à MRM (planche 8)

De la masse à vide à la surcharge de la rame,

- l'écart des temps de parcours entre les différents types de rames s'accroît
- l'écart des énergies consommées entre les cas MM et MRM augmente, celui entre les cas MR et MM restant pratiquement constant.





Il semble qu'en exploitation le type de rame MM soit le plus intéressant ;  
puisque'il assure :

- le temps de parcours de l'interstation minimum et peu variable quelle que soit la charge,
- une consommation énergétique moyenne très acceptable.

Avec l'augmentation de la masse de la rame,

- la vitesse maximum possible sur l'interstation diminue (planche 9) ; dans certains cas de charge, on peut même perdre toute possibilité de régulation, la vitesse maximum nécessaire ne pouvant être atteinte sur l'interstation.

- l'accélération maximum possible diminue. (planche 10)

Le hacheur limitant le courant d'induit à  $I_{\max}$ ,  
limite également le couple moteur  $C_{\max}$  et l'effort à la jante  $F_{\max}$ .

L'accélération maximum suit la loi :

$$\gamma_{\max} = \frac{F_{\max} - F_{\text{résistant}}}{\text{Masse totale}}$$

Dans certains cas de charge, l'accélération maximum de consigne n'est plus atteinte et l'asservissement d'accélération devient inutile.

La rame comportant des moteurs en fonctionnement nominal (shuntage 72%) ( $I_{\max} = 450A$ ) et parcourant une interstation de pente nulle, ces deux points sont très critiques.

La planche.11. montre que :

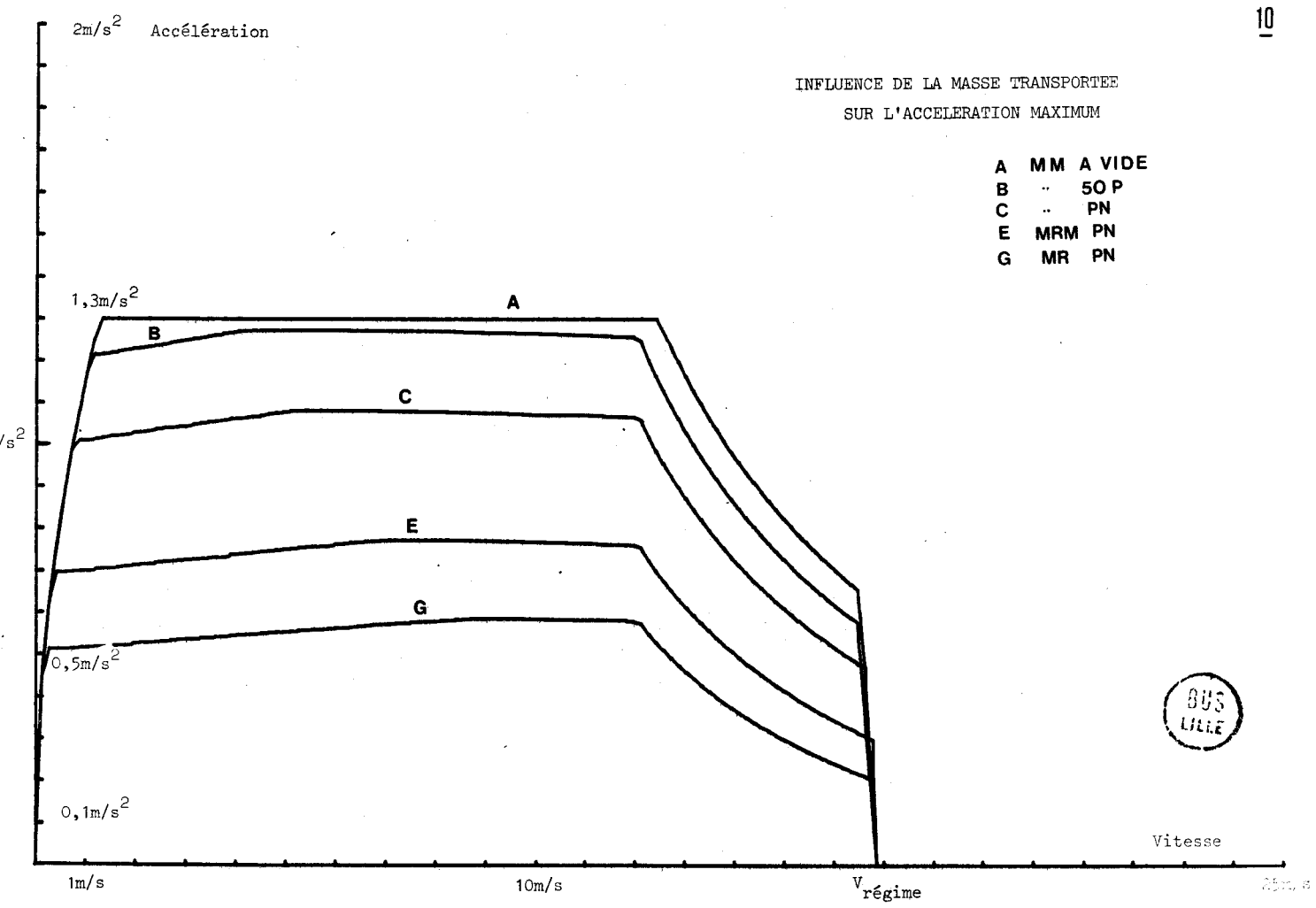
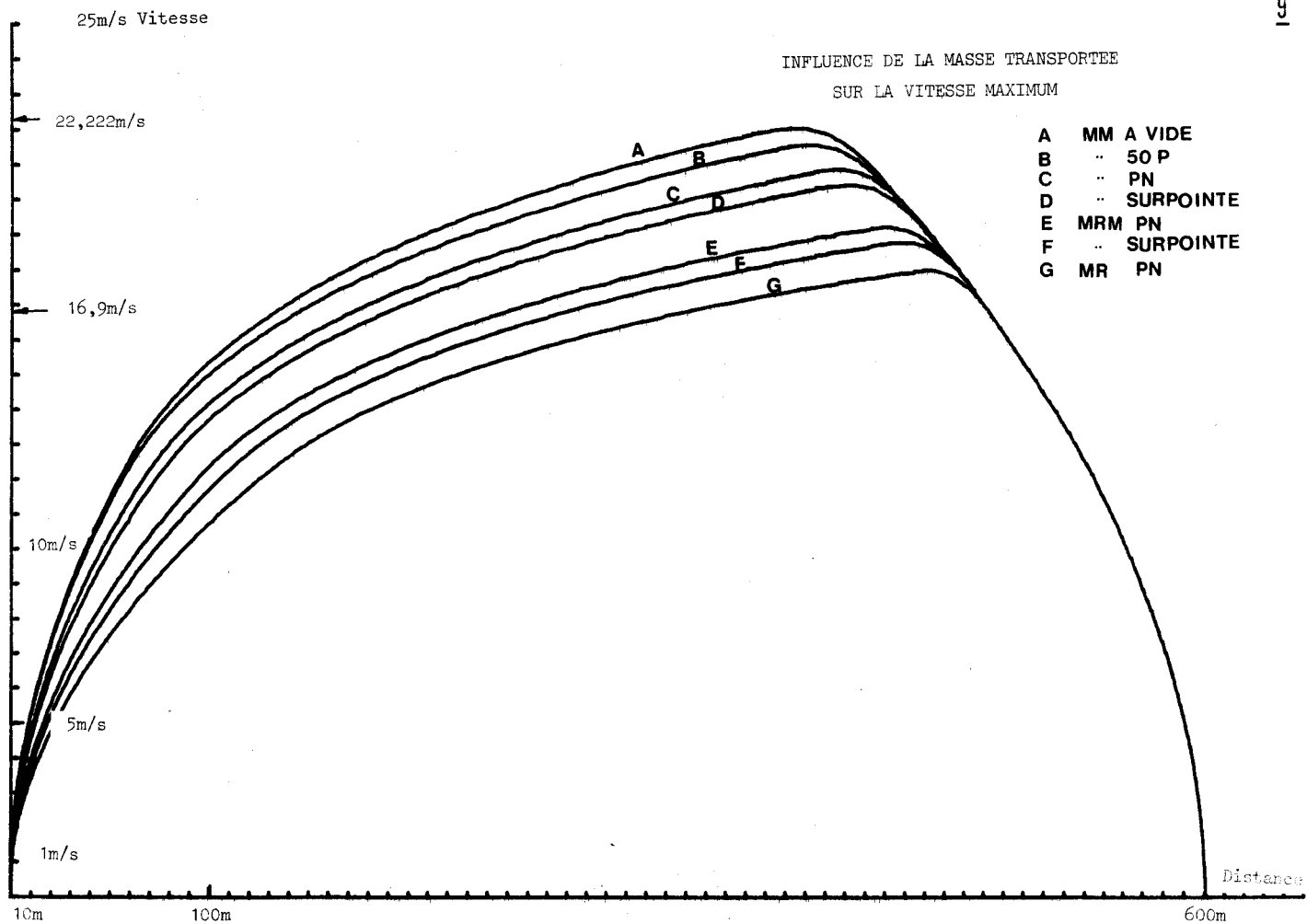
- sur une interstation de 600m, seul le type de rame MM à VIDE permet d'atteindre la vitesse maximum prévue de 80km/h
- seul le type de rame MM à VIDE satisfait à l'accélération maximum de consigne de  $1,3m/s^2$

Il semble donc très important de reconsidérer le point de fonctionnement nominal de l'ensemble Hacheurs-Moteurs.



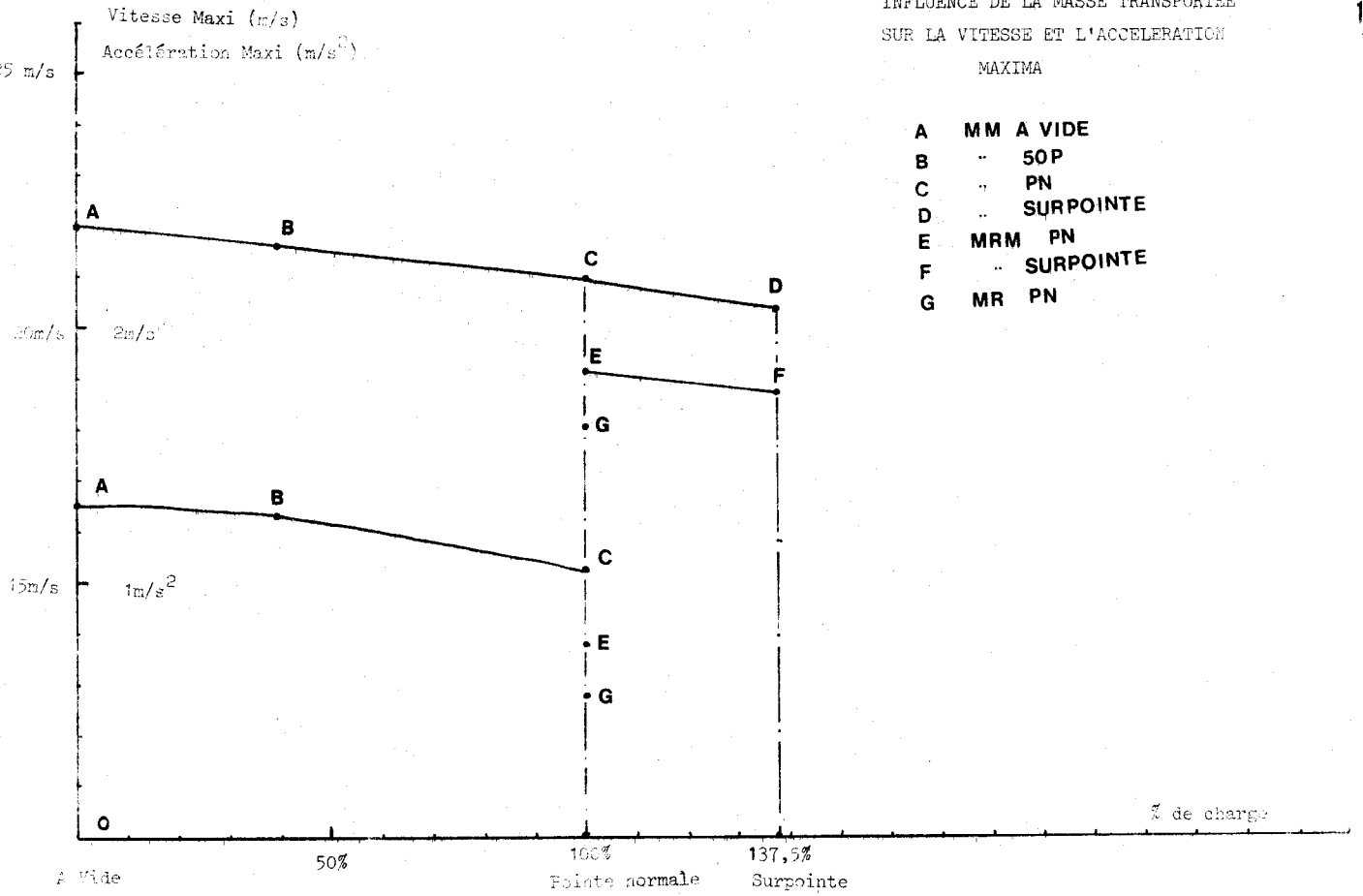
Le fait de tracer la variation du courant induit par rapport au temps permet de se rendre compte du comportement thermique des moteurs (planche.12.).

En exemple, dans le cas MR en charge de pointe normale (courbe G), pour une vitesse de régime de 16,9m/s et sur une interstation moyenne de 600m, les moteurs sont soumis au courant maximum de 450A pendant plus de la moitié du temps de parcours, proportion qui semble relativement élevée.

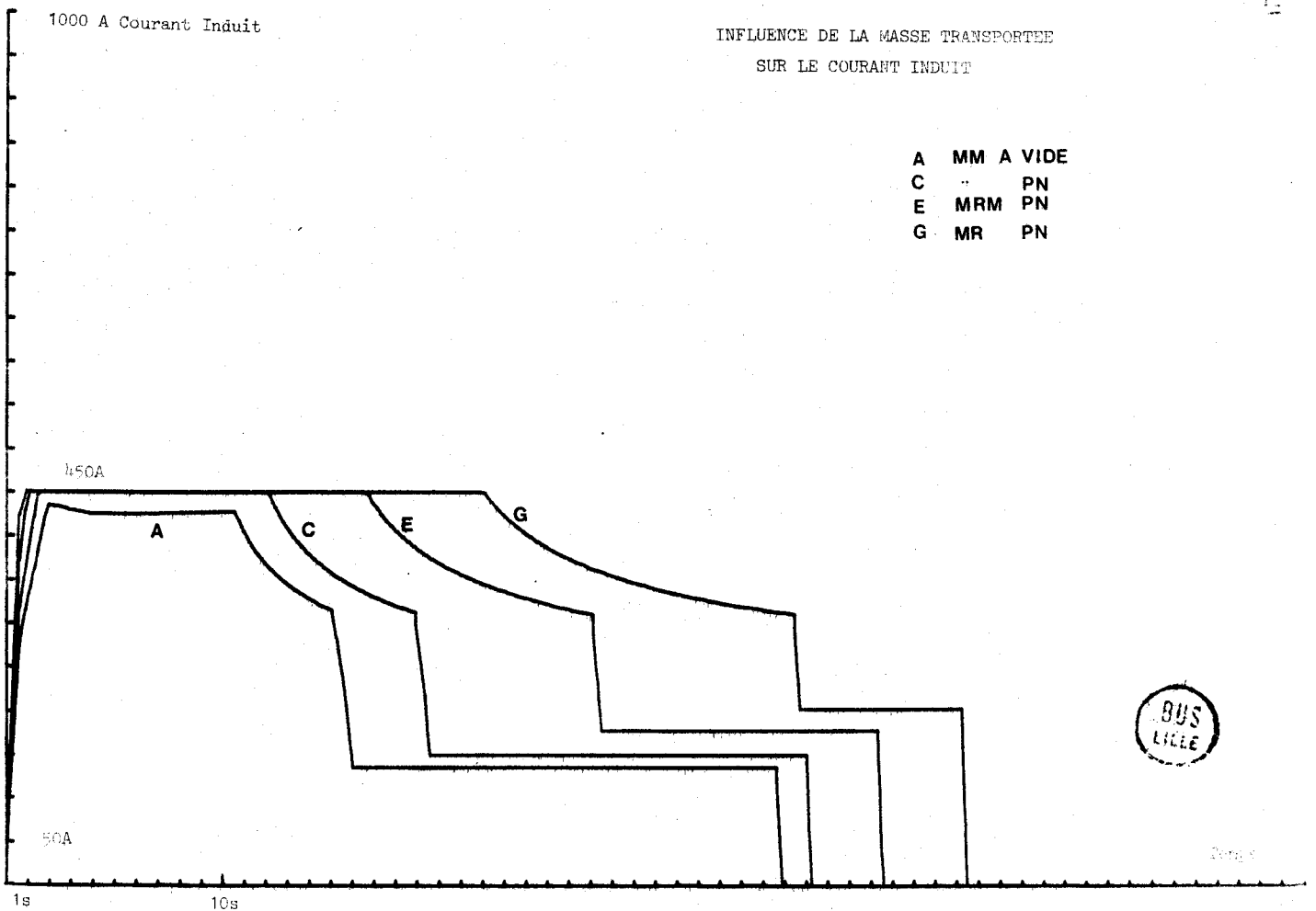


MAXIMA

- A MM A VIDE
- B " 50P
- C " PN
- D " SURPOINTE
- E MRM PN
- F " SURPOINTE
- G MR PN



- A MM A VIDE
- C " PN
- E MRM PN
- G MR PN



### 1.3.b. Influence des pentes

Masse	Pointe normale
Pente	Paramètre variable
Rayon de courbure	Maxi
Vitesse Régime	16,9m/s
Vitesse Maxi	
Courant Maxi	450A
Rapport de transmission	1/6,83
Distance d'interstation	600m
Taux de shuntage	72%
Tension Maxi	720V

Pour un type de rame utilisé et un cas de charge donné,  
(cas MM en charge de pointe normale : planche.13.) :



- L'existence de pentes négatives améliore fortement le temps de parcours et l'énergie consommée sur l'interstation (planches.15. et.16.).

En effet, une pente négative permet, en apportant un couple moteur favorable pendant le régime de traction :

- . d'augmenter l'accélération maximum possible
- . de diminuer le temps d'accélération jusqu'à la vitesse de régime
- . de solliciter moins les moteurs

Elle permet en outre d'améliorer la possibilité de régulation en augmentant le maximum de la vitesse possible sur l'interstation.

Une pente de -4% (valeur limite pour la sécurité et le confort des passagers) permet à une rame MM, en charge de pointe normale (avec  $I_{\max} = 450A$ ) :

- . d'atteindre l'accélération maximum de consigne ( $1,3m/s^2$ )
  - . de gagner, sur une interstation de 600m, par rapport à un cas de pente nulle, 1,5s et 1,2kW.h.
  - . l'existence de pentes positives pénalise le temps de parcours et l'énergie consommée des interstations.
- En exemple, une pente de +4%, dégradant fortement l'accélération maximum d'une rame MM en charge de pointe normale, lui fait perdre, sur une interstation de 600m, 4,3s par rapport à un cas de pente nulle, en augmentant sa consommation énergétique de 2,1kWh.

Les pentes négatives rapprochent les performances des trois types de rames (MM, MR, MRM) du point de vue des temps de parcours et consommation énergétique (planches 14, 15 et 16) ; les pentes positives écartent leurs performances.

. Une remarque importante concerne la conception du profil de voie.

En traçant les variations du couple moteur en fonction de la vitesse, pour les régimes de traction et de freinage et pour des cas de pentes positive, nulle et négative (planche.17.).

On remarque :

- qu'une pente négative est favorable au régime de TRACTION puisqu'elle diminue le couple moteur nécessaire pour la réalisation des consignes.
- qu'une pente positive est favorable au régime de FREINAGE puisqu'elle permet d'alléger le couple résistant nécessaire au freinage, donc d'économiser les freins mécaniques en les sollicitant moins.

Le profil idéal en élévation de la voie est donc un PROFIL donnant la caractéristique COUPLE-VITESSE optimale, et utilisant les valeurs maxima permises des pentes (planche.18.).

Représentons ce profil sur une interstation, devant permettre de placer les stations au même niveau.

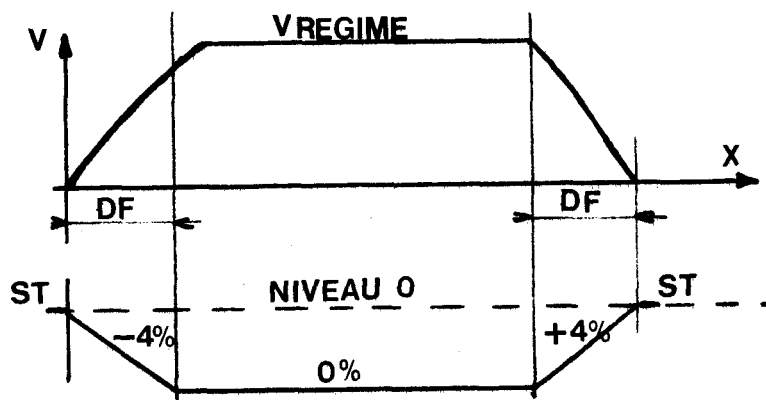
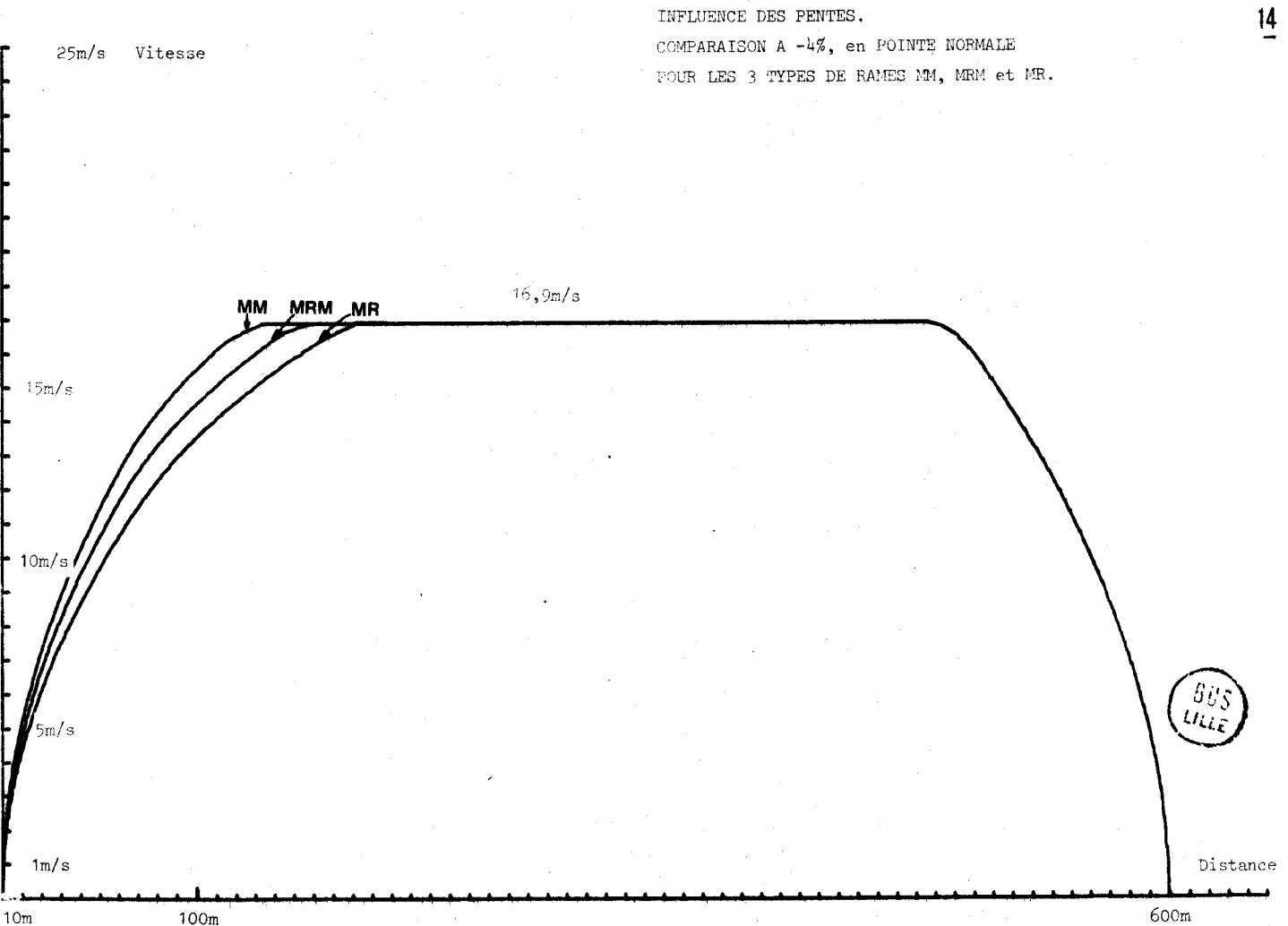
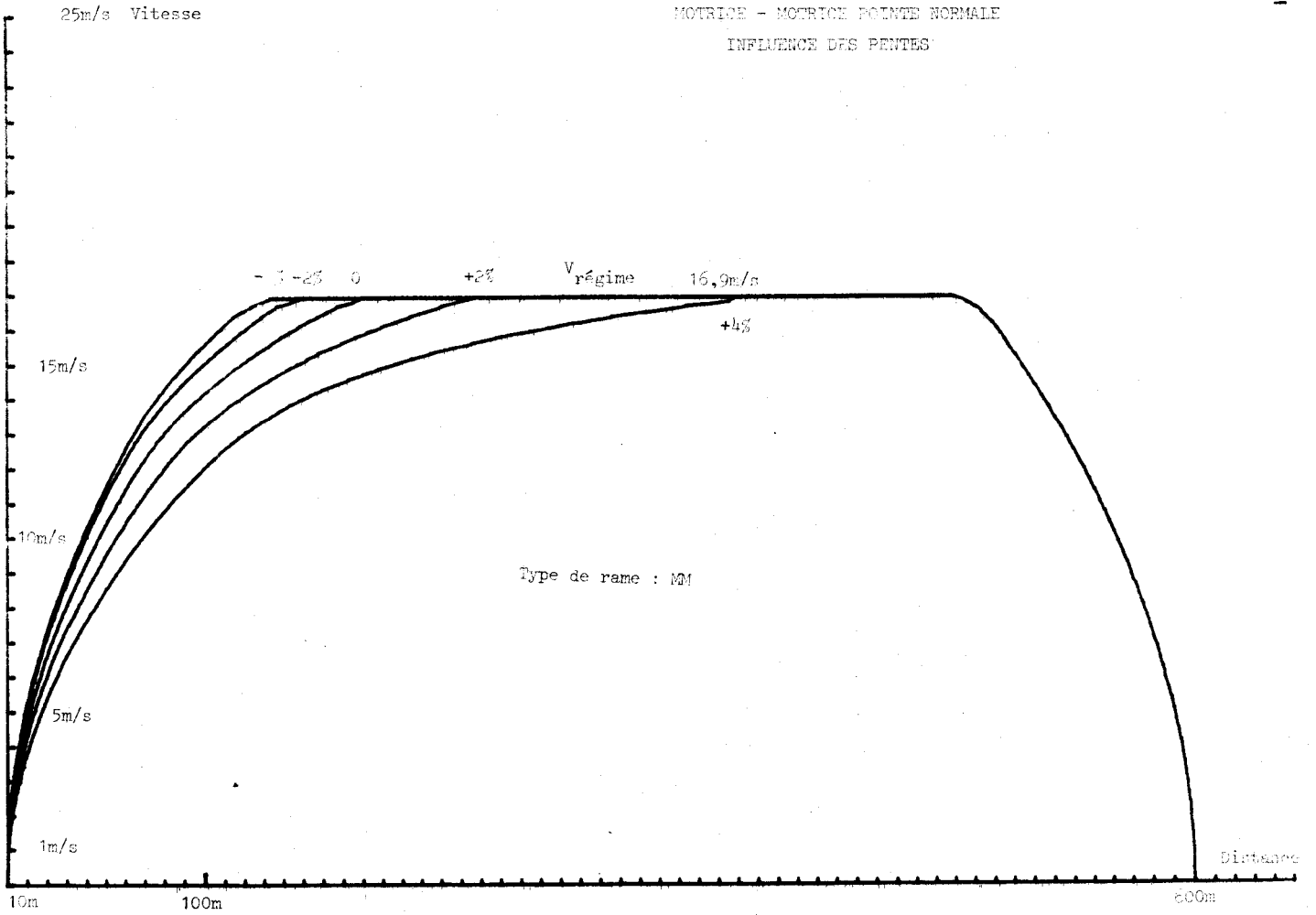
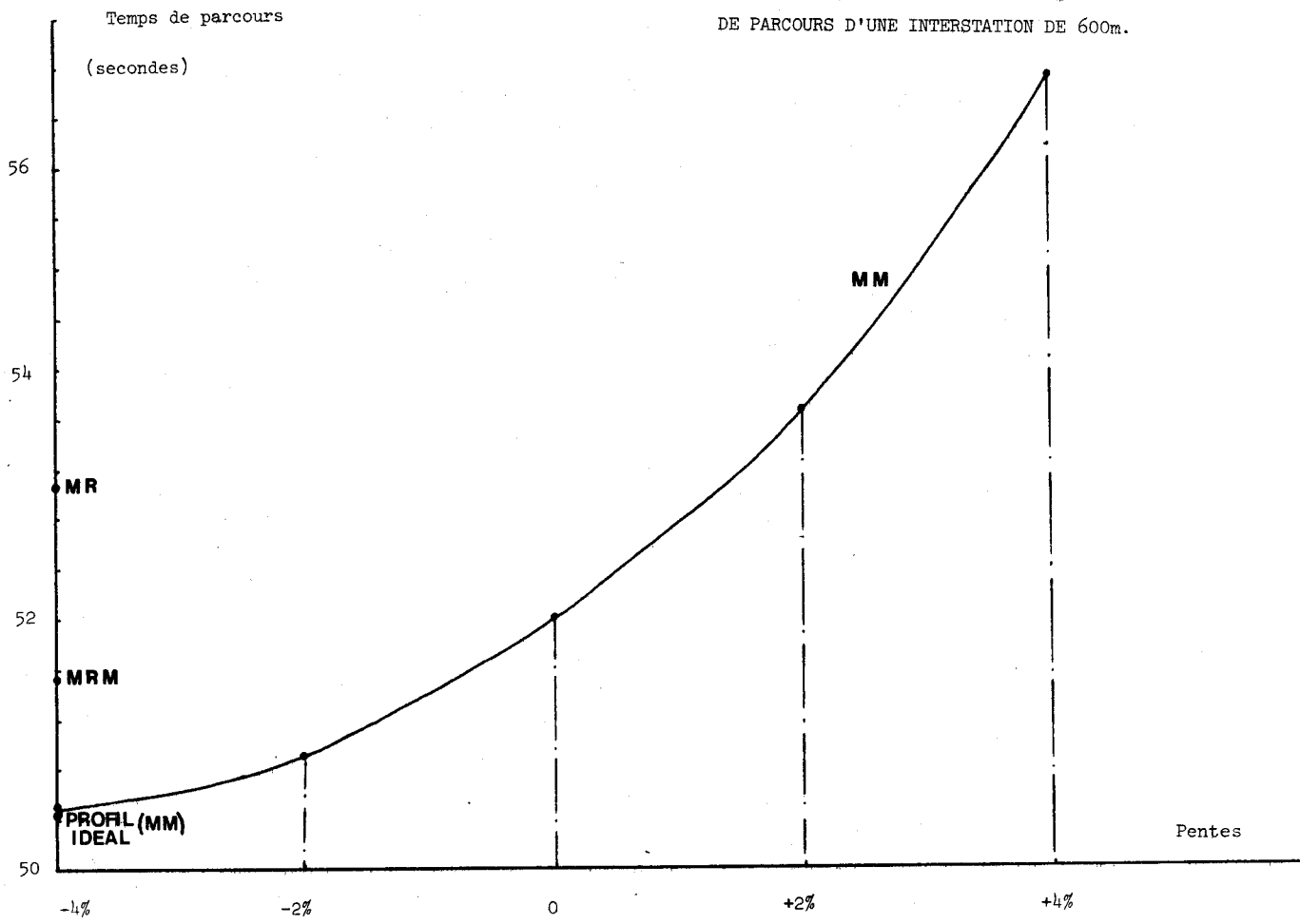


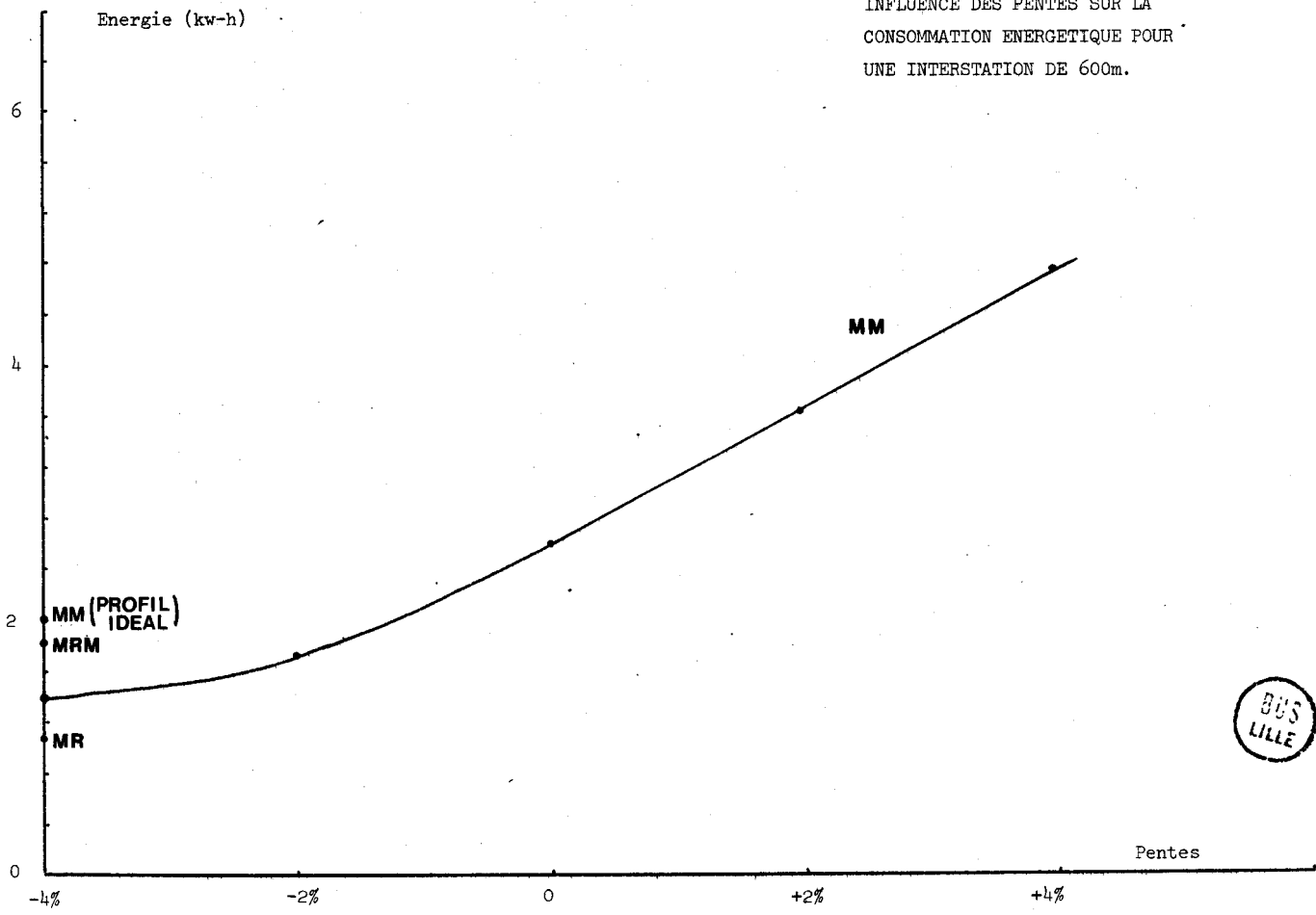
FIG. 59



INFLUENCE DES PENTES SUR LE TEMPS  
DE PARCOURS D'UNE INTERSTATION DE 600m.

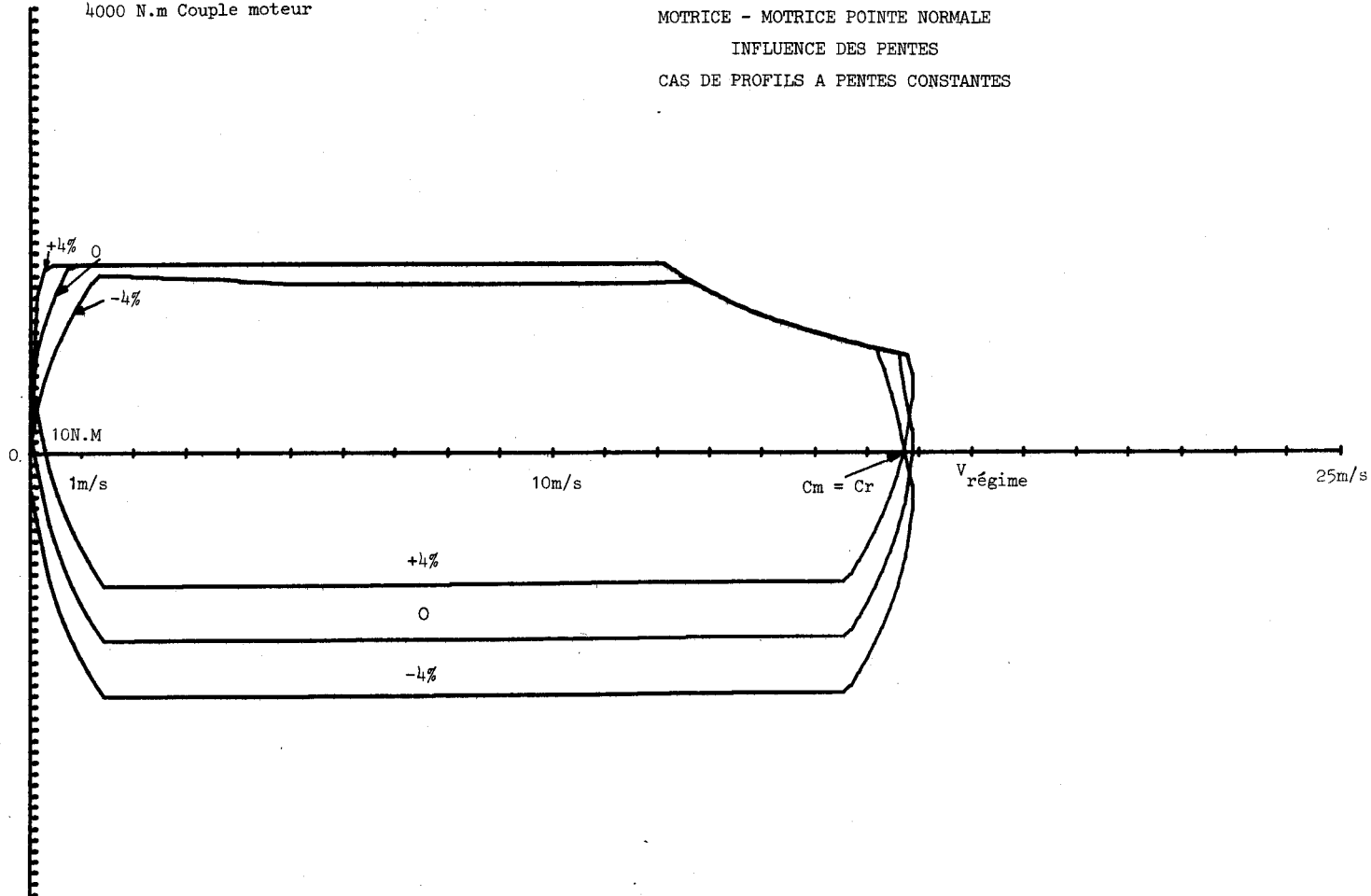


INFLUENCE DES PENTES SUR LA  
CONSOMMATION ENERGETIQUE POUR  
UNE INTERSTATION DE 600m.



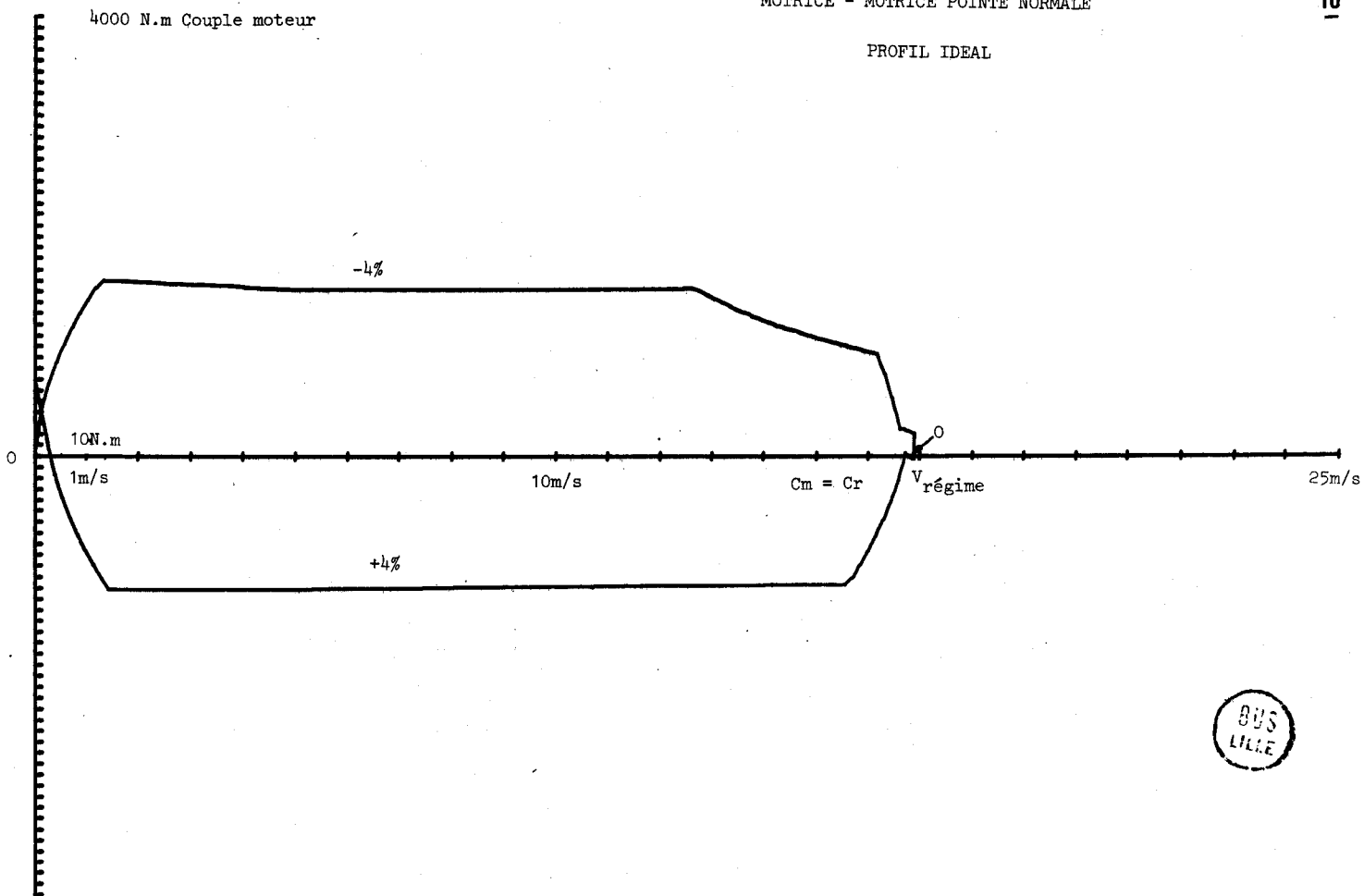
4000 N.m Couple moteur

MOTRICE - MOTRICE POINTE NORMALE  
INFLUENCE DES PENTES  
CAS DE PROFILS A PENTES CONSTANTES



4000 N.m Couple moteur

MOTRICE - MOTRICE POINTE NORMALE  
PROFIL IDEAL





1.3.e. Influence des rayons de courbure

Masse	Pointe normale
Pente	nulle
Rayon de Courbure	Paramètre variable
Vitesse Régime	16,9m/s
Vitesse Maxi	
Tension Maxi	800V
Courant Maxi	470A
Rapport de transmission	1/6,83
Distance d'Interstation	600m
Taux de shuntage	72%

La voie comportant un dévers, tout rayon de courbure  $R_j$  limite la vitesse de la rame à :

$$V_{1j} = \sqrt{0,23R_j \cdot g}$$

. Limitation au départ d'une station (LD)

La limitation de vitesse intervenant durant la période d'accélération de la rame jusqu'à la vitesse de régime, a les conséquences suivantes :

- pour un rayon de courbure constant (planches.20., .23. et .24.) et une distance d'application de ce rayon croissante, le temps de parcours augmente, l'énergie consommée diminue.
- en faisant croître la valeur du rayon de courbure et en gardant constante la distance d'application (planches.25.et .26.), le temps de parcours diminue en tendant vers la valeur calculée pour un alignement droit (NL planche.19.), l'énergie consommée restant constante.

. Limitation à l'arrivée en station (LA) (planche.21.)

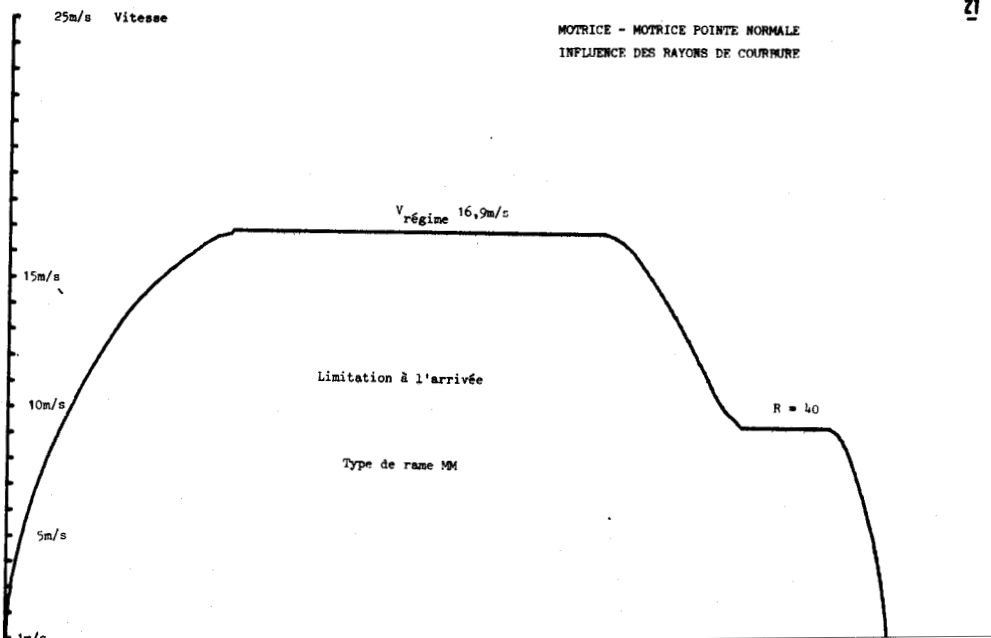
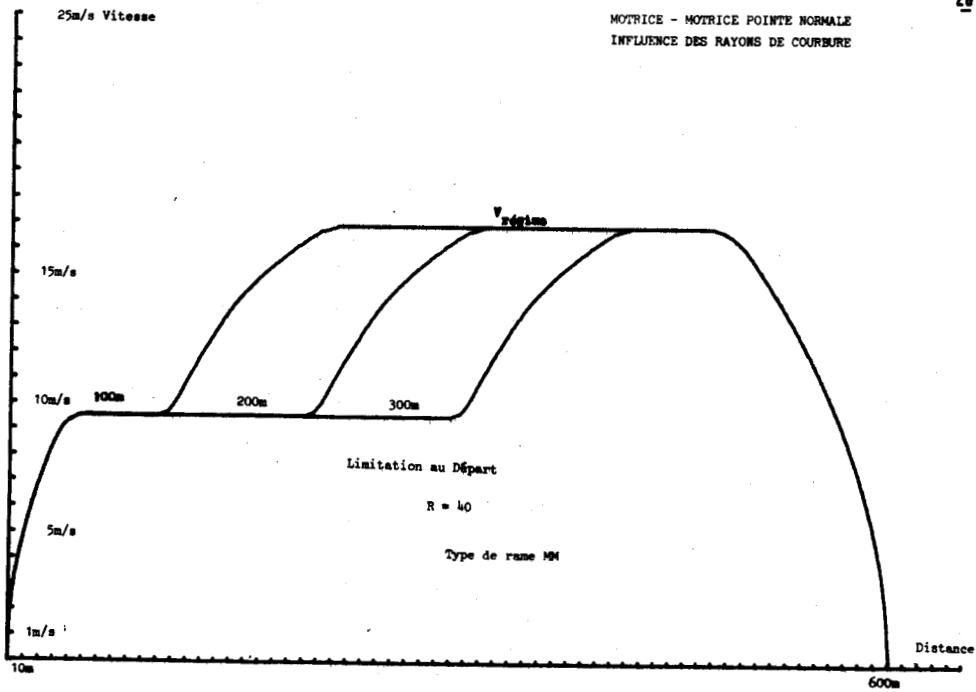
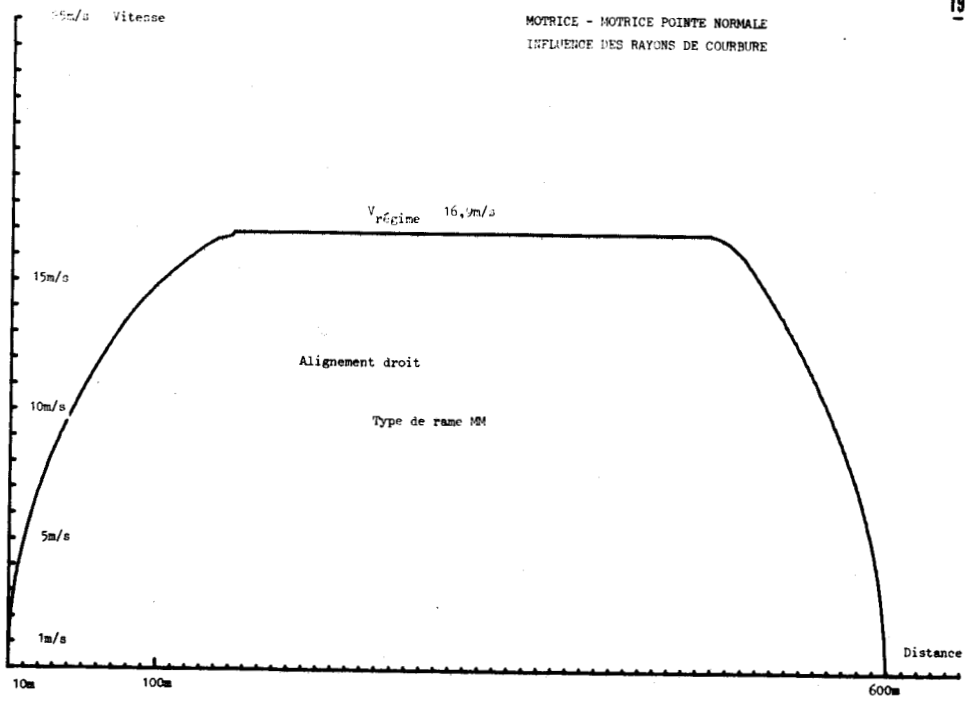
Le temps de parcours et la consommation énergétique sont quasi équivalents à ceux calculés pour une limitation au départ (planches.23. et .24.), de

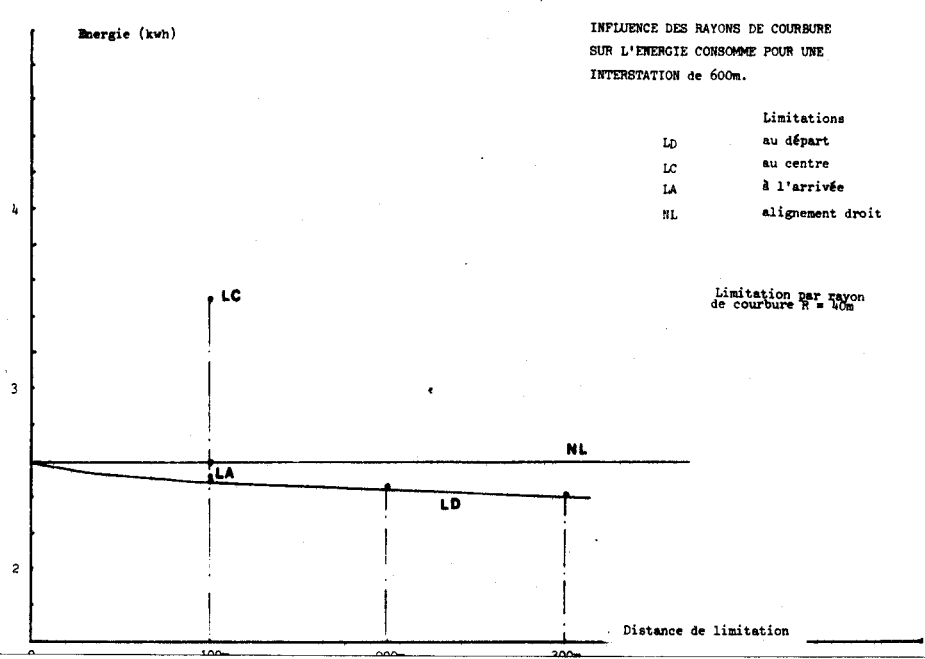
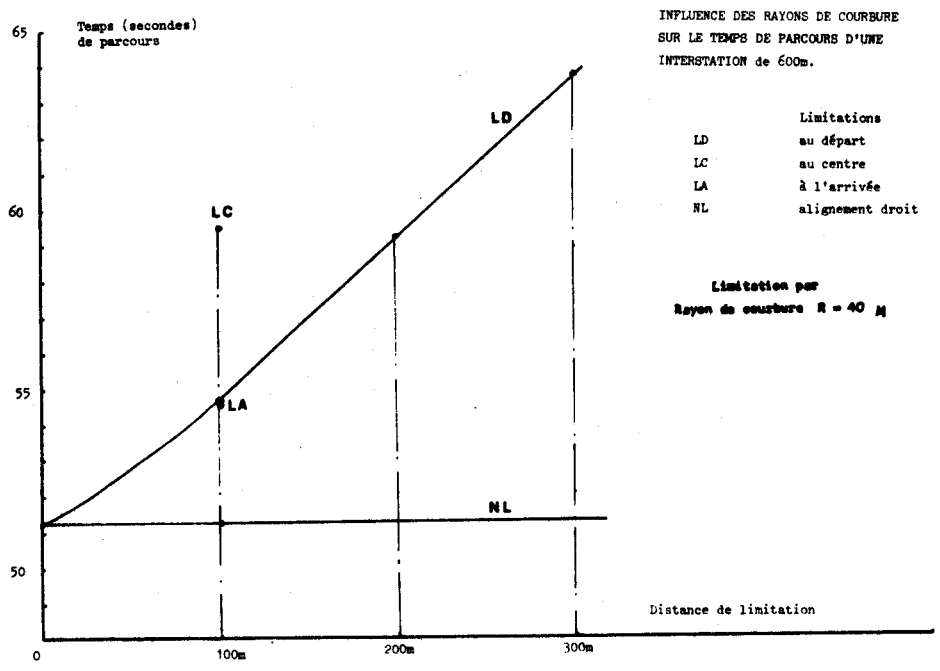
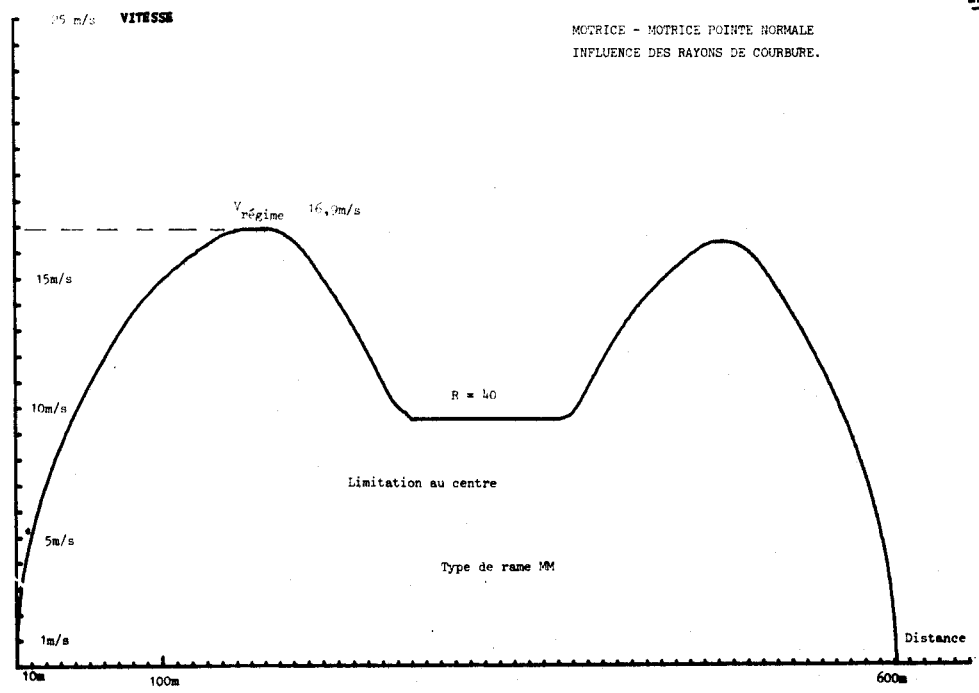
même rayon de courbure et de même distance d'application.

. Limitation au centre de l'interstation (LC) (planche.22.)

Dans les mêmes conditions de limitations, un rayon de courbure placé au milieu de l'interstation (niveau du palier à vitesse de régime constante en cas NL) augmente la durée des phases d'accélération et de freinage par rapport aux cas LD et LA. Une limitation au centre augmente donc très nettement le temps de parcours et la consommation énergétique (planches.23.et.24.). Elle dégrade la valeur de la vitesse maximum possible sur l'interstation : en planche.22, le cas MM en charge de pointe normale, sur une interstation comportant au centre un rayon de courbure  $R=40m$  sur  $100m$ , ne possède plus de palier à vitesse de régime constante ( $16,9m/s$ ).

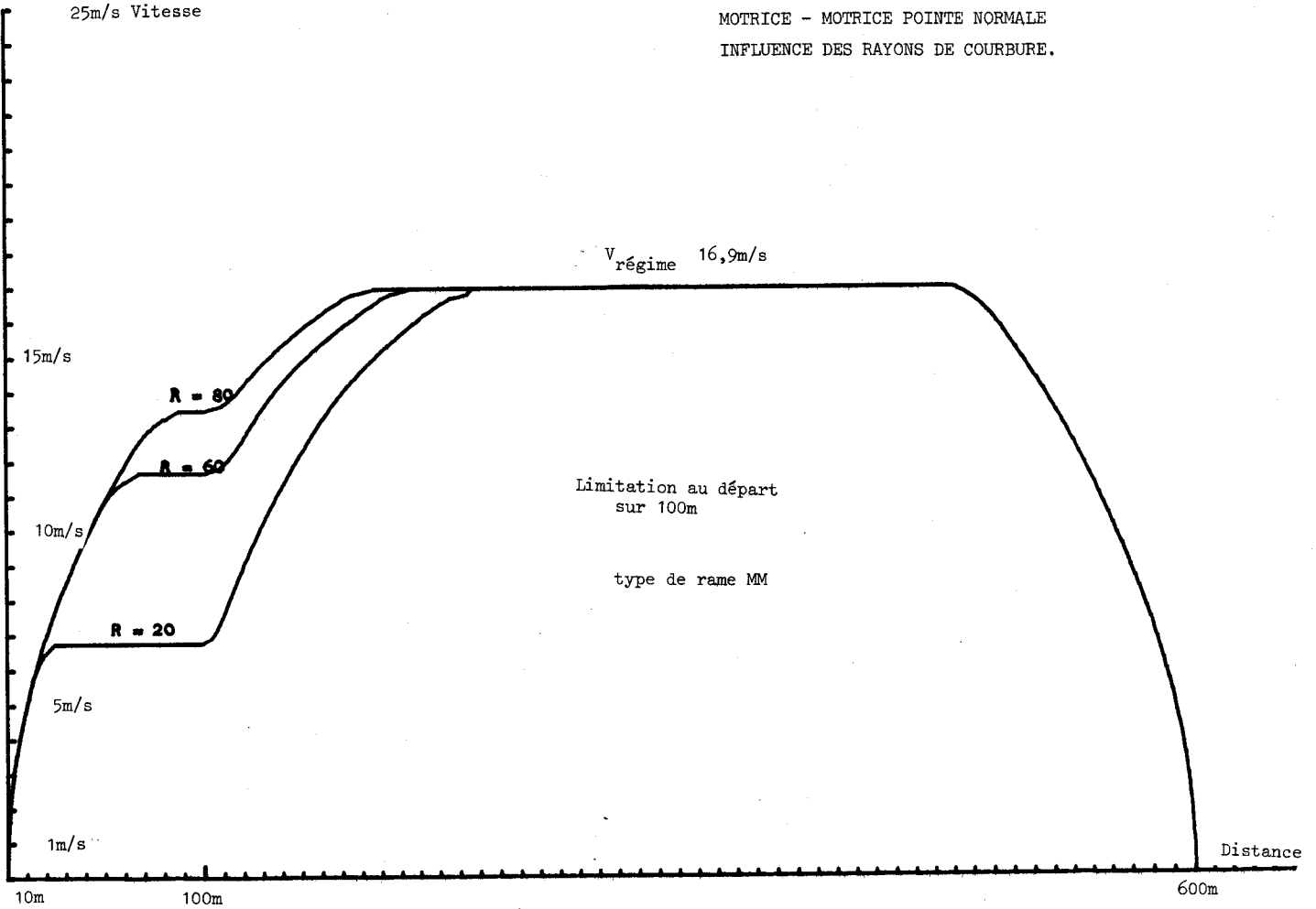
Il apparaît qu'on aura toujours avantage de placer les rayons de courbure de la voie au départ des stations ou à l'arrivée en stations.





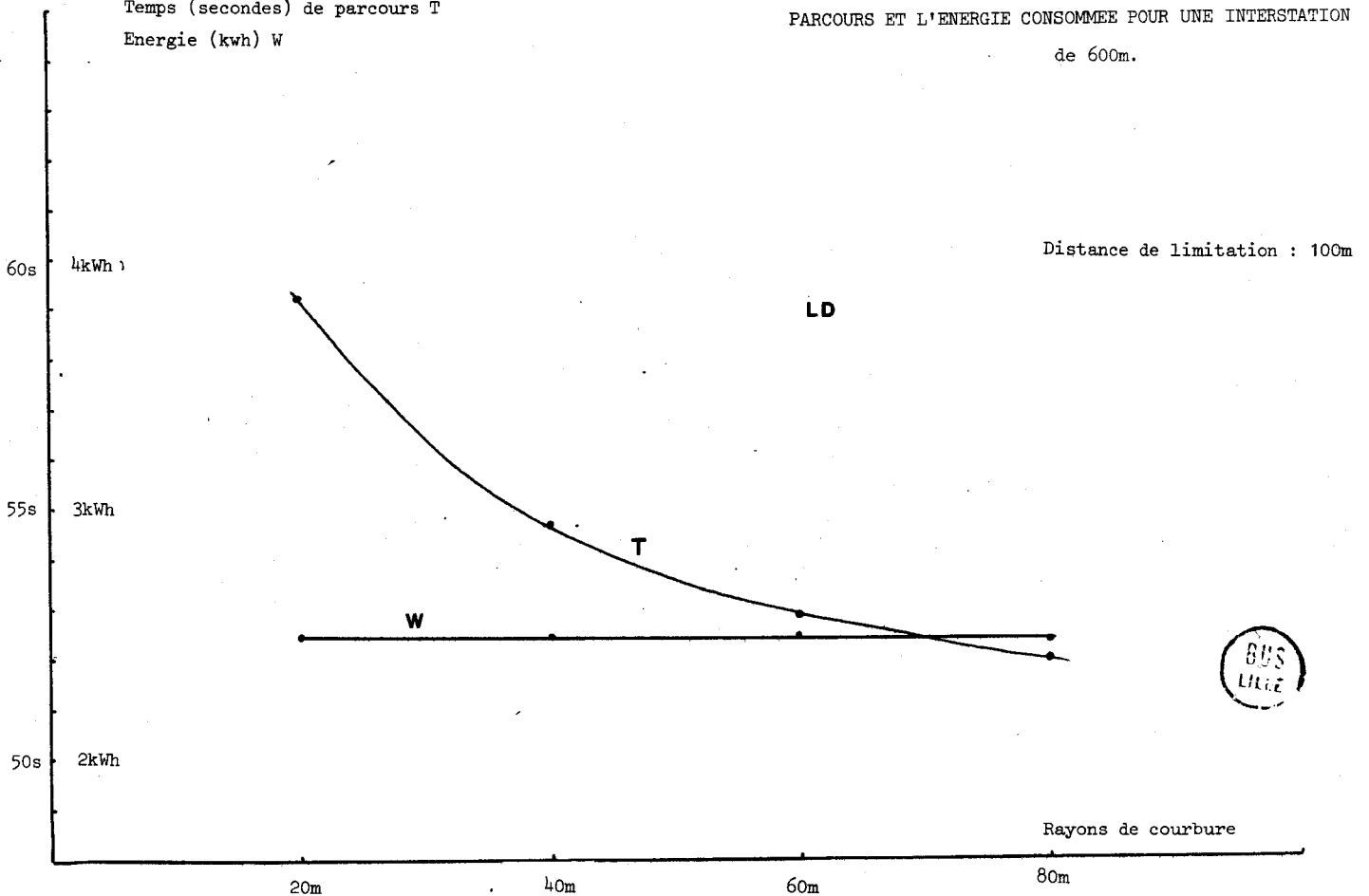
25m/s Vitesse

MOTRICE - MOTRICE POINTE NORMALE  
INFLUENCE DES RAYONS DE COURBURE.



Temps (secondes) de parcours T  
Energie (kwh) W

INFLUENCE DES RAYONS DE COURBURE SUR LE TEMPS DE  
PARCOURS ET L'ENERGIE CONSOMMEE POUR UNE INTERSTATION  
de 600m.



1.3.d. Influence des distances d'interstations

<i>Masse</i>	Pointe normale
<i>Pente</i>	nulle
<i>Rayon de courbure</i>	Maxi
<i>Vitesse régime</i>	16,9m/s
<i>Vitesse maxi</i>	22,222m/s
<i>Tension maxi</i>	800V
<i>Courant maxi</i>	470A
<i>Rapport de transmission</i>	1/6,83
<i>Distance d'interstation</i>	Paramètre variable
<i>Taux de shuntage</i>	72%

La vitesse maximum possible pour la rame augmente avec la distance d'interstation (planche.27.).

Lorsque la vitesse de consigne peut être atteinte sur l'interstation, le temps de parcours et la consommation énergétique croissent linéairement avec la distance d'interstation (planche.28.) ; en effet, les écarts sont alors proportionnels à l'importance du palier à vitesse de consigne constante.

Remarque

- Pour différents types de rames et dans des cas de charge donnés, on peut tracer les variations de la vitesse de la rame en fonction de la distance parcourue et du temps de parcours.

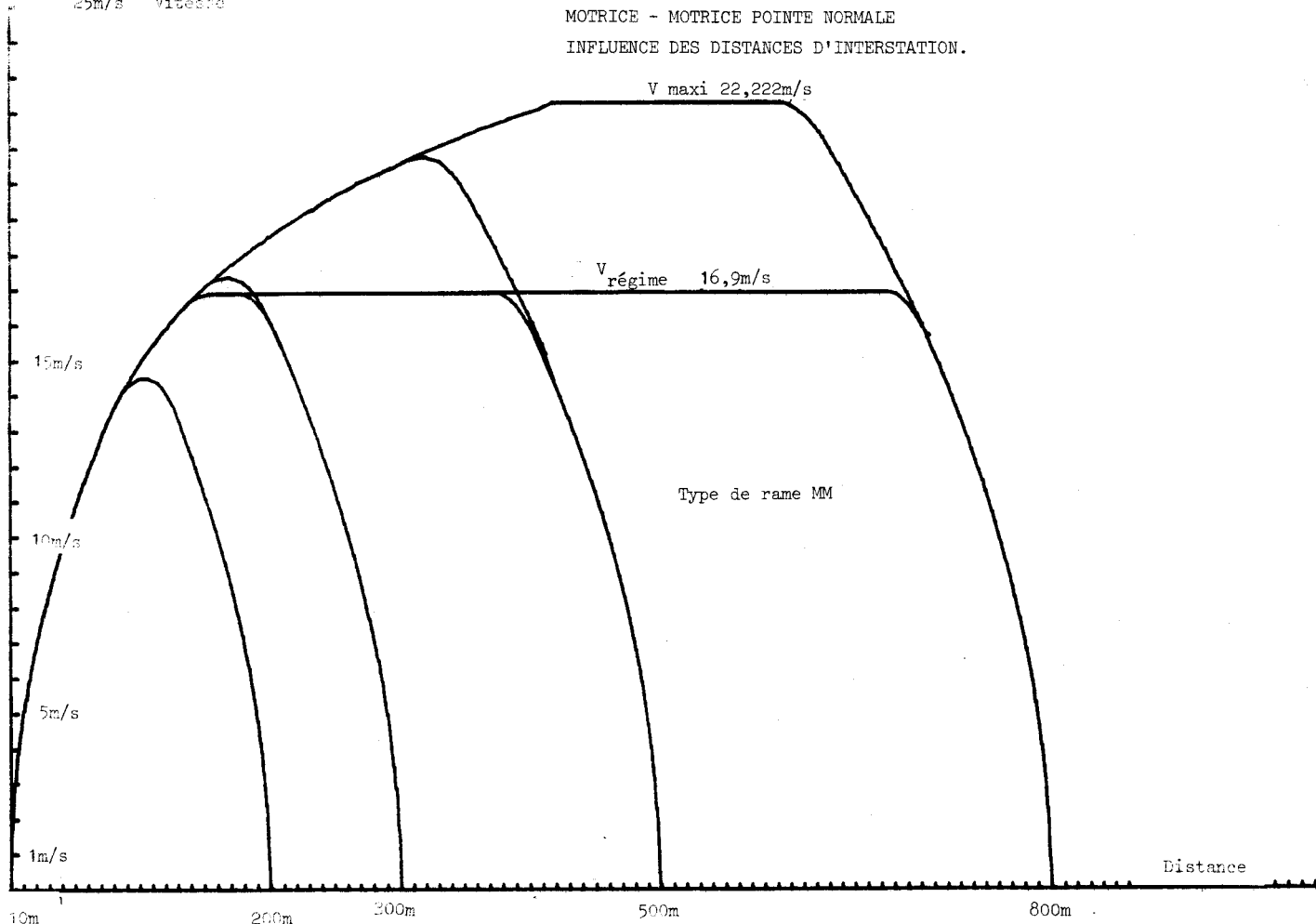
A une vitesse de régime donnée correspond donc une distance et un temps d'application du régime d'accélération.  
(planches.29.et.31. : cas MM en charge de pointe normale, pente nulle)  
(planches.30.et.32. : cas MR en charge de pointe normale, pente nulle).

- En supposant que la conjugaison des freins électrique et mécanique permet le freinage de la rame suivant la loi de consigne (décélération maxi :  $-1,3\text{m/s}^2$ ), il existe une seule courbe de décroissance de la vitesse avec la distance parcourue et une seule avec le temps de parcours, indépendamment du type de rame et du cas de charge. La courbe vitesse-distance est tracée en planche.29.

Il est ainsi possible, à l'aide de ces courbes, de déduire, pour toute interstation, les valeurs des distances et temps impartis à chaque régime de marche. Ces courbes ne s'appliquent évidemment qu'en alignement droit.

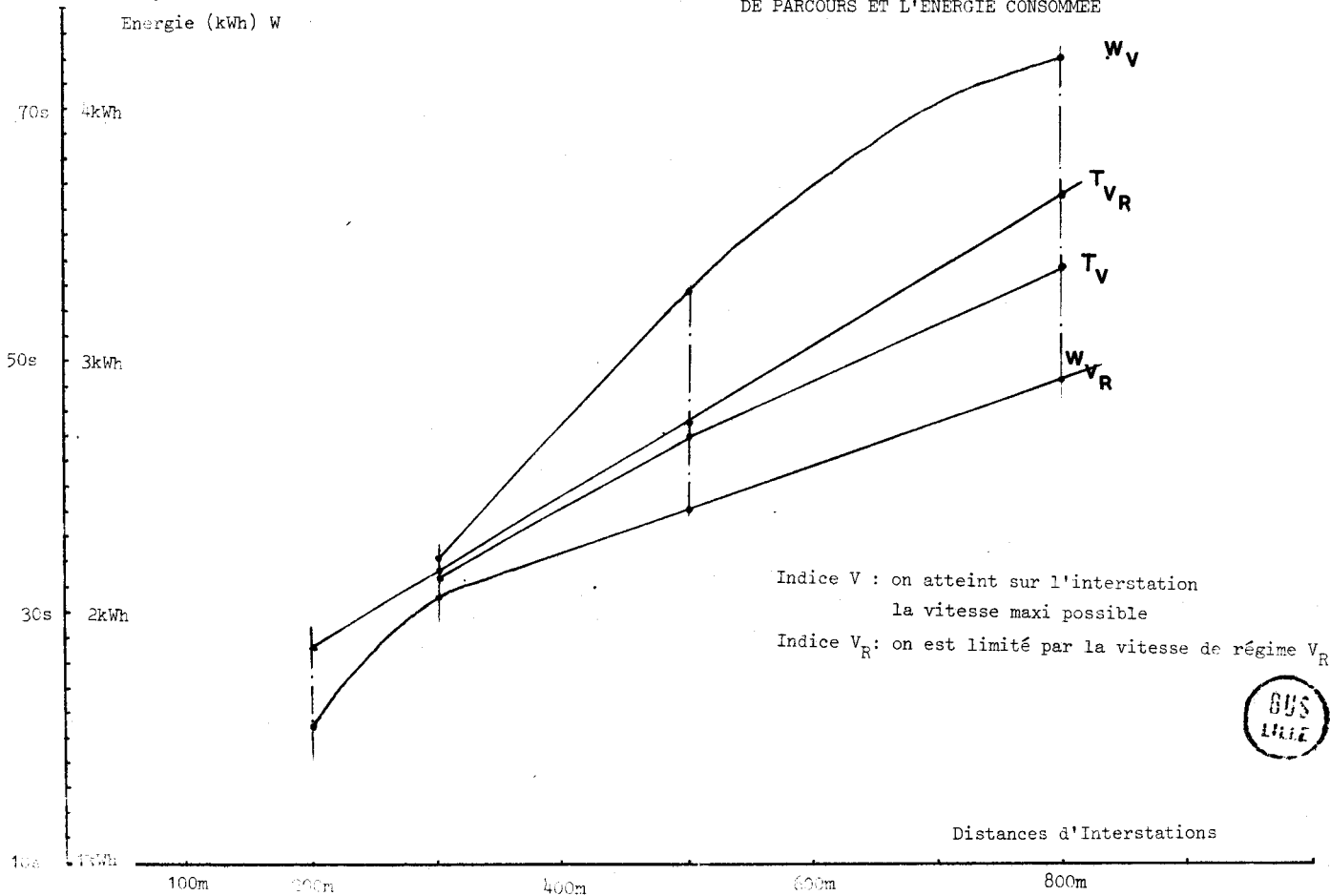
25m/s Vitesse

MOTRICE - MOTRICE POINTE NORMALE  
INFLUENCE DES DISTANCES D'INTERSTATION.

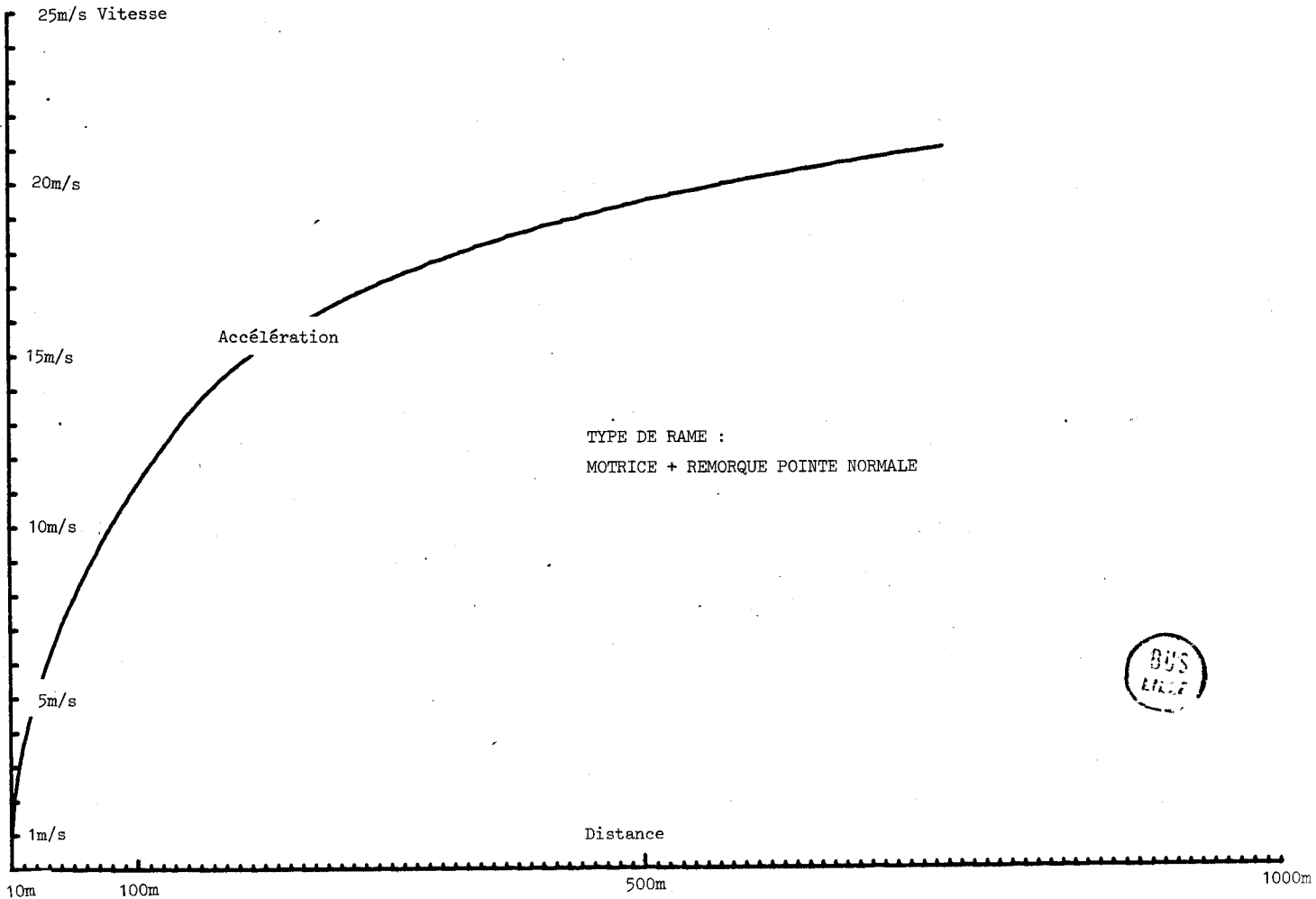
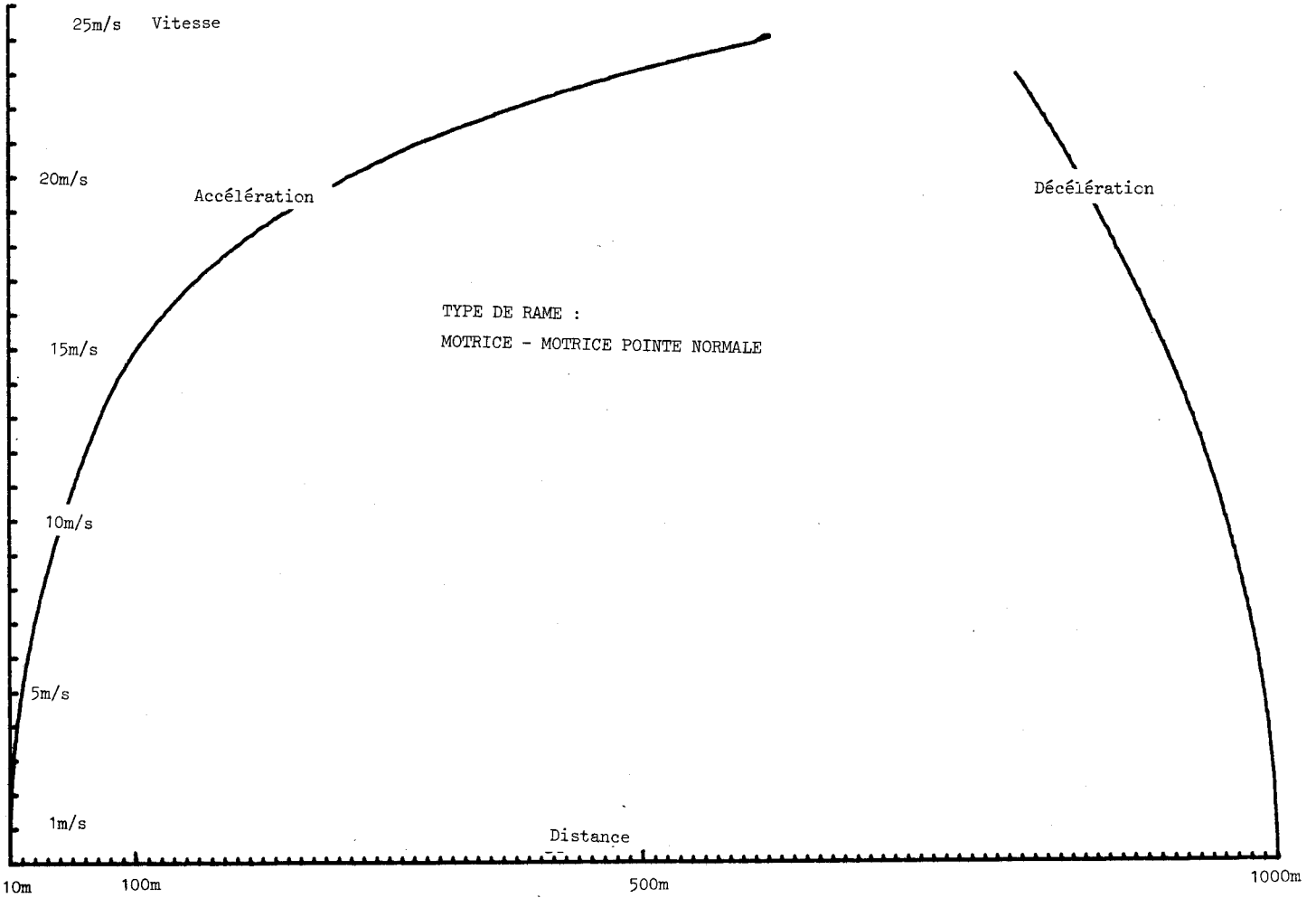


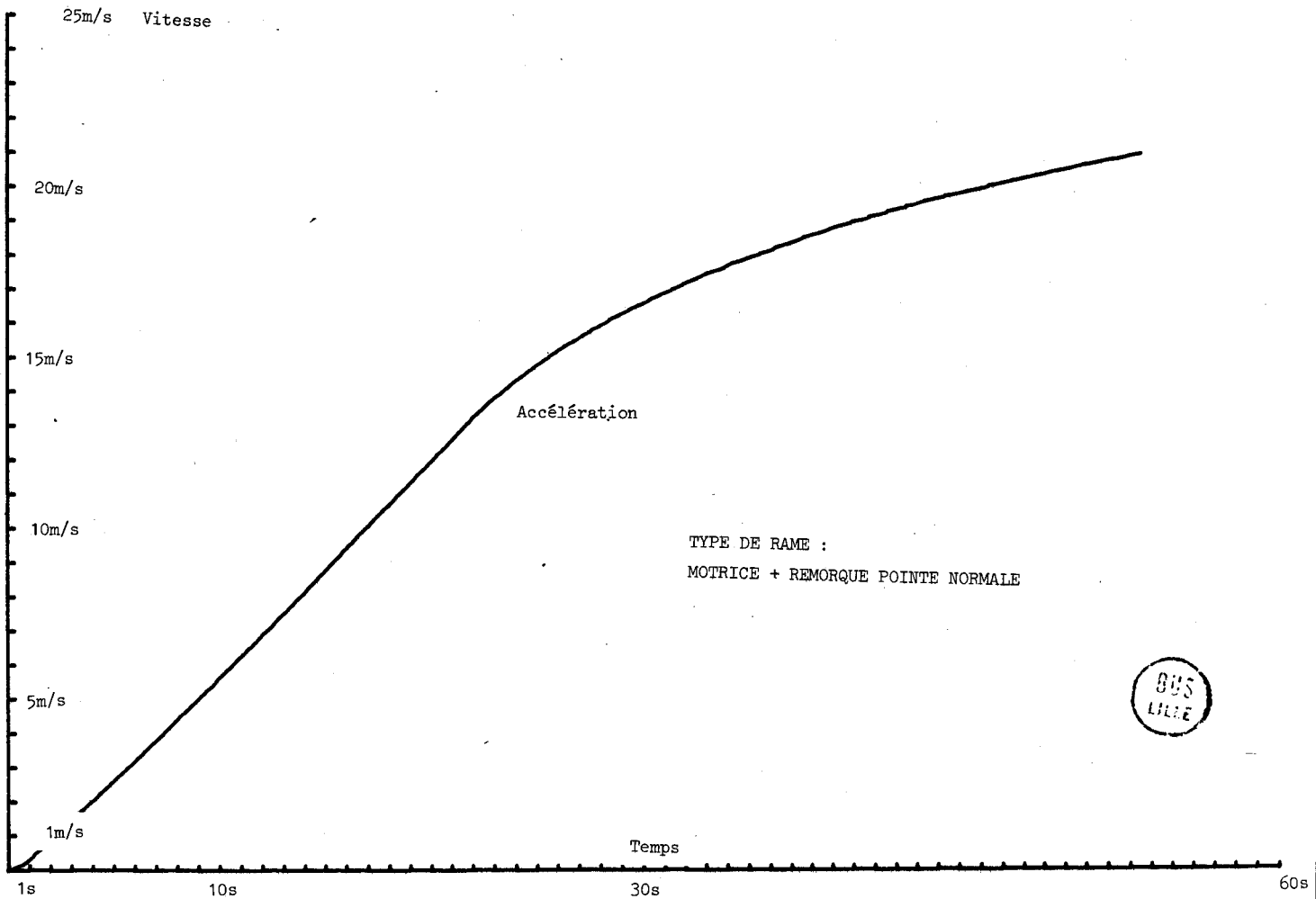
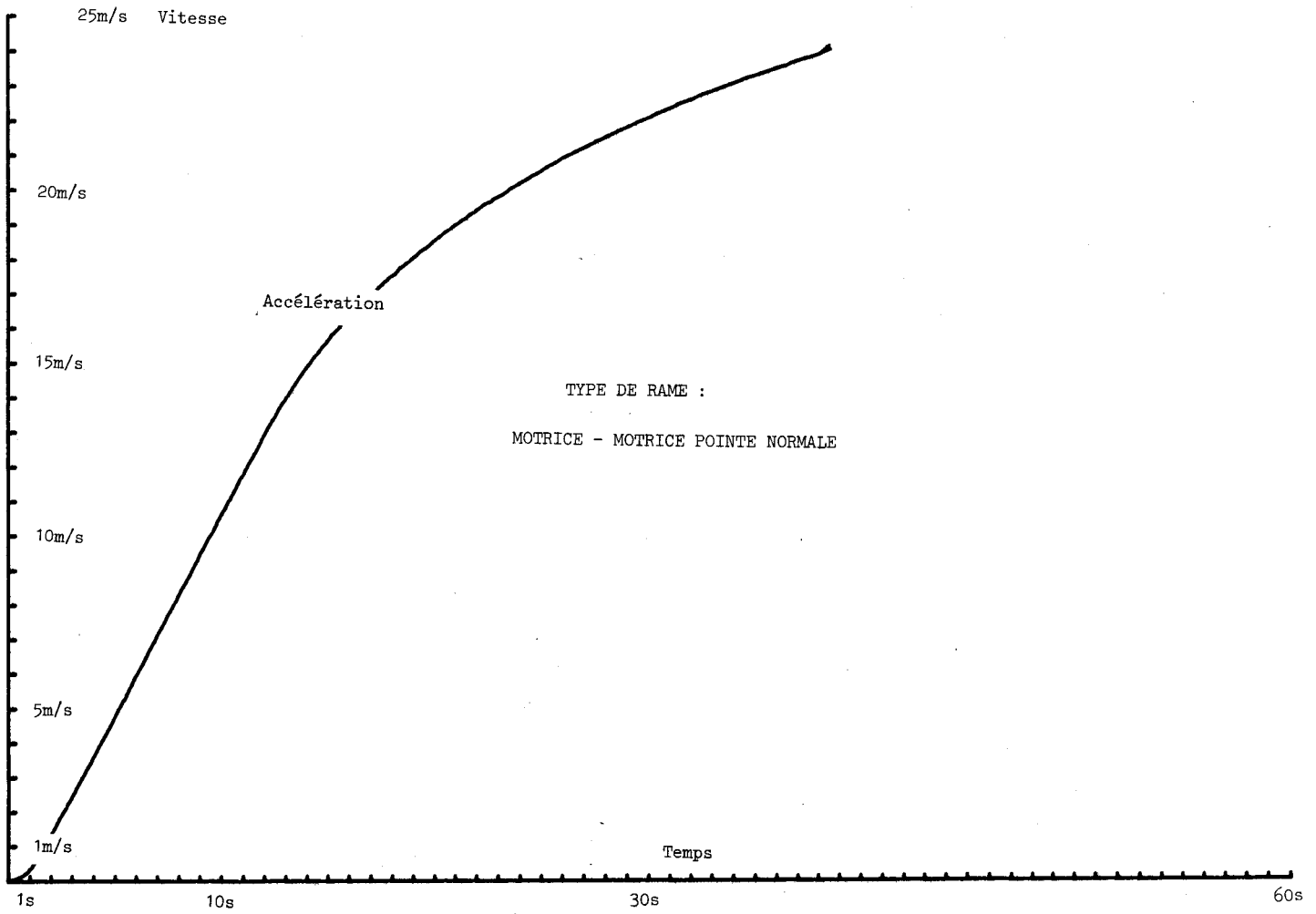
Temps (secondes) de parcours T  
Energie (kWh) W

INFLUENCE DES DISTANCES D'INTERSTATIONS SUR LE TEMPS  
DE PARCOURS ET L'ENERGIE CONSOMMEE









1.3.e. Influence de la limitation de COURANT hâcheur

Masse	Pointe normale
Pente	nulle
Rayon de courbure	Maxi
Vitesse régime	16,9m/s
Vitesse maxi	
Tension maxi	720V
Courant maxi	Paramètre variable
Rapport de transmission	1/6,83
Distance d'interstation	600m
Taux de shuntage	72%

Rappel

Le couple d'un moteur à courant continu est de la forme :

$$C_m = k_\gamma \cdot \phi \cdot I$$

Le flux d'induction  $\phi$  augmente avec l'intensité  $J$  du courant inducteur jusqu'à  $\phi_{\text{saturation}}$ , et donc avec l'intensité  $I$  du courant induit fourni par le hacheur.

En effet,  $I = J/\tau$ ,  $\tau$  étant le taux de shuntage fixe.

Le courant maximum  $I_{\text{max}}$ , fourni par le hacheur, détermine donc le couple moteur maximum :

$$C_{m \text{ max}} = k_\gamma \cdot I_{\text{max}} \cdot \phi(\tau \cdot I_{\text{max}})$$

Conséquences

L'augmentation du courant maximum possible  $I_{\text{max}}$ , délivrable par le hacheur, a pour effet :

- d'améliorer l'accélération maximum possible (planche.34.)

le temps de parcours (réduction du temps d'accélération)  
(planches 33 et 35)

la vitesse maximum possible

- d'augmenter la durée du palier à tension maximum constante (planche.36.)

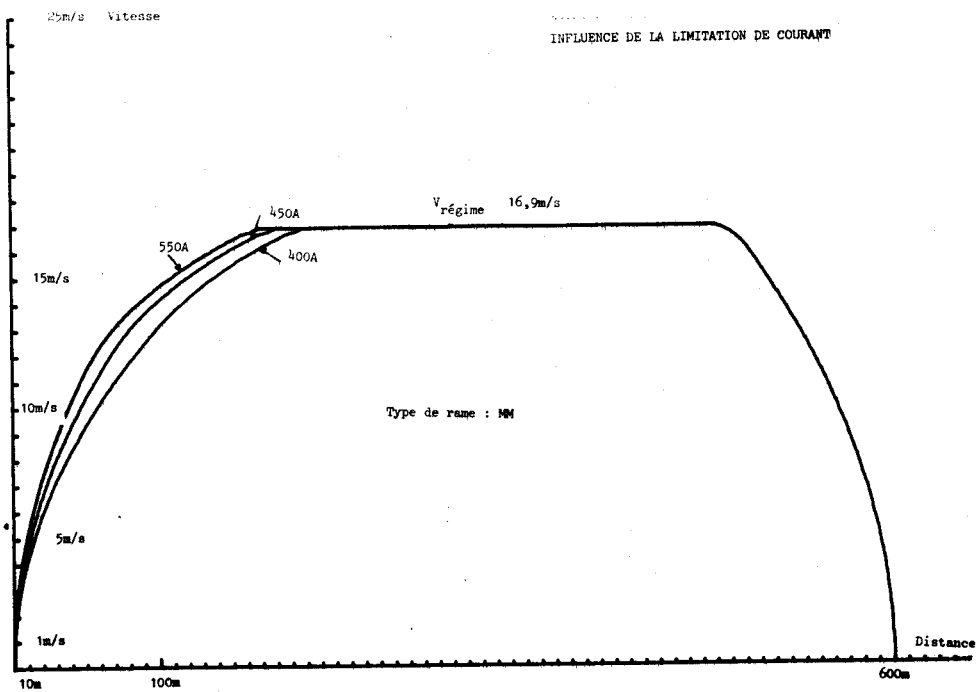
Durant ce palier, le courant diminue en fonction de la vitesse (à partir de la vitesse critique  $V_c$ , définie au §.I.3.f.) et, ainsi, les moteurs ne sont pas surchargés thermiquement (planche.37.).

Quelle que soit la valeur du courant maximum adopté, l'énergie consommée sur l'interstation reste constante (planche.35.).

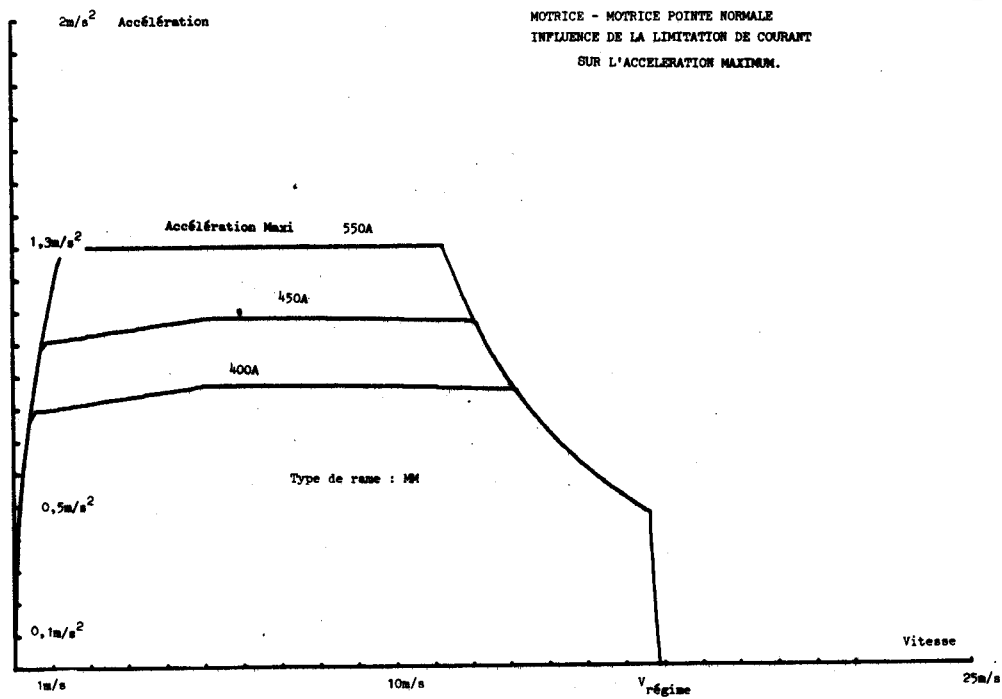
Il existe pour  $I_{max}$  une limite qu'il n'est pas utile de dépasser : celle où l'accélération maximum de consigne est atteinte : en effet l'asservissement d'accélération ne permet alors plus de gagner du temps, même pour des valeurs supérieures de  $I_{max}$ .

Dans le cas MM en charge de pointe normale, la limite pour  $I_{max}$  est 550A : cette valeur permet de retrouver l'accélération maximum de consigne de  $1,3m/s^2$ . Dans la mesure où le hacheur est suffisamment dimensionné, le fait de porter  $I_{max}$  à 550A, est donc un des moyens de supprimer les limites de vitesse maximum et d'accélération maximum, dont nous avons parlé lors du paragraphe concernant l'influence de la masse transportée. Cette augmentation de  $I_{max}$  a d'ailleurs été effectuée dans le cas du V.A.L., afin de permettre de retrouver l'accélération maximum de consigne, malgré l'augmentation du poids des équipements.

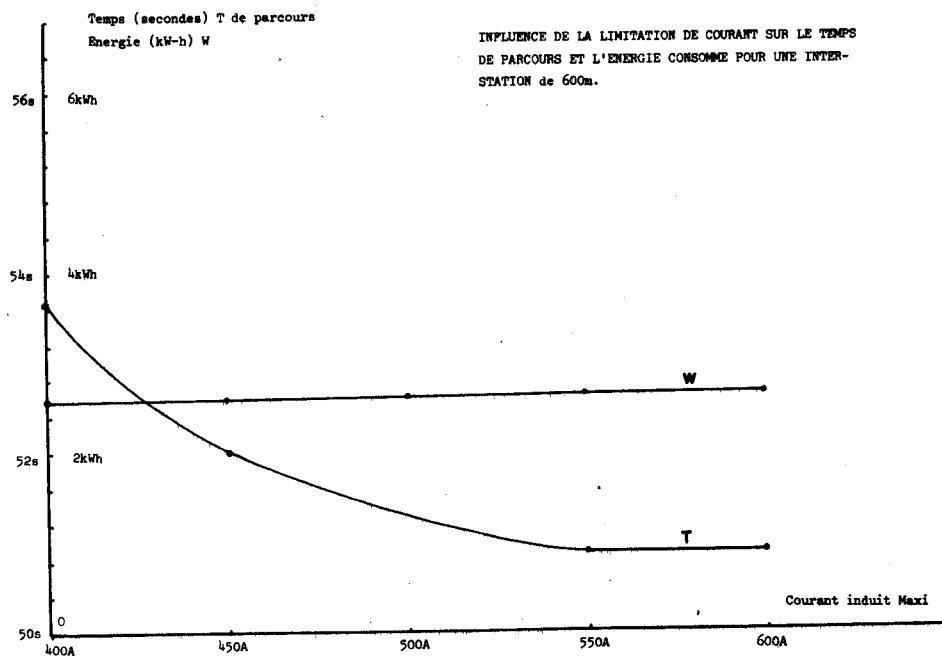
A CONSOMMATION D'ENERGIE CONSTANTE, ON GAGNE SUR LE TEMPS DE PARCOURS DE LA RAME, EN AUGMENTANT  $I_{max}$ .



34

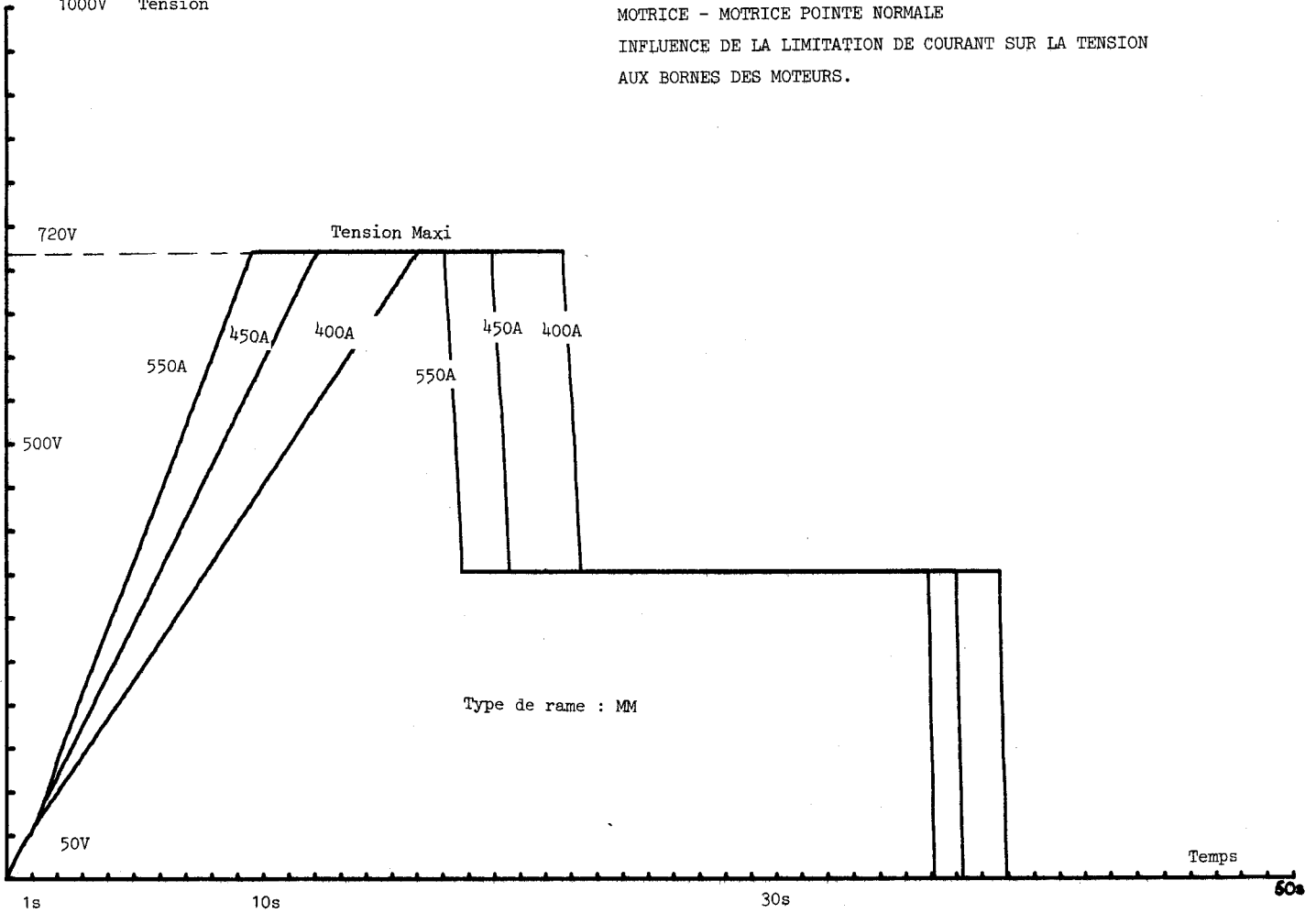


35



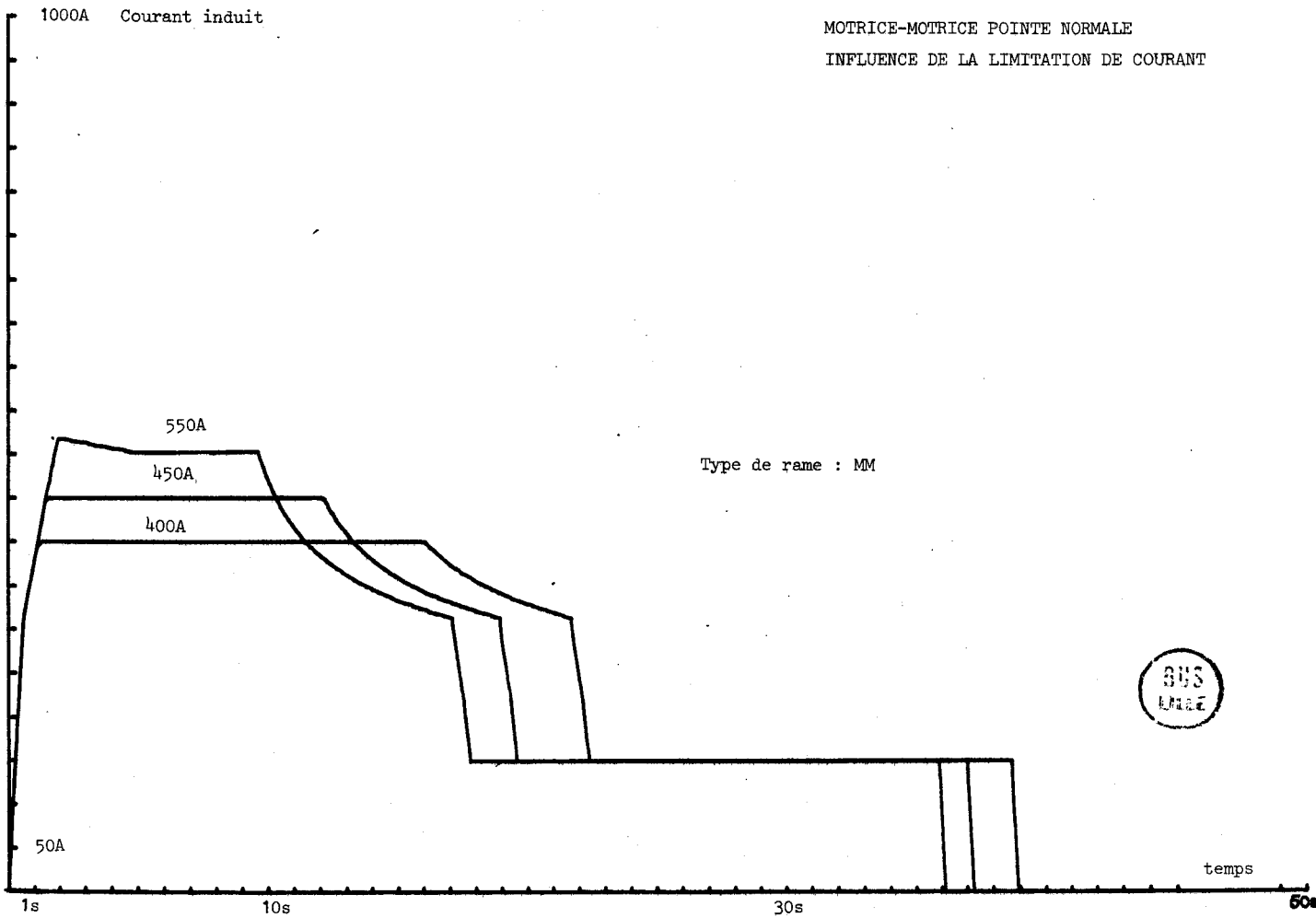
1000V Tension

MOTRICE - MOTRICE POINTE NORMALE  
INFLUENCE DE LA LIMITATION DE COURANT SUR LA TENSION  
AUX BORNES DES MOTEURS.



1000A Courant induit

MOTRICE-MOTRICE POINTE NORMALE  
INFLUENCE DE LA LIMITATION DE COURANT



### 1.3.6. Influence de la limitation de tension

Masse	Pointe normale
Pente	nulle
Rayon de courbure	Maxi
Vitesse régime	16,9m/s
Vitesse maxi	
Tension maxi	Paramètre variable
Courant maxi	470A
Rapport de transmission	1/6,83
Distance d'interstation	600m
Taux de shuntage	72%

Le dimensionnement du réseau limite la valeur de la tension disponible aux bornes des moteurs :  $U_{\max}$ .

#### Rappel

La vitesse critique  $V_c$  est celle à partir de laquelle, la tension étant limitée à  $U_{\max}$ , l'accélération de la rame diminue lorsque la vitesse croît au-delà de  $V_c$ . Elle s'écrit :

$$V_c = \frac{P_{\max}}{A \cdot F_{\max}} \cdot \eta$$

avec :

$P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max}$  puissance électrique maximum

A, une constante

$F_{\max}$  l'effort à la jante maximum correspondant à  $I_{\max}$

$\eta$  le rendement des moteurs égal à  $1 - \frac{RI_{\max}}{U_{\max}}$

A  $I_{\max}$  fixé, la vitesse critique augmente avec la valeur de la tension  $U_{\max}$  ; on peut, en effet écrire :

$$V_c = U_{\max} \cdot \frac{I_{\max}}{A \cdot f(I_{\max})} \cdot \left(1 - \frac{RI_{\max}}{U_{\max}}\right)$$

### Conséquences

Sans changer la valeur de l'accélération maximum possible de la rame, fixée par  $I_{\max}$  (à 470A, pour le cas MM en charge de pointe normale,  $\gamma_{\max} = 1,16\text{m/s}^2$ ), l'augmentation de la tension maximum  $U_{\max}$  permet de tenir cette accélération plus longtemps, puisque  $V_c$  augmente (planches.38.et .39.).

La durée du palier à courant maximum  $I_{\max}$  augmente donc avec  $U_{\max}$  ; mais les moteurs ne sont surchargés thermiquement pour autant ; en effet, la durée du palier à tension constante diminue alors dans les mêmes proportions (planches.40.et.41.).

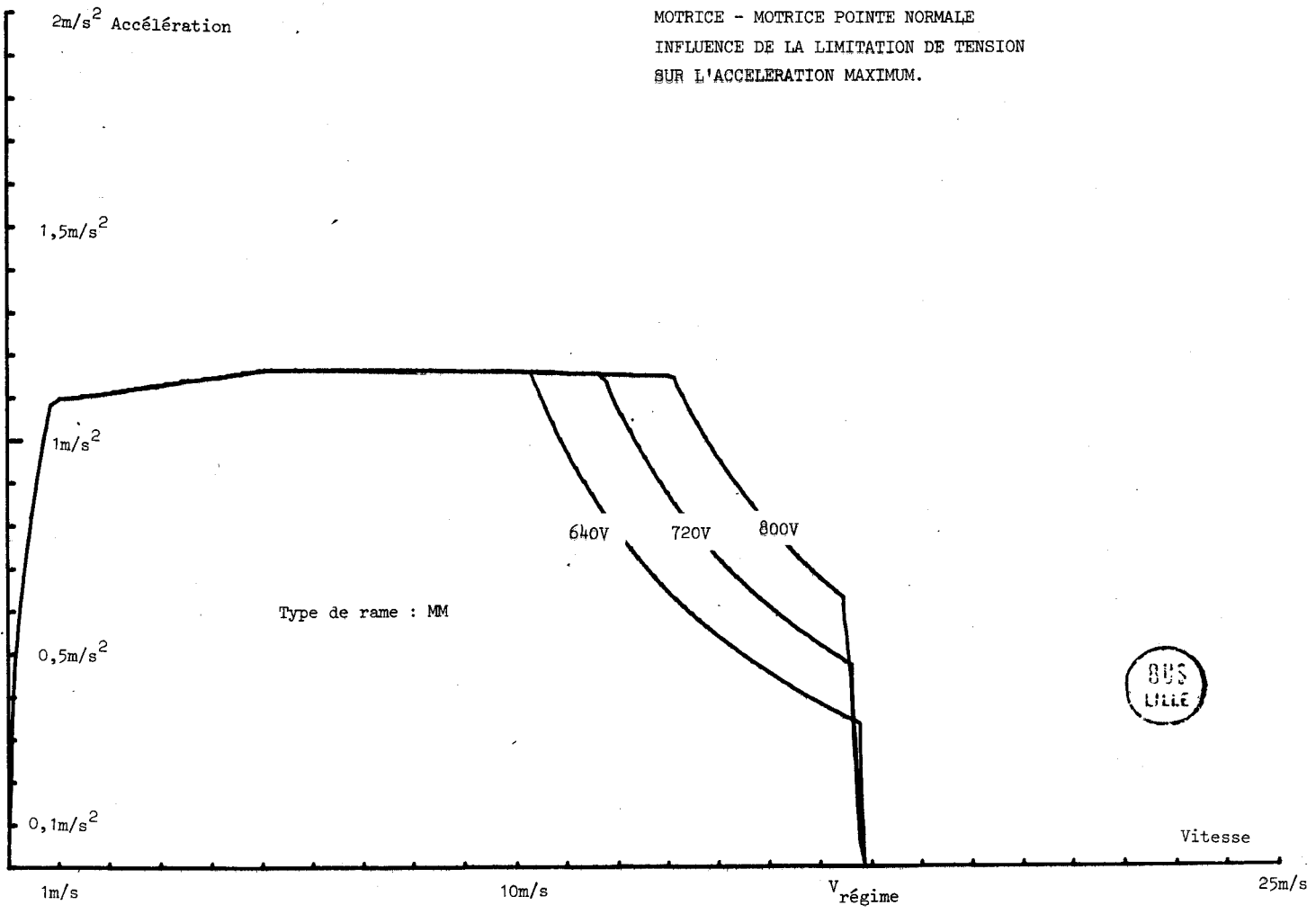
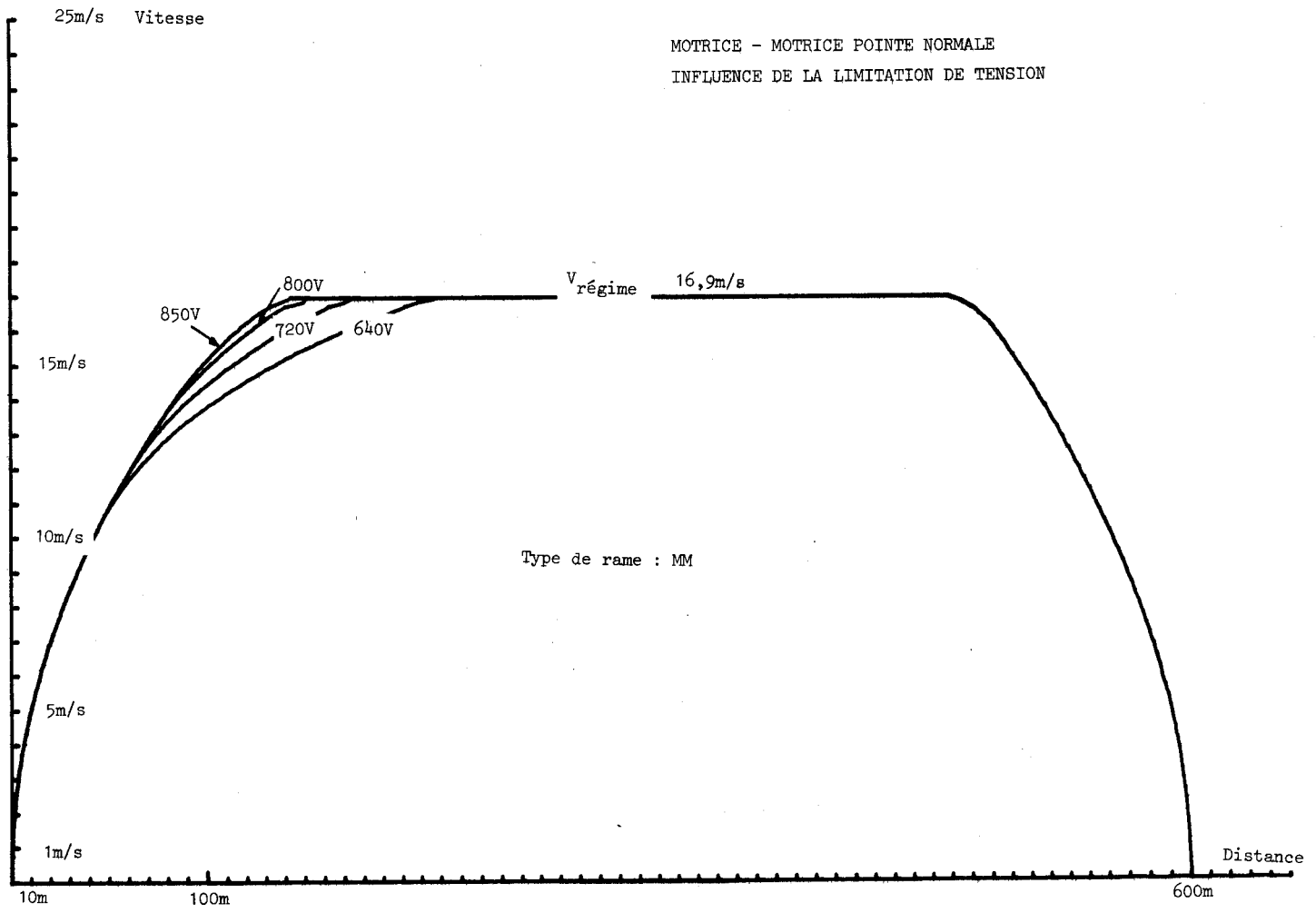
Avec l'augmentation de  $U_{\max}$ , le temps de parcours et la vitesse maximum possible sur l'interstation sont améliorés, l'énergie consommée reste constante (planche.42.).

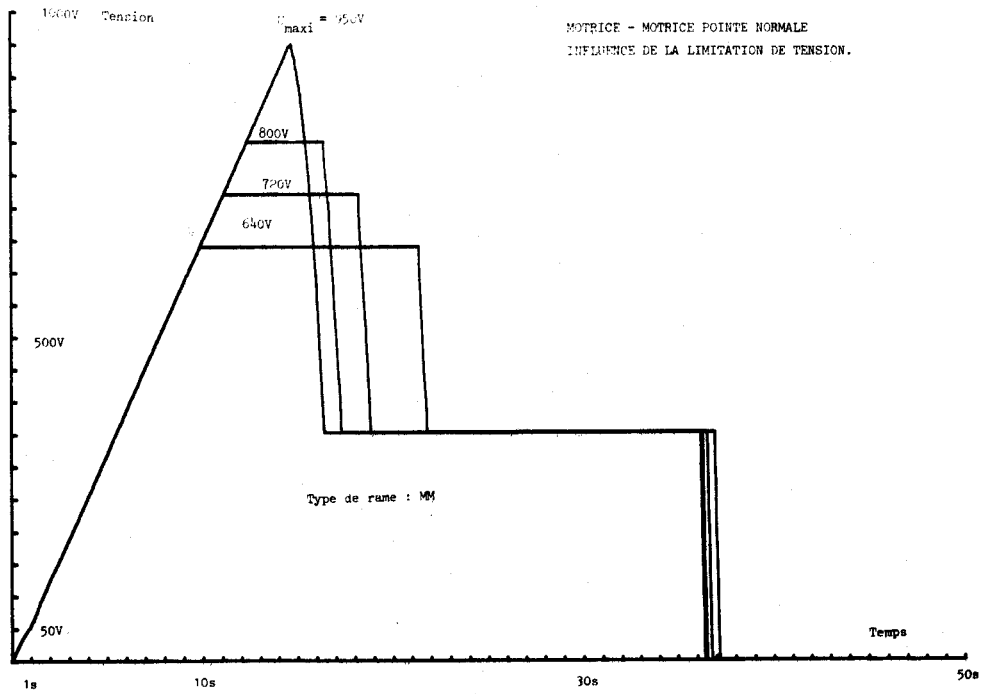
Il existe, pour  $U_{\max}$ , une valeur limite qu'il n'est pas utile de dépasser : celle (planche.40.) qui annule le palier à tension maximum constante et donne aux paliers d'accélération maximum et de courant maximum l'importance la plus grande ; au-dessus de cette limite, le gain de temps devient nul.

Dans le cas MM en charge de pointe normale, dont la vitesse de régime est 16,9m/s, la limite pour  $U_{\max}$  est 950V.

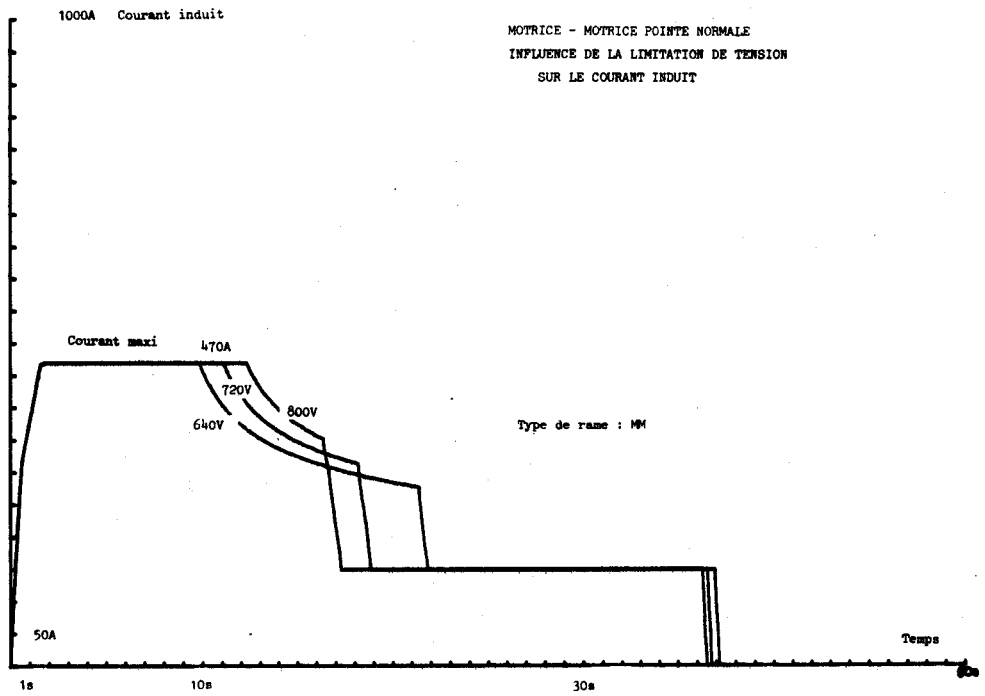
A CONSOMMATION D'ENERGIE CONSTANTE, ON GAGNE SUR LE TEMPS DE PARCOURS DE LA RAME, EN AUGMENTANT  $U_{\max}$ .



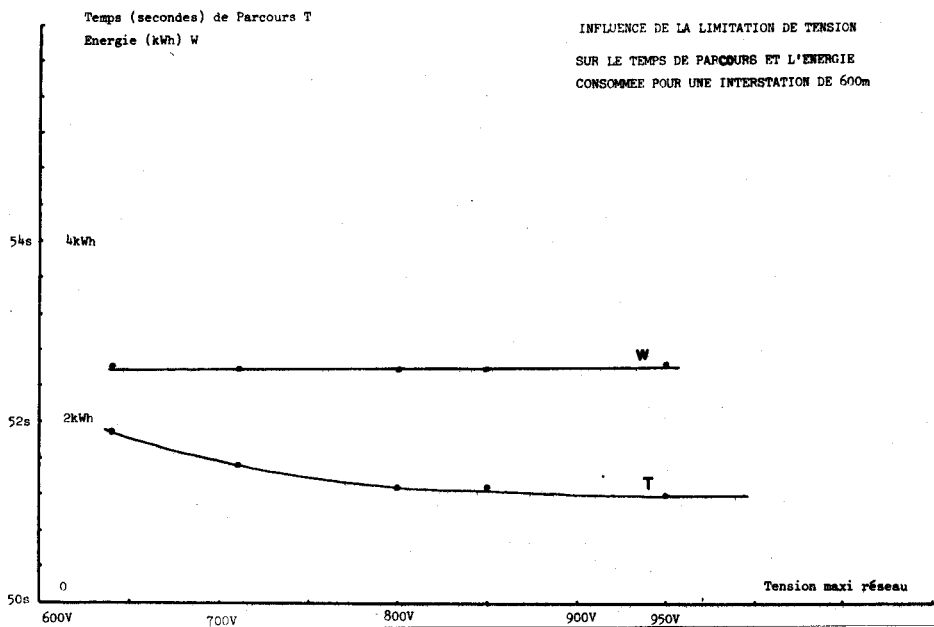




41



42



1.3.g. Influence du taux de shuntage des moteurs

Masse	Pointe normale
Pente	Nulle
Rayon de courbure	Maxi
Vitesse régime	16,9m/s
Vitesse maxi	Possible
Tension maxi	800V
Courant maxi	470A
Rapport de transmission	1/6,83
Distance d'interstation	800m
Taux de shuntage	Paramètre variable

Rappel

Le couple moteur maximum s'écrit :

$$C_{m \max} = k_{\gamma} \cdot \phi(\tau I_{\max}) \cdot I_{\max}$$

La vitesse de décrochage s'écrit :

$$V_c = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{A \cdot F_{\max}} \cdot \eta(U_{\max}, I_{\max})$$

Conséquences

A  $I_{\max}$  et  $U_{\max}$  fixés, si l'on diminue le pourcentage de champ restant  $\tau$ ,

- l'accélération maximum possible diminue (planche.45.).

En effet,  $\phi(\tau I_{\max})$  et donc  $C_{m \max}$  et  $F_{\max}$  décroissent.

Dans le cas MM en charge de pointe normale, l'accélération maximum possible a pour valeurs :

à  $\tau = 72\%$  (valeur nominale)  $\gamma_{\max} = 1,16\text{m/s}^2$

à  $\tau = 100\%$   $\gamma_{\max} = 1,3\text{m/s}^2$  (limitée par l'asservissement)

avec un courant nominal maximum fourni par le hâcheur;

$I_{\max} = 470\text{A}$  (la valeur initiale de  $I_{\max} = 450\text{A}$  ayant été augmentée afin d'améliorer l'accélération maximum).

- l'importance du palier à accélération maximum augmente (planche.45.), puisque  $V_c$  augmente. Le palier à courant maximum constant est donc plus important (planche.46.) et les moteurs sont plus sollicités thermiquement.
- la vitesse maximum possible sur l'interstation augmente. (planche.44.)
- lorsqu'on est limité sur l'interstation par la vitesse de consigne, le temps de parcours et la consommation énergétique augmentent.

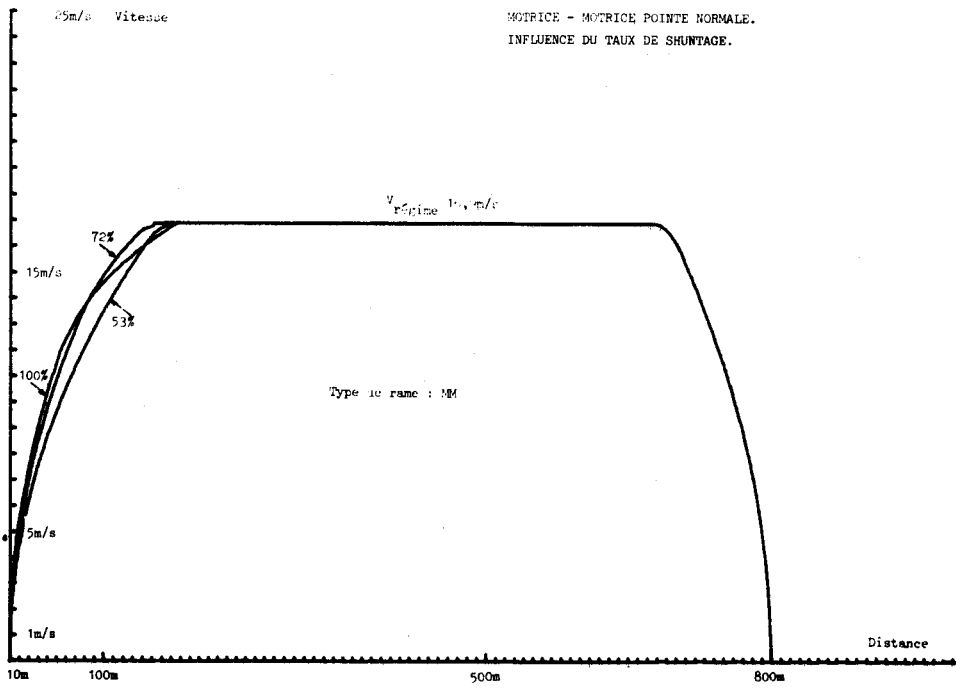
Dans le cas MM en charge de pointe normale avec moteurs en fonctionnement nominal, les écarts d'énergie entre les taux de shuntage 100% et 53% sont pratiquement nuls, les écarts en temps de parcours très faibles (planche.47.).

- lorsqu'on laisse la rame atteindre la vitesse maximum possible sur l'interstation, l'énergie consommée augmente, le temps de parcours passe par un MINIMUM (planche.47.).

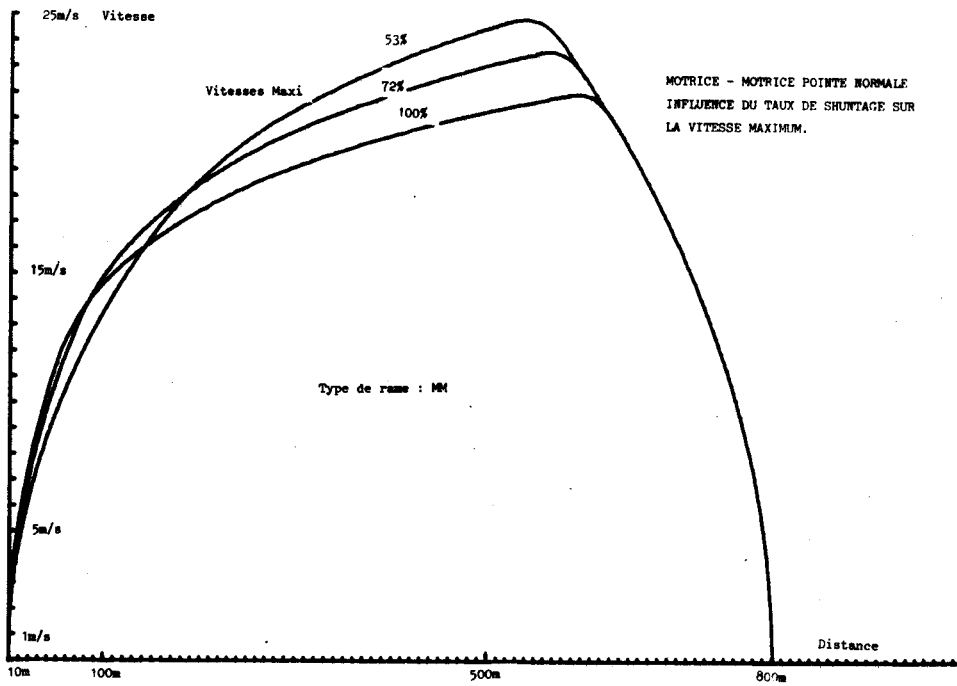
Il existe un taux de shuntage optimum des moteurs, tel que l'ensemble des performances de la rame soit le plus favorable : à savoir, une bonne accélération maximum, une bonne vitesse maximum possible, un échauffement moyen des moteurs, une consommation énergétique et un temps de parcours moyens.

Dans le cas MM en charge de la pointe normale avec moteurs en fonctionnement nominal, le taux de shuntage optimum est de 72%, il correspond :

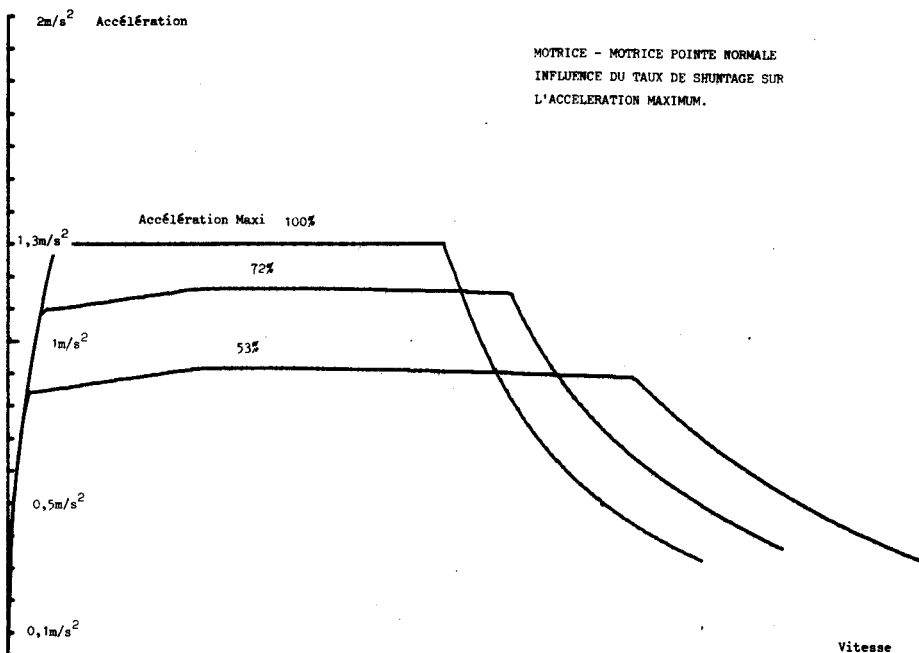
- . à l'importance minimum du régime d'accélération (planche.43.) jusque la vitesse de régime 16,9m/s,
- . à la valeur minimum du temps de parcours de l'interstation lorsque la rame n'est soumise à aucune consigne de vitesse (planche.47.).

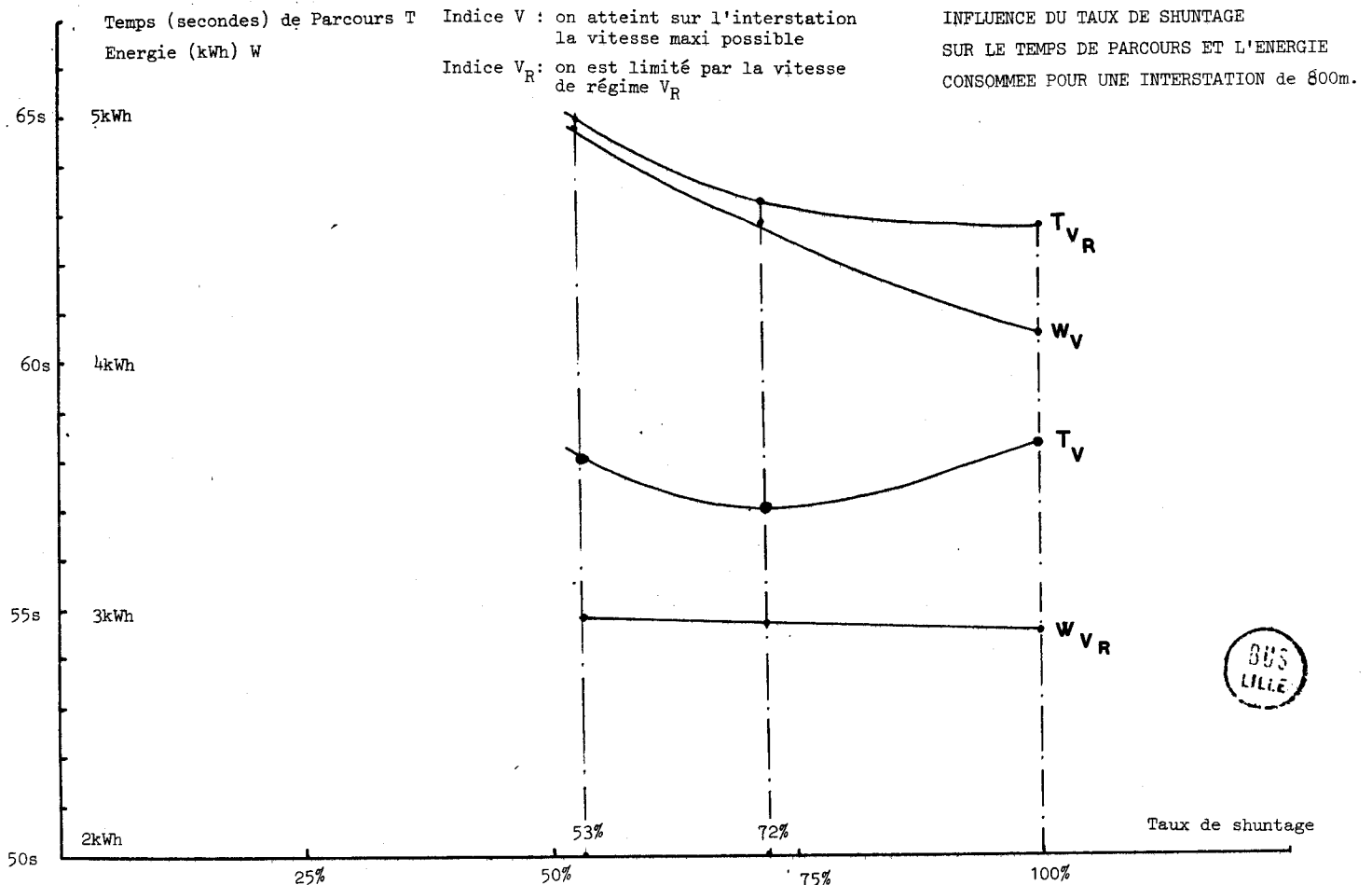
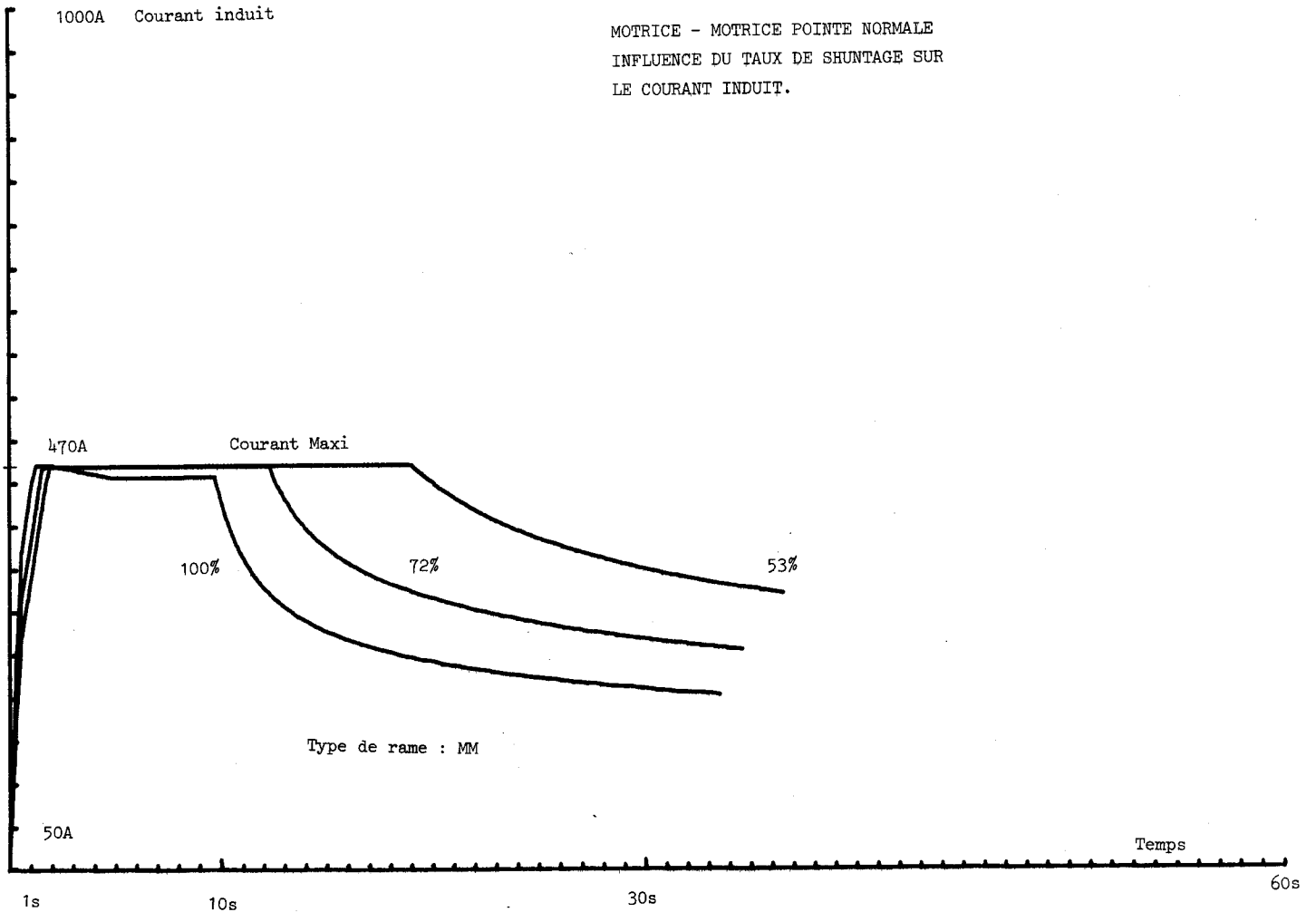


44



45





1.3.h. Influence du rapport de transmission

<i>Masse</i>	Pointe normale
<i>Pente</i>	Nulle
<i>Rayon de courbure</i>	Maxi
<i>Vitesse régime</i>	16,9m/s
<i>Vitesse maxi</i>	Possible
<i>Tension maxi</i>	800V
<i>Courant maxi</i>	470A
<i>Rapport de transmission</i>	Paramètre variable
<i>Distance d'interstation</i>	800m
<i>Taux de shuntage</i>	72%

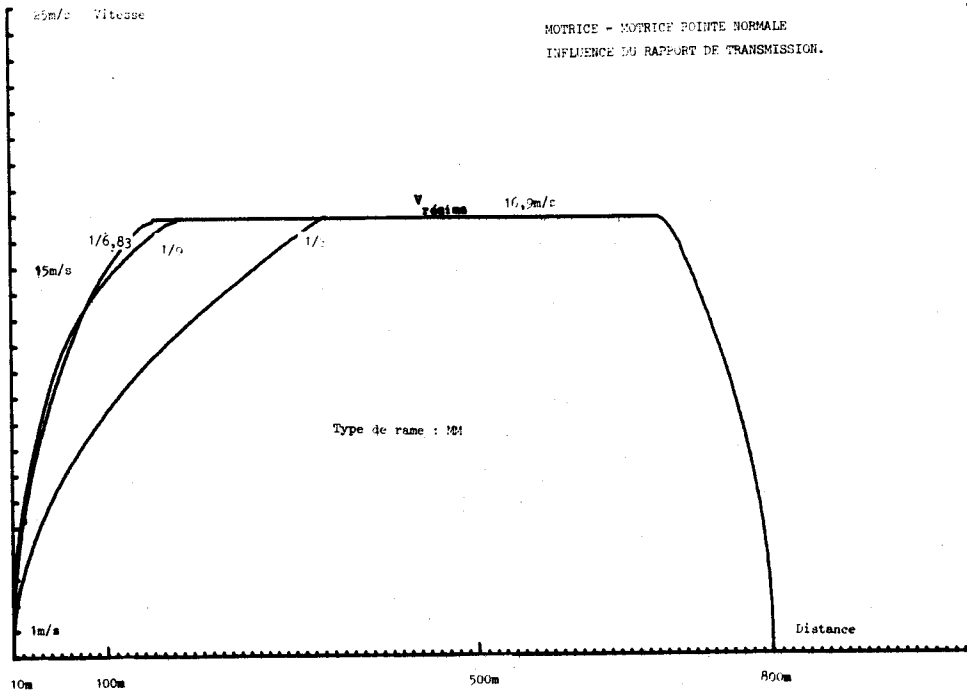
De la même manière que pour le taux de shuntage, le rapport de transmission peut être optimisé à une valeur assurant le meilleur compromis entre :

- l'accélération maximum possible (planche.50.)
- l'échauffement des moteurs (planches.51.)
- la vitesse maximum possible sur l'interstation (planche.49.)
- le temps de parcours et la consommation énergétique (planche.52.).

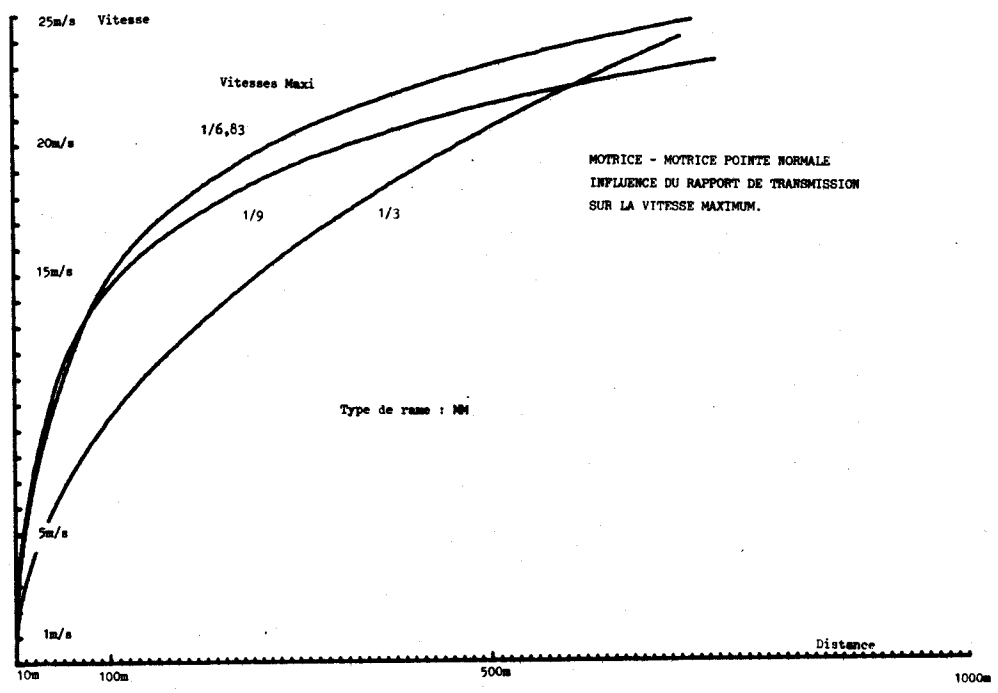
Dans le cas du V.A.L. (exemple MM en charge de pointe normale, avec moteurs en fonctionnement nominal et taux de shuntage optimum de 72%) le rapport de transmission 1/6,83 est judicieusement choisi.

Cet optimum correspond à l'importance minimum du régime d'accélération de la rame jusque la vitesse de régime 16,9m/s. (planche.48.). Il permet, tout en restant dans des limites acceptables de temps de parcours et d'énergie et avec une accélération maximum moyenne, d'atteindre une vitesse maximum possible sur l'interstation, supérieure à celle permise par d'autres rapports de transmission (1/3, 1/9).

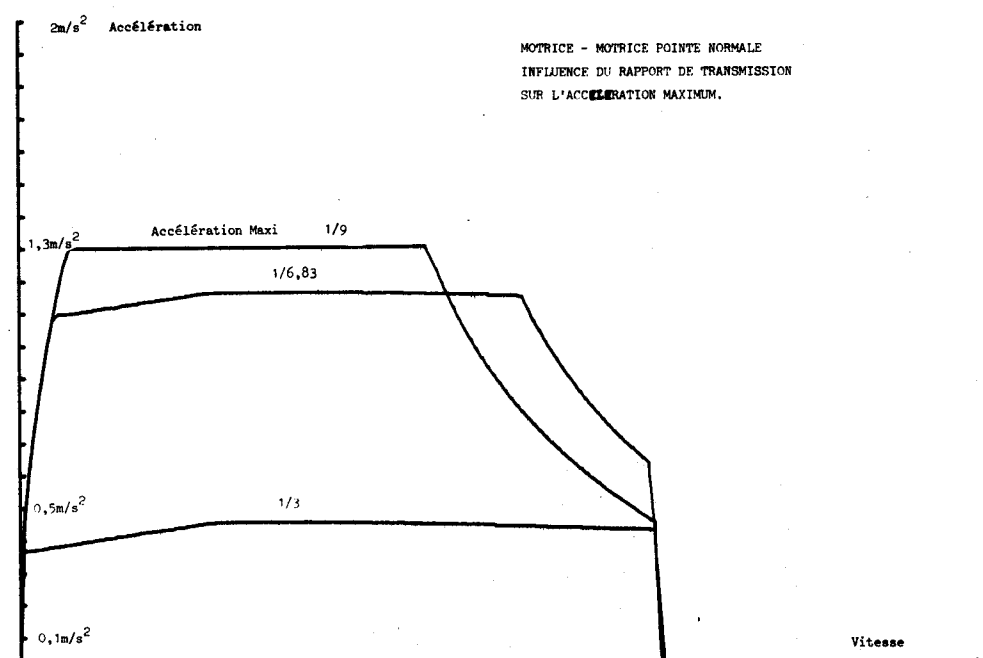


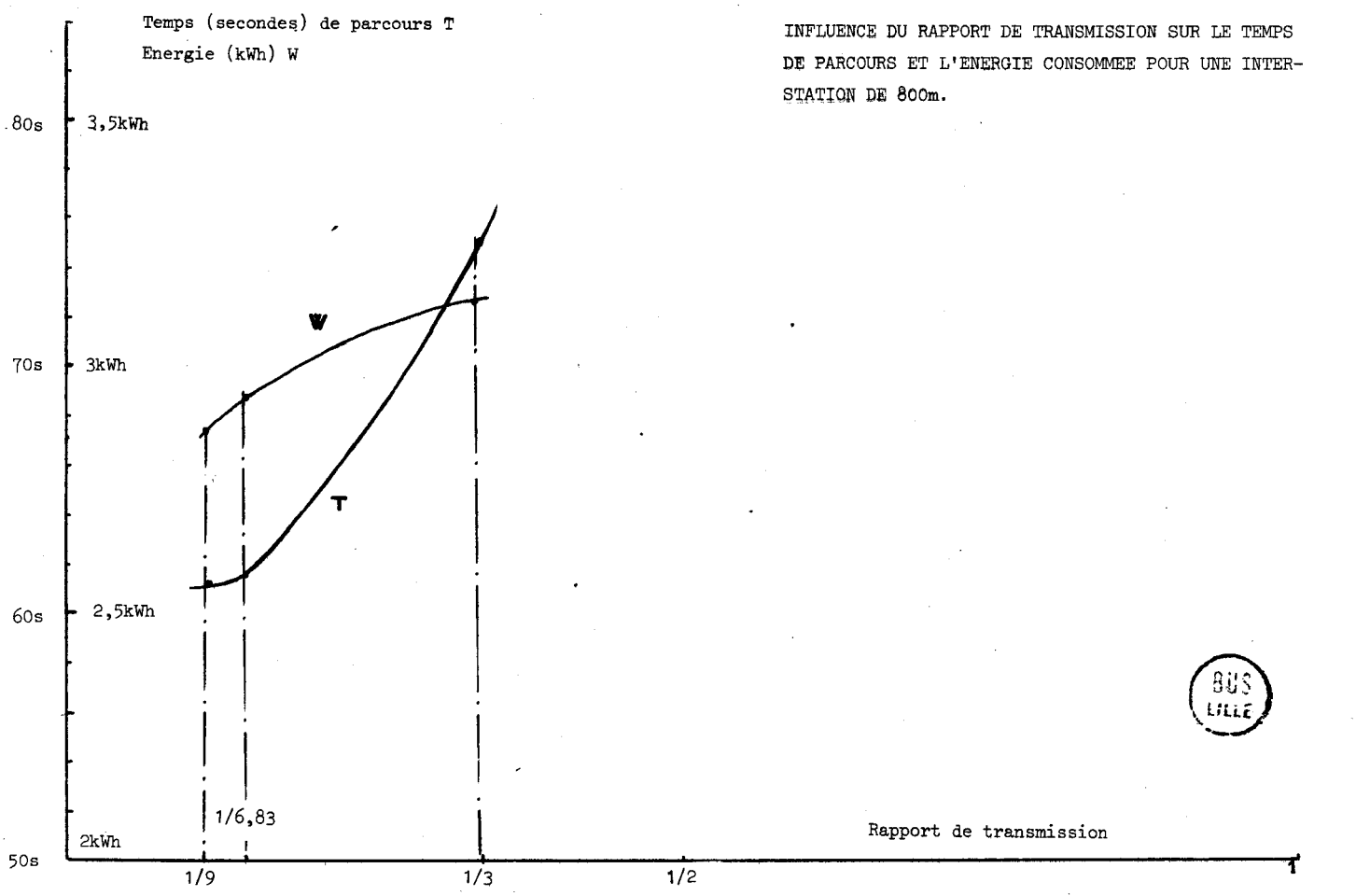
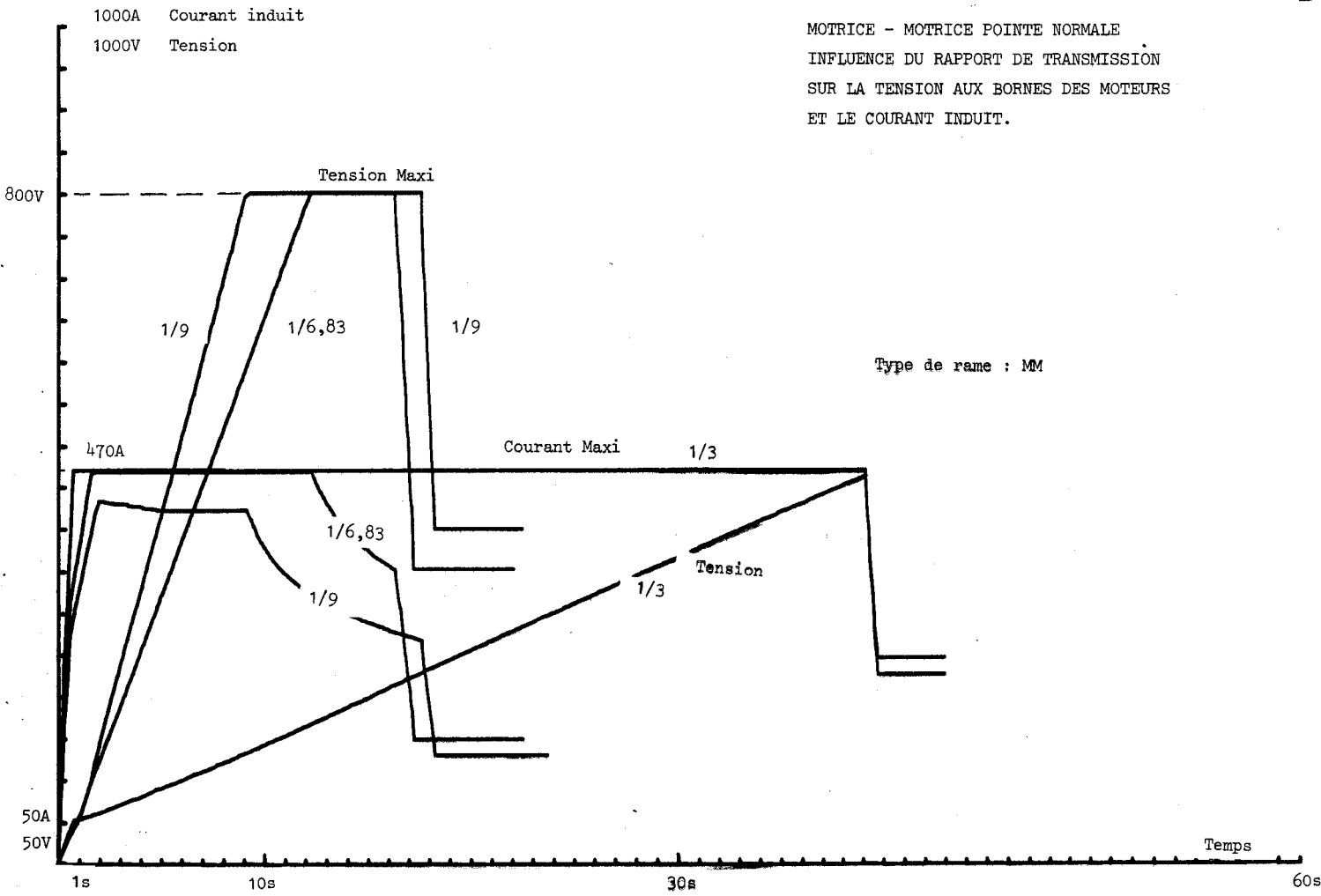


49



50





1.3.i. Influence des vitesses de consigne

*Vitesse de régime*  
*Vitesse Maximum*

<i>Masse</i>	Pointe normale
<i>Pente</i>	nulle
<i>Rayon de courbure</i>	Maxi
<i>Vitesse régime</i>	Paramètre variable
<i>Vitesse maxi</i>	
<i>Tension maxi</i>	800V
<i>Courant maxi</i>	470A
<i>Rapport de transmission</i>	1/6,83
<i>Distance d'interstation</i>	800m
<i>Taux de shuntage</i>	72%

Pour chaque type de rame, (en exemple, MM planche.53., MR planche.54.), l'augmentation de la vitesse de consigne a pour effets :

- d'améliorer la vitesse moyenne de la rame sur l'interstation, et donc d'améliorer la vitesse commerciale (diminution du temps de parcours)(planche.55.)
- d'augmenter le temps et la distance correspondant au régime d'accélération et ainsi d'accroître la consommation énergétique (planche.56.).

Avec l'augmentation de la vitesse de consigne, l'écart entre les temps de parcours et consommations énergétiques des types MM et MR s'accroît.

Pour chaque type de rame, après avoir estimé :

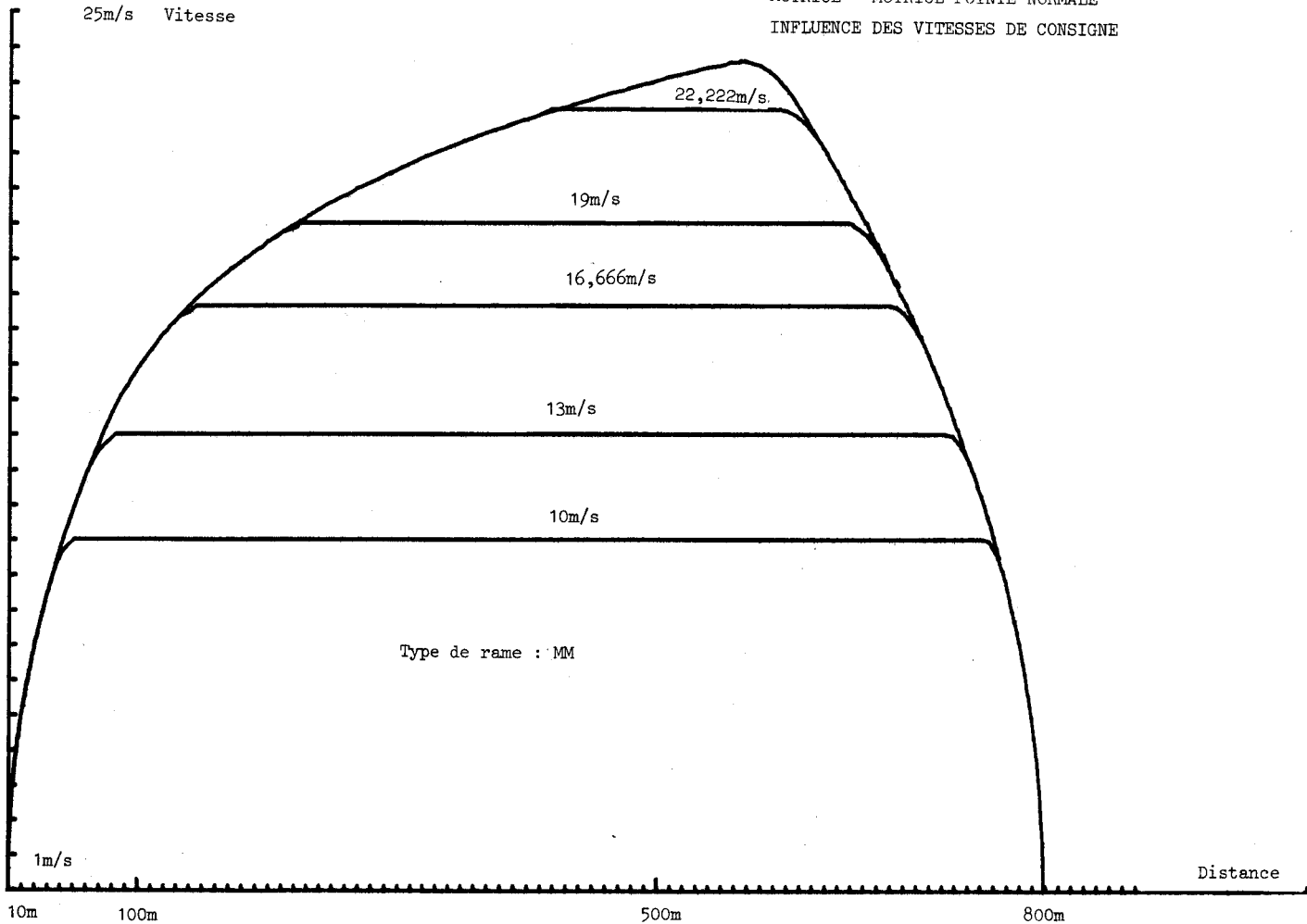
- . le prix du kWh
- . le prix de la place offerte
- . le prix de la seconde de parcours,

il est possible de déterminer un minimum du prix de revient total de la rame correspondant :

- à une vitesse de régime optimum (procurant une vitesse commerciale supérieure à celle exigée par l'étude paramétrique)
- à une vitesse maximum optimum (permettant un rattrapage suffisant des temps perdus en stations).

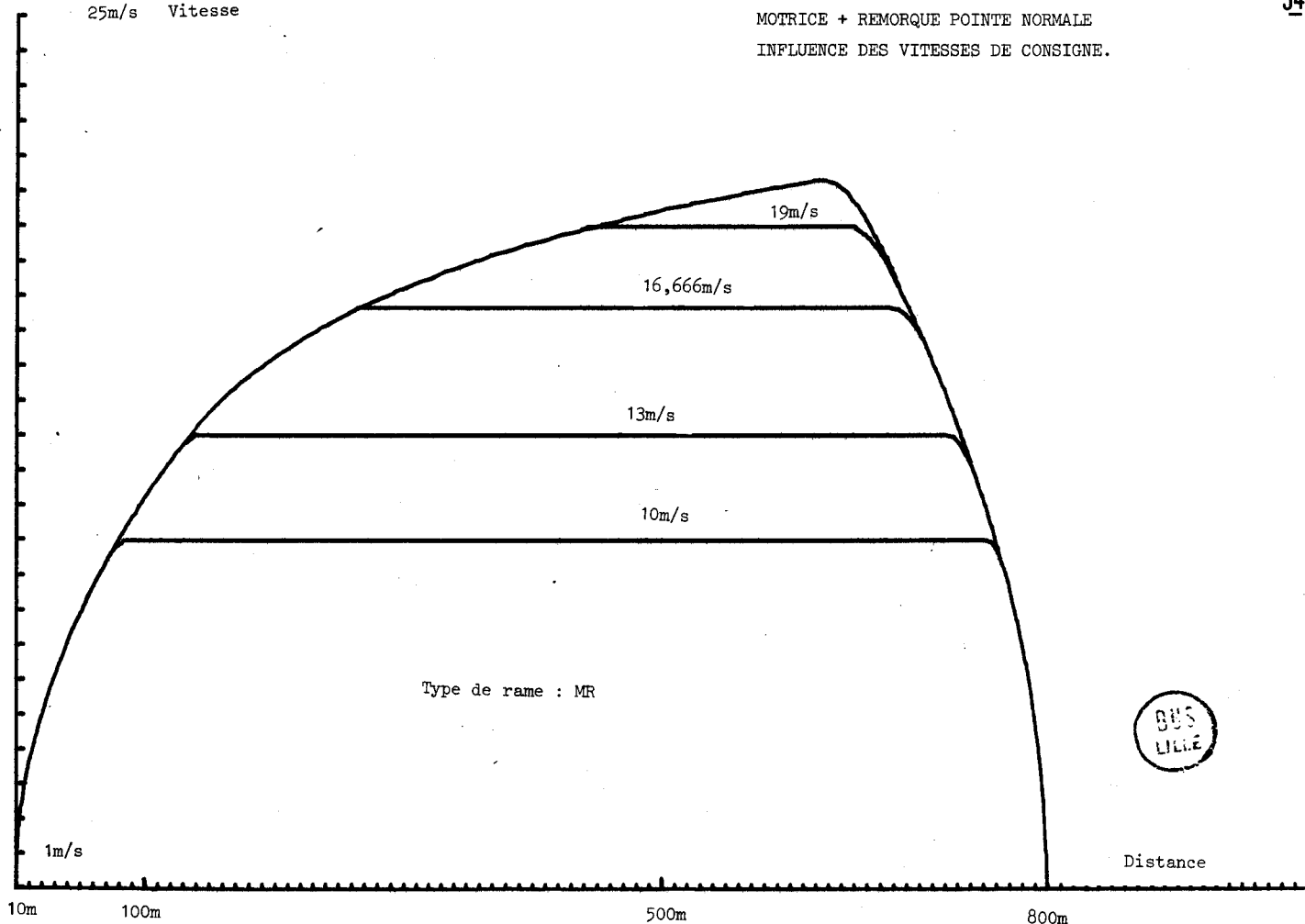
25m/s Vitesse

MOTRICE - MOTRICE POINTE NORMALE  
INFLUENCE DES VITESSES DE CONSIGNE



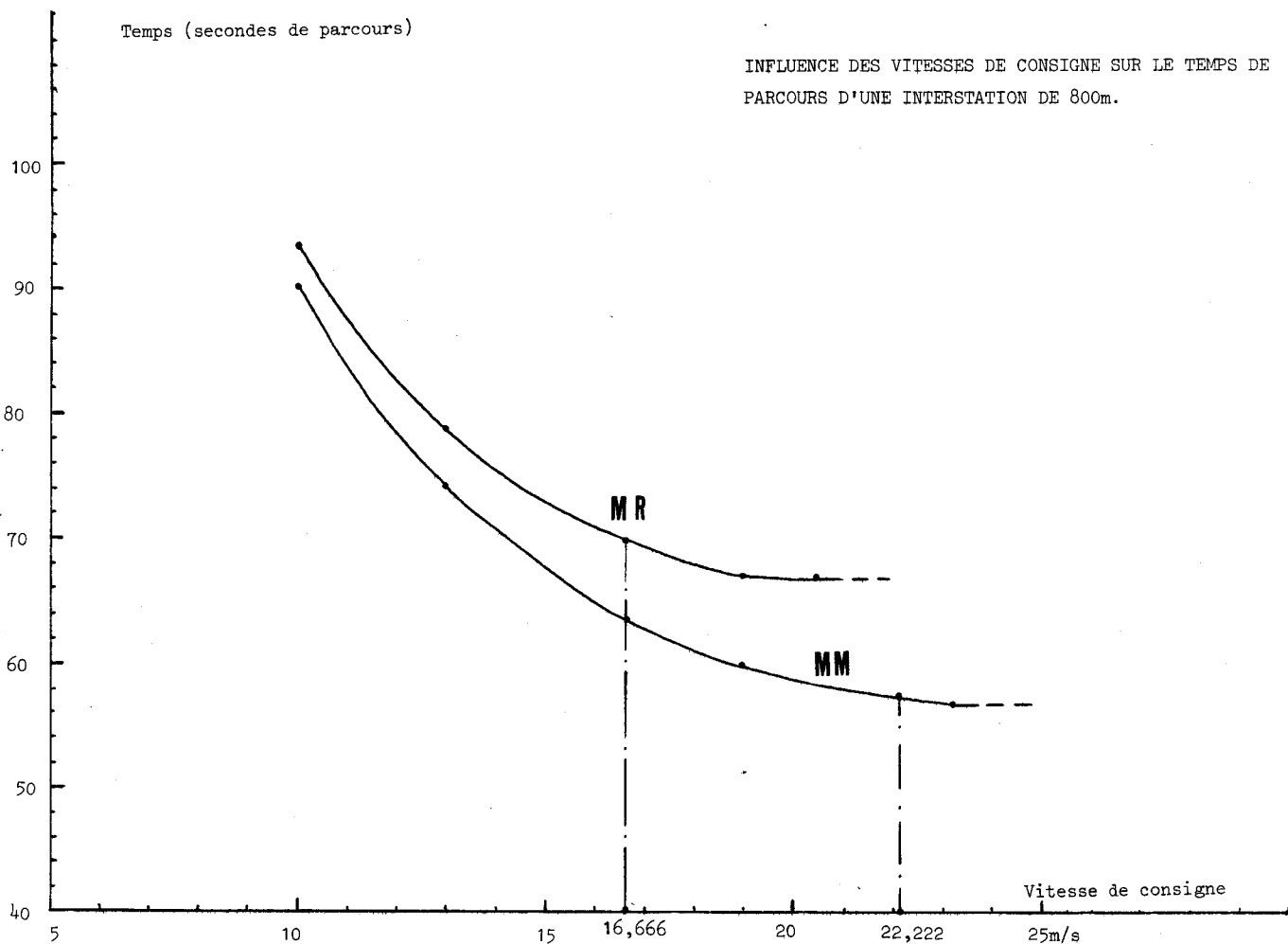
25m/s Vitesse

MOTRICE + REMORQUE POINTE NORMALE  
INFLUENCE DES VITESSES DE CONSIGNE.



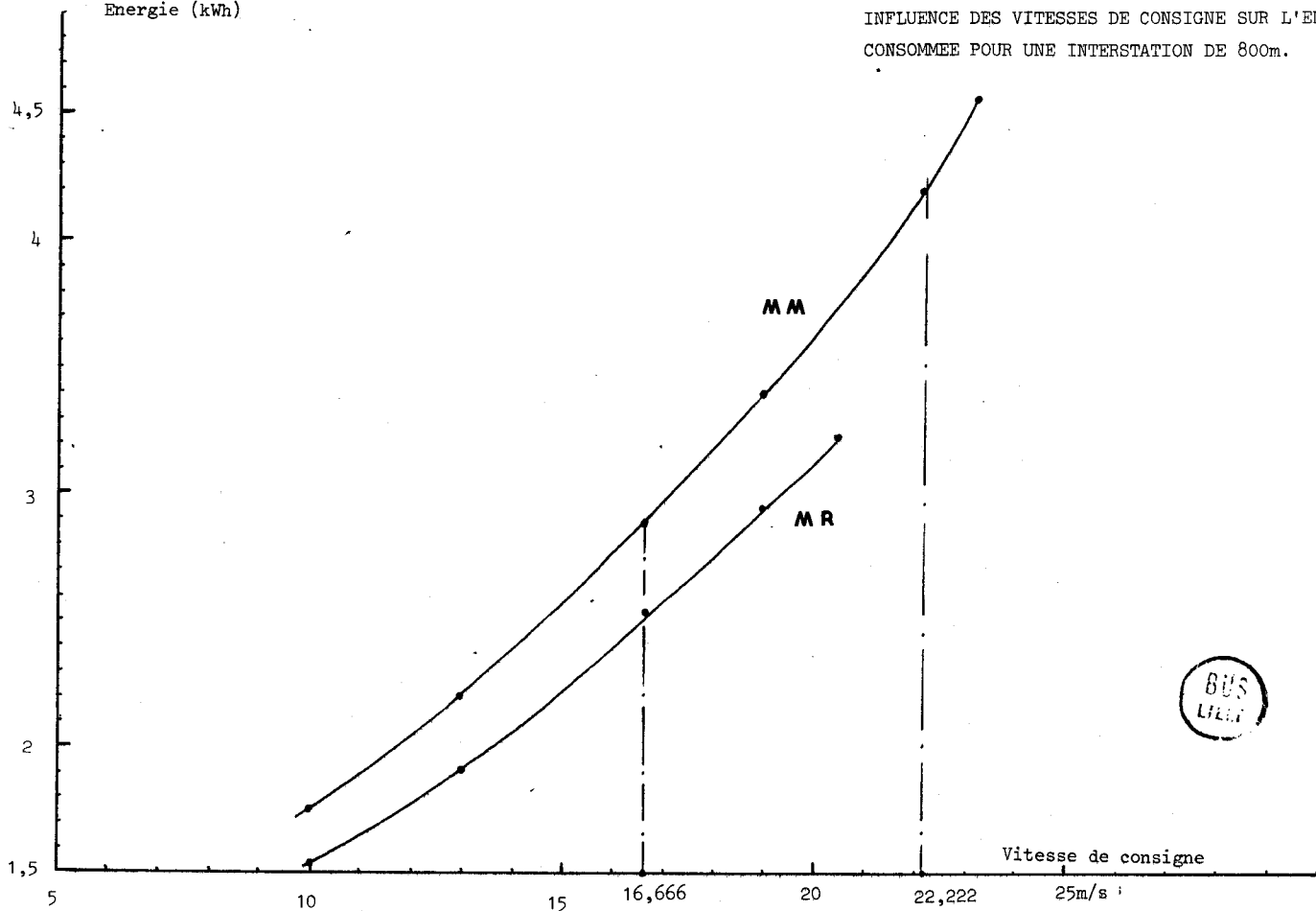
Temps (secondes de parcours)

INFLUENCE DES VITESSES DE CONSIGNE SUR LE TEMPS DE PARCOURS D'UNE INTERSTATION DE 800m.



Energie (kWh)

INFLUENCE DES VITESSES DE CONSIGNE SUR L'ENERGIE CONSOMMEE POUR UNE INTERSTATION DE 800m.



CONCLUSIONS

Nous avons défini un principe de simulation numérique permettant de calculer les caractéristiques cinématiques, mécaniques, électriques et énergétiques d'un véhicule de transport urbain automatisé à traction électrique, en déplacement sur un parcours quelconque.

Le modèle est bâti à partir d'une seule comparaison :  
- couple moteur possible , couple moteur exigé par les consignes d'accélération, à une certaine vitesse )  
ce qui le rend particulièrement simple.

Nous avons établi quatre types d'équations constituant le modèle numérique du véhicule :

- équations cinématiques, réglées par une logique de prédétermination des régimes de marche
  - équations mécaniques
  - équations électriques, décrivant le fonctionnement
    - . du moteur série : dans les 3 zones de fonctionnement de l'inducteur
    - . du moteur asynchrone : dans les zones à flux d'entrefer constant, affaiblissement du champ et fréquence statorique maximum
- ceci en tenant compte des limitations apportées par les organes de commande de ces moteurs (hâcheur, cycloconvertisseur ou onduleur)
- équations énergétiques.

La programmation de ces équations, introduite dans une calculatrice couplée à une table traçante, permet de calculer et de tracer tous les graphes jugés utiles à l'analyse du système.

Une application, réalisée dans le cas d'une rame du V.A.L. comportant des moteurs série du type GLM 0332, commandés par hacheur, a montré la possibilité d'étudier rapidement les principaux paramètres influençant le temps de parcours, la consommation énergétique, la vitesse maximum possible, l'accélération maximum possible, l'échauffement des moteurs de la rame parcourant une interstation quelconque.

Elle a permis de mettre en évidence plusieurs points importants :



. l'intérêt d'adopter comme profil en élévation de la voie un profil idéal, de placer les rayons de courbure de la voie à l'arrivée ou au départ des stations, ceci, bien entendu dans la mesure où ce choix est libre.

. la grande sensibilité du système aux limitations de tension par le réseau, de courant par le hacheur, et à l'évolution imprévisible des masses transportées.

. l'existence d'optima du taux de shuntage des moteurs et du rapport de transmission, de la vitesse de régime et de la vitesse maximum.

Cette simulation comporte bien entendu, des limites qui sont dûes, soit aux hypothèses émises, soit à la capacité de la calculatrice utilisée.

Nous nous sommes efforcés d'établir un modèle numérique

- . dont la simplicité permette son utilisation rapide et pour un prix modique au niveau d'une préétude du système
- . dont la précision soit cependant suffisante pour que les résultats donnent une très bonne approche de ceux que l'on peut attendre sur le réseau réel.

Pour l'étude préliminaire d'un système de transport à traction électrique automatique, (tel que le V.A.L.), le modèle utilisé permet de contrôler valablement le comportement général d'une rame dans de nombreux cas.

La simulation envisagée présente l'avantage de pouvoir déboucher rapidement :

- . sur une étude paramétrique complète et fine
- . sur des bilans économiques

d'un système complet utilisant plusieurs véhicules en mouvement, à condition de retranscrire le programme sur un ordinateur de plus grande capacité.

ANNEXES

# MOTEUR DE TRACTION TYPE GLM 0332

## MESURES DE LA RESISTANCE DES ENROULEMENTS

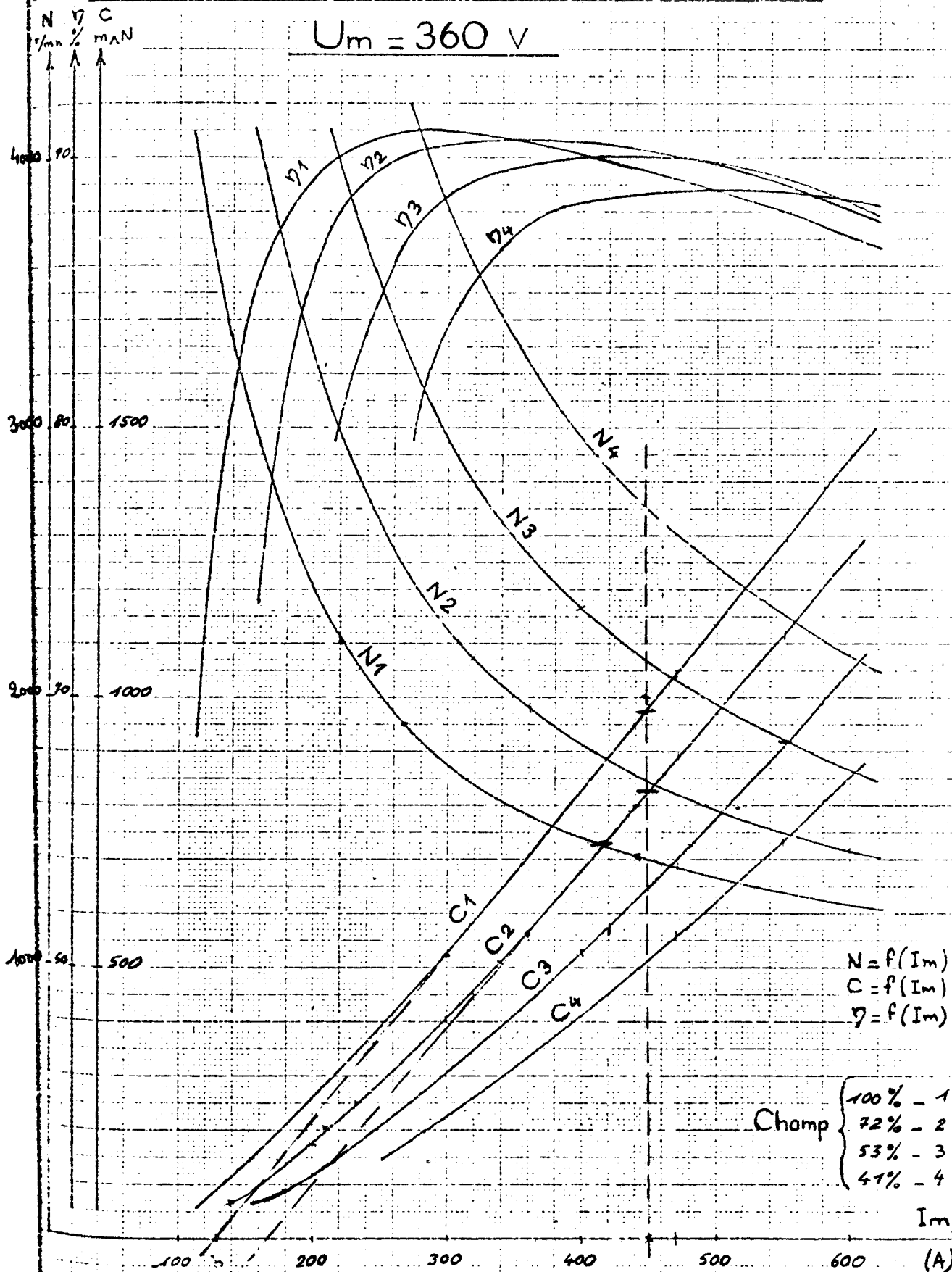
	V	A	R $\Omega$	R moyenne $\Omega$	T° amb. °C	R à 25 °C $\Omega$	R à 110 °C $\Omega$
INDUIT Lames 1 - 17	0,338	30	0,01126				
	0,390	35	0,01120	0,01120	16		
	0,448	40	0,01120				
INDUIT Pas Polaire		0,0112 x 16	29,25 =	0,02048	16	0,0212	0,02815
POLES PRINCIPAUX	0,328	30	0,01095				
	0,38	35	0,01085	0,01086	16	0,01125	0,01493
	0,432	40	0,01080				
POLES AUXILIAIRES	0,26	30	0,08670				
	0,305	35	0,00871	0,00871	16	0,0902	0,01198
	0,35	40	0,00875				
RESISTANCE TOTALE DU MOTEUR (sous les balais)	à 100 % de champ			0,04005	16	0,04148	0,05507
	à 72 % de champ			0,03810	16	0,03946	0,05239
	à 53 % de champ			0,03495	16	0,03620	0,04896
	à 41 % de champ			0,03364	16	0,03484	0,04626



# MOTEUR DE TRACTION TYPE GLM 0332

## CARACTERISTIQUES EN CHARGE

$$U_m = 360 \text{ V}$$



$$N = f(I_m)$$

$$C = f(I_m)$$

$$\eta = f(I_m)$$

Champ  $\left\{ \begin{array}{l} 100\% - 1 \\ 72\% - 2 \\ 53\% - 3 \\ 41\% - 4 \end{array} \right.$

$I_m$

(A)



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## B I B L I O G R A P H I E

- A. (1) R. GABILLARD      Etude préliminaire d'une ligne du métro de Lille. Influence du type de rame et de diagramme sur les vitesses commerciales et les coûts d'exploitation.  
U.S.T.L. 2-74
- A. (2) B. STEINER      Etude économique des véhicules moteurs électriques  
Revue Brown Boveri 10, Oct. 70, tome 57, p.390-397
- A. (3) J.L.KOFFMAN      Determining train performance  
Rail Engineering International, Oct.73, vol.3, nb.8, p.350-353
- A. (4) E.P.A.L.E.      Etude de système pour un moyen de transport en commun discontinu en site propre (V.A.L.)  
Fascicule de synthèse, Janvier 1971
- A. (5) J.P. LESTAMPS      Etude et réalisation d'un pilote automatique destiné à la simulation des fonctions de conduite et de régulation d'un véhicule d'une ligne de transport en site propre  
Thèse Doct.Ing., LILLE, n°156, Mai 1974
- A. (6) Engins MATRA      Rapport de simulation V.A.L.  
Note Q-721, n°508 (réf.S3-1969)
- A. (7) SALOIN      Conclusion de l'étude d'adaptation de différentes solutions de motorisation au métro de LILLE  
Rapport MATRA
- B. Hacheurs. Moteurs à courant continu
- B. (1) F. CAHEN      Electrotechnique  
Tome.3, Machines à courant continu, Ed. GAUTHIER-VILLARS
- B. (2) P.KNAPP      Le régleur de courant continu, organe de commande des véhicules moteurs à courant continu  
Revue Brown Boveri 6/7, Juin-Juillet 70, tome 57, p.252-270
- B. (3) H.LOCKER      Le régleur de courant continu et son application aux trolleybus à commande entièrement électronique  
Revue Brown Boveri, 10, Oct. 70, tome 57, p.419-428
- B. (4) L. LEROY      Application aux engins de traction des régleurs de courant continu du type Hacheurs  
Revue Jeumont-Schneider, n°11, Juin 71, p.57-62

- B. (5) J. DEMOULIN  
F. JONARD  
Equipement de la locomotive électrique CC 20 002 avec un prototype de Hacheur de 4400kw.  
Revue Jeumont-Schnéider, n°14, Déc.72, p.21-42
- B. (6)  
Les hacheurs et leurs applications  
Revue C.E.M., n°82, p.11 à 17
- B. (7)  
Vitesse variable en courant continu  
Revue C.E.M., n°82, p.19 à 24
- B. (8)  
Moteurs de traction pour le métro type série continu  
Revue C.E.M., n°70, p.3-9
- C. Moteurs asynchrones, Cycloconvertisseurs, Onduleurs autonomes
- C. (1) J.P. SIX  
Etude du moteur asynchrone en vue de son utilisation dans les équipements à vitesse variable  
Thèse Doct.Ing., LILLE, 1974
- C. (2) F. CAHEN  
Electrotechnique  
Tome 4, Machines tournantes à courant alternatif  
Ed. Gauthier Villars
- C. (3) J.L. DARGEOU  
Variateurs de vitesse pour moteurs à courant alternatif à bagues  
Revue J.S., n°11, Juin 71, p.13-33
- C. (4) G. PASQUALINI  
Calcul des caractéristiques de fonctionnement d'un moteur asynchrone alimenté par convertisseur  
Revue J.S., n°11, Juin 71, p.34-36
- C. (5) J. FORNASIERI  
G. GIRARDIN  
Dispositifs d'entraînement à vitesse variable avec moteurs asynchrones à cage  
Revue B.B.9, Sept.71, Tome 58, p.407-415
- C. (6) H. LARGIADER  
Quelques aspects du dimensionnement des moteurs asynchrones alimentés par convertisseurs statiques de fréquence pour la traction électrique  
Revue B.B.4, Avril 70, tome 57, p.151-167
- C. (7) A. SCHONUNG  
H. STEMMLER  
Réglage d'un moteur réversible à l'aide d'un convertisseur statique de fréquence commandé suivant le procédé de la sous-oscillation  
Revue B.B. 8/9, 1964, tome 51, p.555-577
- C. (8)  
Alimentation des moteurs asynchrones par onduleurs autonomes fonctionnant suivant le procédé de la sous-oscillation  
I.E.E. Industry and general applications  
Vol. IGA 4, n°3, Mai-Juin 1968  
IGA 4, n°6, Nov.-Déc.1968  
IGA 6, n°6, Nov.-Déc. 1970  
IGA 7, n°4, Juil.-août 1971

- C.(9) E. MULLER  
F. RICKE  
Effet des différentes techniques de commande utilisées dans le procédé de la sous-oscillation sur la tension de sortie de l'onduleur  
Revue B.B. 1-73, p.35-44
- C.(10) H.STEMMLER  
Moteurs triphasés alimentés par convertisseurs statiques avec réglage de vitesse sans pertes  
Revue B.B. Vol.54, n°5/6, 1967
- C.(11) GRAFF  
Etude du moteur asynchrone alimenté à fréquence variable par convertisseur statique à thyristors  
Thèse Doct.Ing., NANCY, 1970
- C.(12) LE DŒUFF  
Application d'un cycloconvertisseur à l'alimentation des machines à induction  
Thèse Doct.Ing., 1971
- C.(13) SEGHERS  
Onduleur autonome triphasé  
Thèse Doct. Ing., LILLE, 1971
- C.(14) ROMBAUT  
Onduleur autonome triphasé à thyristors avec blocage par condensateurs  
Thèse Doct.Ing., LILLE, 1971
- C.(15)  
Variations de vitesse des moteurs à courant alternatif  
Revue C.E.M., n°82, p.25-31
- C.(16)  
Convertisseurs de fréquence  
Revue B.B. Vol.51, n°8/9, 1964
- C.(17)  
Vitesse variable par tension et fréquence variables  
Revue C.E.M., n°72

