

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR INGÉNIEUR

Spécialité Electronique

par

Jean-Pierre LESTAMPS

Ingénieur C.N.A.M.

ÉTUDE 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.



Soutenu le 28 Mai 1974, devant la COMMISSION d'EXAMEN

Membres du Jury :	MM. R. GABILLARD	Président
	F. LOUAGE	Examineur
	G. SALMER	Examineur
	M. FICHEUR	Invité

PROFESSEURS TITULAIRES (suite)

M. TRIDOT Gabriel	Chimie
M. VAILLANT Jean	Mathématiques
M. VIDAL Pierre	Automatique
M. VIVIER Emile	Biologie Animale
M. WERTHEIMER Raymond	Physique
M. ZEYTOUNIAN Radyadour	Mathématiques

PROFESSEURS A TITRE PERSONNEL

M. BOUISSET Simon	Physiologie Animale
M. DELHAYE Michel	Chimie
M. DERCOURT Jean-Michel	Sciences de la Terre
M. LEBRUN André	Electronique (Lille)
M. LEHMANN Daniel	Mathématiques
M. LINDER Robert	Botanique
M. LUCQUIN Michel	Chimie Physique
M. PARREAU Michel	Mathématiques Appliquées
M. SCHILTZ René	Physique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M. BELLET Jean	Physique
M. BILLARD Jean	Physique
M. BODARD Marcel	Botanique
M. BOILLET Pierre	Physique
M. BONNOT Ernest	Biologie
M. BRIDOUX Michel	I.U.T. Béthune
M. CAPURON Alfred	Chimie Minérale
M. DEPREZ Gilbert	I.U.T. Lille
M. DEVRAINNE Pierre	Chimie Minérale
M. GOUDMAND Pierre	Chimie Physique
M. GRUSON Laurent	Mathématiques
M. GUILBAULT Pierre	Biologie
M. LABLACHE-COMBIER Alain	Chimie
M. LACOSTE Louis	Biologie
M. LANDAIS Jean	Chimie
Mme LEHMANN Josiane	Mathématiques
M. LOUCHEUX Claude	Chimie
M. MAES Serge	Physique
Mle MARQUET Simone	Mathématiques
M. MONTEL Marc	Physique
M. MONTUELLE Bernard	I.U.T. Lille
M. PANET Marius	I.E.E.A.
M. SALMER Georges	I.E.E.A.
M. SEGUIER Guy	I.U.T. Béthune

MAITRES DE CONFERENCES (et chargés de fonctions)

M. ADAM Michel	Economie Politique
M. ANDRE Charles	Sciences Economiques
M. ANGRAND Jean-Pierre	Géographie
M. ANTOINE Philippe	Mathématiques
M. AUBIN Thierry	Mathématiques
M. BART André	Biologie

MAITRES DE CONFERENCES (et chargés de fonctions) suite

M. BEGUIN Paul	Mécanique des Fluides
M. BKOUICHE Rudolphe	Mathématiques
M. BOILLY Bénoni	Biologie
M. BONNEMAIN Jean-Louis	Biologie Végétale
M. BOSCOQ Denis	Mathématiques
M. BREZINSKI Claude	I.E.E.A.
M. BRUYELLE Pierre	Géographie et Aménagement Spatial
M. CARREZ Christian	I.E.E.A.
M. CORDONNIER Vincent	Informatique
M. CORTOIS Jean	Physique
M. COQUERY Jean-Louis	Biologie
M. COULON Jean	I.E.E.A.
M ^{lle} DACCHARI Monique	Géographie et Aménagement Spatial
M. DEBOURSE Jean-Pierre	Sciences Economiques et Sociales
M. DEBRABANT Pierre	Sciences Appliquées
M. DELAUNAY Jean-Claude	Sciences Economiques et Sociales
M. DERIEUX Jean-Claude	Biologie (I.U.T.)
M. DOUKHAN Jean-Claude	Physique
M. DRIEUX Baudouin	I.E.E.A.
M. DUEE Gérard	Sciences de la Terre
M. DYMENT Arthur	Mathématiques
M. ESCAIG Bertrand	Physique
M ^{me} EVRARD Micheline	Chimie (I.U.T.)
M. FONTAINE Jacques-Marie	I.U.T. Lille
M. FOURNET Bernard	I.U.T. Lille
M. FROELICH Daniel	Sciences Appliquées
M. GAMBLIN André	Géographie
M. GOBLOT Rémi	Mathématiques
M. GOSSELIN Gabriel	Sociologie
M. GRANELLE Jean-Jacques	Sciences Economiques
M. GUILLAUME Henri	Sciences Economiques et Sociales
M. HECTOR Joseph	S.E.N. Orlais
M. HERMAN Maurice	Physique
M. HUARD DE LA MARRE Pierre	I.E.E.A.
M. JOURNAL Gérard	Sciences Appliquées
M ^{lle} KOSMANN Yvette	Mathématiques
M. KREMBEL Jean	Chimie
M. LAURENT François	Automatique
M ^{lle} LEGRAND Denise	Mathématiques
M ^{lle} LEGRAND Solange	Mathématiques
M. LENTACKER Firmin	Géographie et Aménagement Spatial
M. LEROY Jean-Marie	E.N.S.C.L.
M. LEROY Yves	Electronique (Lille)
M. LHENAFF René	Géographie
M. LOCQUENEUX Robert	Physique
M. LOUAGE Francis	Sciences Appliquées
M. MAHIEU Jean-Marie	Physique (I.U.T. Lille)
M ^{me} MAILLET Monique	Sciences Economiques et Sociales
M. MAIZIERES Christian	I.E.E.A.
M. MALAUSSENA Jean-Louis	Sciences Economiques et Sociales
M. MESSELYN Jean	Physique
M. MIGEON Michel	Chimie (Sciences Appliquées)
M. MOTZKIN Joseph	Mathématiques
M. MONTUELLE Bernard	I.U.T. Lille
M. NICOLE Jacques	Chimie (E.N.S.C.L.)
M. PAQUET Jacques	Sciences Appliquées
M. PARSY Fernand	Mathématiques
M. PECQUE Marcel	Chimie (Béthune)
M. PERROT Pierre	Chimie

MAITRES DE CONFERENCES (et chargés de fonctions) suite

M. PERTUZON Emile	Biologie
M. PONSOLLE Louis	Chimie (Valenciennes)
M. POVY Jean-Claude	Sciences Appliquées
M. RACZY Ladislas	Physique
M. ROGALSKI Marc	Mathématiques
M. ROUSSEAU Jean-Paul	Physiologie Animale
M. ROY Jean-Claude	Biologie
Mme N'GUYEN VAN CHI Régine	Géographie et Aménagement Spatial
M. SIMON Michel	Psychologie
M. SLIWA Henri	Chimie
M. SMET Pierre	Physique
M. SOMME Jean	Géographie
Mle SPIK Geneviève	Chimie Biologique
M. THERY Pierre	Calais
M. TOULOTTE Jean-Marc	Sciences Appliquées
M. TREANTON Jean-René	Sciences Economiques et Sociales
M. VANDORPE Bernard	Chimie Physique
M. VILETTE Michel	Génie Mécanique (Béthune)
M. WERNER Georges	Informatique (I.U.T. Lille)
M. WATERLOT Michel	Géologie
Mme ZINN JUSTIN Nicole	Mathématiques

A ma femme,

A mes enfants,

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

Je lui exprime ma plus profonde gratitude pour les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail.

Messieurs les Professeurs SALMER et LOUAGE ont bien voulu examiner mon travail. Je leur en suis reconnaissant et les en remercie vivement.

Je remercie Monsieur FICHEUR, Directeur des projets techniques de l'E.P.A.L.E. de m'avoir fait l'honneur d'être membre de mon jury.

Je tiens à remercier tous les membres de l'équipe de Radiopropagation et Electronique et plus particulièrement MM. BAUDET, MANGEZ, VERVAEKE, VANBREMEERSCH, DELOOF, pour leur aide précieuse et sympathique.

Mes remerciements s'adressent aussi à tout le personnel technique et administratif du laboratoire, et en particulier à Mme PASQUIER, pour leur collaboration amicale et efficace.

SOMMAIRE

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>1ère PARTIE</u>	
ETUDE DU PILOTE AUTOMATIQUE	3
<u>CHAPITRE. I.</u>	
GENERALITES SUR LE FONCTIONNEMENT DES AUTOMATISMES DE CONDUITE ET DE REGULATION DU V.A.L.	4
<u>CHAPITRE. II.</u>	
ETUDE DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE	7
II.1. Rôle de l'asservissement de vitesse	7
II.2. Etude préliminaire de l'asservissement de vitesse	10
II.2.1. Elaboration de la structure de l'asservissement de vitesse pour obtenir une réponse optimale	12
II.2.2. Simplification de l'asservissement	16
II.2.3. Conclusion	18
II.3. Conséquences sur la réponse en vitesse de la limitation de la puissance des moteurs et du temps de réponse des organes mécaniques et électriques	19
II.3.1. Asservissement d'accélération	19
II.3.1.1. Différents paramètres intervenant dans l'asservissement d'accélération	19
II.3.1.2. Commutation traction - freinage	22
II.3.2. Influence de la caractéristique des moteurs sur l'asservissement de vitesse	23
II.3.2.1. Méthodes d'optimisation de la réponse de l'asservissement de vitesse	30
a) majoration du coefficient "k"	30
b) limitation de la consigne d'accélération	34
c) remplacement du terme d'anticipation k_{yP} par k_{yC}	36
II.3.2.2. Conclusion	43

II.3.3. Influence du temps de réponse de l'asservissement d'accélération	44
II.3.4. Effets conjugués d'un retard pur de l'asservissement d'accélération et de la limitation d'accélération due aux moteurs	49
II.3.4.1. Réponse obtenue avec chacune des 3 méthodes précédentes	49
a) majoration du coefficient "k"	49
b) limitation de la consigne d'accélération	49
c) remplacement du terme d'anticipation k_{yR} par k_{yC}	50
II.4. Conclusion	56
 <u>CHAPITRE. III.</u>	
ETUDE DU DISPOSITIF D'ELABORATION DES CONSIGNES	59
III.1. Consignes en phase d'arrivée en station	61
III.1.1. Différentes phases du mouvement d'un véhicule s'arrêtant en station	61
III.1.2. Processus utilisé pour obtenir l'arrêt d'un véhicule en station	62
III.1.2.1. Vitesse de consigne	62
III.1.2.2. Contrôle de position	63
III.1.3. Elaboration de la vitesse de consigne en phase d'arrêt en station	64
III.1.4. Etude de la précision d'arrêt	69
III.1.4.1. Influence du temps de passage "T _o " entre 2 repères	69
III.1.4.2. Influence de la digitalisation de la consigne d'accélération	69
III.1.4.3. Autres facteurs intervenant sur la précision d'arrêt	71
III.1.5. Remise à zéro de l'accélération et commutation traction - freinage	73
III.1.6. Arrêts en station dégradés	79
III.1.7. Frein de parking	79

III.2. Régulation de la vitesse des véhicules	80
III.2.1. Augmentation de la vitesse de programme	81
III.2.2. Diminution de la vitesse de programme	84
III.2.3. Cas particulier où l'augmentation de V_p est inférieure à $C_1 \gamma \cdot T_0$	86
III.2.4. Limitation de vitesse exceptionnelle	86
III.3. Consignes assurant la régulation de trafic	88
III.3.1. Principe général	88
III.3.2. Disposition des repères le long de la voie	89
III.3.3. Vitesse de consigne appliquée à l'asservissement de vitesse en fonction du retard $R = (N-n)$	91
III.3.3.1. Régulation d'horaire	91
III.3.3.2. Régulation d'intervalle	94
III.4. Résumé de la première partie	97

2ème PARTIE

REALISATION ET PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS AVEC LE SYSTEME DE PILOTAGE PROPOSE	98
<u>CHAPITRE. I.</u>	
REALISATION	99
I.1. Choix de l'option technologique	99
I.2. Remarque	100
<u>CHAPITRE. II.</u>	
PRESENTATION DES RESULTATS POUR CHAQUE FONCTION DE PILOTAGE	101
II.1. Départ en station et conduite en alignement droit	101
II.2. Arrêts en station	103
II.3. Limitation de vitesse	109
<u>CHAPITRE. III.</u>	
ETUDE DU TEMPS DE PARCOURS DES INTERSTATIONS DU V.A.L.	114
<u>CHAPITRE. IV.</u>	
INTERVALLES MINIMUMS EN STATION ET TEMPS DE STATIONNEMENT MAXIMUM	115
<u>CONCLUSION</u>	118

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

Le V.A.L. est un système de transport en commun automatique dont l'étude a été menée initialement pour répondre aux besoins créés par l'implantation de la nouvelle ville de Lille-Est.

Etant donné l'originalité du système recherché, un concours à l'innovation technologique a été lancé par l'E.P.A.L.E. (Etablissement Public d'Aménagement de Lille-Est) auprès des groupes industriels français. Ce concours portait sur un cahier des charges précisant les fonctions à remplir par le système. A la fin de 1971, un jury a retenu les entreprises qui constituent actuellement le groupe projet V.A.L.

En outre à l'Université de Lille, le laboratoire du Professeur GABILLARD, qui, en collaboration avec le bureau d'études S.E.T.E.C. avait assisté l'E.P.A.L.E. pour l'analyse de systèmes, a mis au point une solution originale permettant d'assurer les fonctions d'automatismes du V.A.L.

Nous avons participé à la mise au point de ce procédé breveté⁽¹⁾ par l'E.P.A.L.E. et réalisé plusieurs maquettes⁽²⁾ qui en illustrent le principe.

C'est à partir de cette solution et en collaboration avec l'Université que la Société des Engins MATRA, retenue par l'E.P.A.L.E. en ce qui concerne les automatismes, a développé le système V.A.L.

Ce procédé très simple ne nécessite pas de commande centralisée ni d'équipement électronique ou électromécanique sur la voie à l'exception toutefois des appareils de changement de voie et de leur protection. Le nombre réduit d'informations à transmettre permet d'utiliser des équipements de transmission très simples.

Le travail qui nous a été confié et que nous présentons ici concerne l'étude et la réalisation d'un prototype de pilote automatique assurant les fonctions de conduite et de régulation. Ce pilote permet d'étudier et de prévoir le comportement d'un véhicule en circulation le long de la ligne V.A.L.

La mise au point de ce pilote a nécessité la réalisation d'un banc d'essais (Annexe.1.) simulant les caractéristiques de la voie et du véhicule. Il donne au pilote les informations de passages sur des repères et balises placés le long de la voie servant à établir les consignes d'accélération ou de freinage. D'autre part un ensemble de calcul numérique fonctionnant en temps réel simule la cinématique du véhicule en fonction de sa masse, des caractéristiques des moteurs, des freins et de la pente de la voie.

La première partie de notre mémoire est relative à l'étude théorique du pilote automatique. La seconde partie décrit la réalisation de ce pilote et son utilisation associée au banc d'essais pour en tester les différentes fonctions : déterminer les temps de parcours et l'intervalle minimum entre rames.

1ère PARTIE

ETUDE DU PILOTE AUTOMATIQUE

1. Généralités sur le fonctionnement des automatismes du V.A.L.
2. Etude de l'asservissement de vitesse
3. Etude du dispositif d'élaboration des consignes

CHAPITRE.1.

GENERALITES SUR LE FONCTIONNEMENT DES AUTOMATISMES DE CONDUITE ET DE REGULATION DU V.A.L.

Les fonctions essentielles assurées par le dispositif de pilotage sont :

- . le respect du polygone de vitesse
- . L'arrêt en station en un point précis (tolérance \pm 30cm)
- . La régulation du trafic (régulation d'horaire et intervalle).

Pour chacune de ces 3 fonctions, le dispositif de pilotage élabore une consigne de vitesse. La plus petite consigne est sélectionnée et appliquée à un asservissement donnant par l'intermédiaire d'une électronique de puissance, les ordres d'accélération ou de freinage.

Le principe du pilotage consiste à associer à chaque véhicule réel, un véhicule fictif qui simule les déplacements et les arrêts d'un véhicule idéal suivant rigoureusement son horaire.

Des repères passifs sont placés le long de la voie de telle manière que les segments séparant deux repères successifs soient tous parcourus par le véhicule fictif en un temps constant T_0 . L'espacement des repères est donc ajusté en fonction du programme de marche idéal.

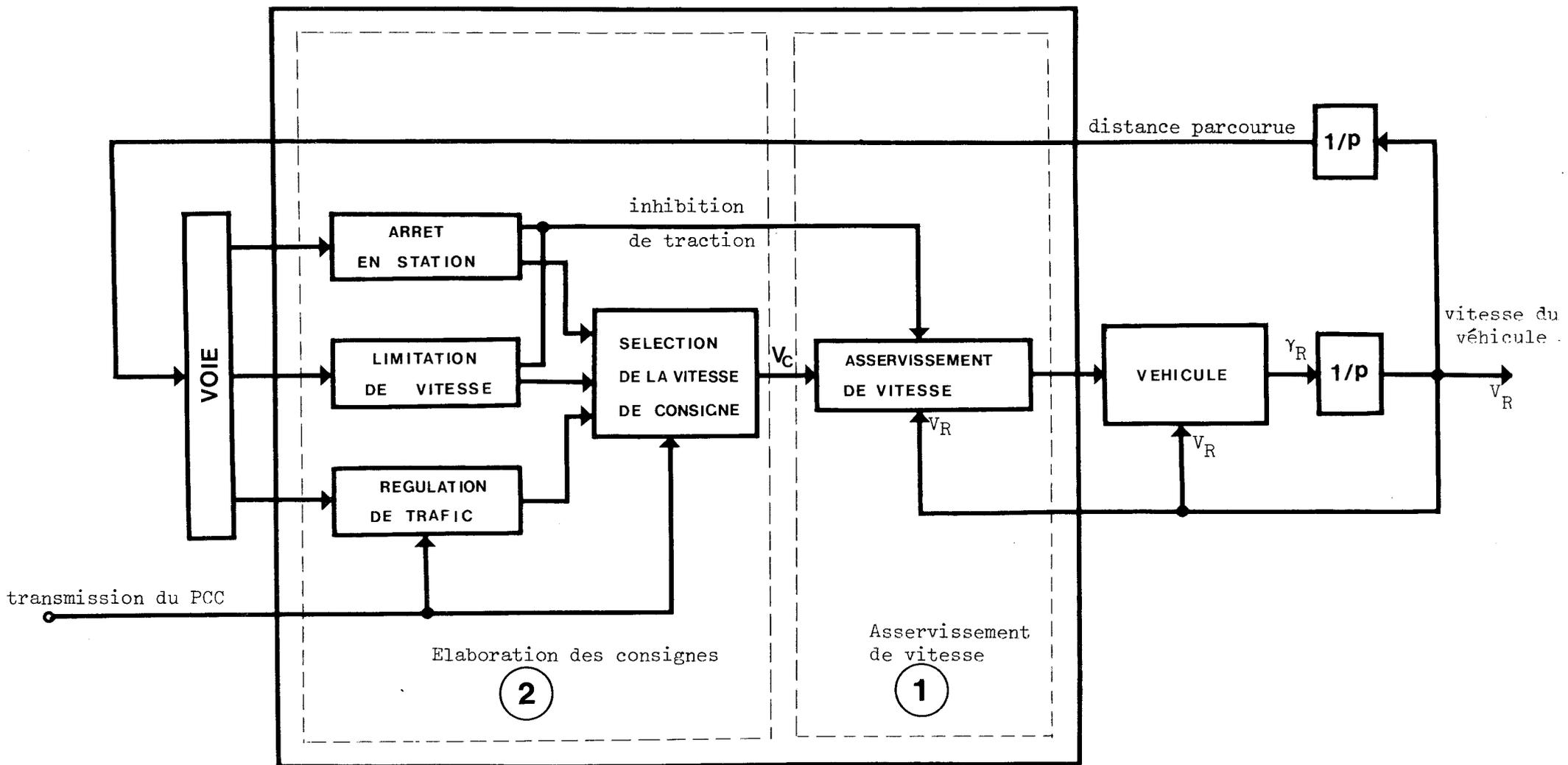
En phase de ralentissement, à l'approche d'un virage ou d'une station ainsi qu'en zone à vitesse limitée, une vitesse de consigne, obtenue par le comptage des repères depuis une balise est appliquée à l'entrée de l'asservissement de vitesse. Cette consigne amène le véhicule à la vitesse correcte permettant de passer d'un repère au suivant en un temps T_0 . Un ralentissement progressif à décélération constante est obtenu en positionnant les repères suivant une progression arithmétique.

D'autre part, le véhicule reçoit par un procédé de télécommunication approprié, des impulsions de périodes T_0 qui proviennent d'une horloge placée dans un poste central de contrôle (P.C.C.). Les impulsions T_0 écoulées depuis son départ du terminus sont comptées par le véhicule sauf pendant le temps d'arrêt prévu à chaque station. En faisant la différence entre le nombre de périodes T_0 et le nombre de repères sur lesquels il est passé, le véhicule détermine exactement son retard par rapport à son horaire théorique. Une vitesse de consigne fonction de cet écart permet d'assurer la régulation de trafic. Un véhicule peut rattraper les retards éventuels en roulant, (sauf en zone de limitation de vitesse), à 80km/h au lieu de 60km/h. Toutefois, si le retard dépasse 120 secondes, le véhicule en avertit le poste central qui arrête l'émission des impulsions T_0 . Les véhicules fictifs s'arrêtent alors instantanément produisant un décalage général de l'horaire ce qui permet au véhicule en retard de se recaler dans le carrousel régulier des rames.

Ce mémoire comprend deux parties principales :

- . La première partie concerne l'étude de l'asservissement de vitesse,
- . La seconde partie est relative à l'étude de l'élaboration des consignes permettant d'assurer avec l'asservissement de vitesse, toutes les fonctions de conduite et de régulation.

A ces deux parties correspondent les deux ensembles principaux de circuits qui constituent le pilote automatique. (figure.1.)



PILOTE AUTOMATIQUE

Figure.1.



CHAPITRE.2.

ETUDE DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE

II.1. RÔLE DE L'ASSERVISSEMENT VITESSE

Le rôle de l'asservissement de vitesse est d'amener le véhicule à la vitesse définie par les consignes en respectant différentes contraintes données par le cahier des charges.

Ces contraintes sont :

- . accélération maximum

$$\gamma_0 = 1,3\text{m/s}^2$$

- . dérivée d'accélération maximum

$$\dot{\gamma}_0 = 0,65\text{m/s}^3$$

L'asservissement de vitesse commande l'effort de traction ou de freinage du véhicule.

Il doit fournir deux informations :

- . un signal en "tout ou rien" sélectionnant le mode traction ou le mode freinage

- . un signal variable permettant de moduler l'effort.

Le système de traction et de freinage du V.A.L. comprend un ensemble de deux moteurs continus placés en série. L'effort de traction est dosé en agissant sur le courant moyen passant dans les moteurs. En freinage ceux-ci travaillent en récupération en débitant dans le réseau. Pour obtenir un effort de freinage assurant une décélération constante quelle que soit la vitesse et la charge du réseau, un système de freinage oléopneumatique fournit l'effort complémentaire.

La commande du passage de traction en freinage ou de freinage en traction ne peut être effectuée que si la commande d'effort du hâcheur est nulle. En outre le passage du mode traction au mode freinage nécessite de changer le schéma de branchement des moteurs sur leurs organes de commande.

Le temps de commutation nécessite un temps variable que l'on majore à une valeur constante τ .

La force de traction ou de freinage est proportionnelle à la commande d'effort du hâcheur. Toutefois à une même commande hâcheur, ne correspond pas toujours la même accélération. En effet, la masse du véhicule, les frottements, la pente de la voie ne sont pas des paramètres fixes.

Par suite, pour respecter les limites d'accélération imposées par le cahier des charges, il est indispensable d'asservir l'accélération du véhicule à une accélération de référence γ_c .

Le schéma général de l'asservissement de vitesse représenté par la figure.2. comprend donc deux boucles d'asservissement : une boucle d'asservissement de vitesse et une boucle d'asservissement d'accélération.

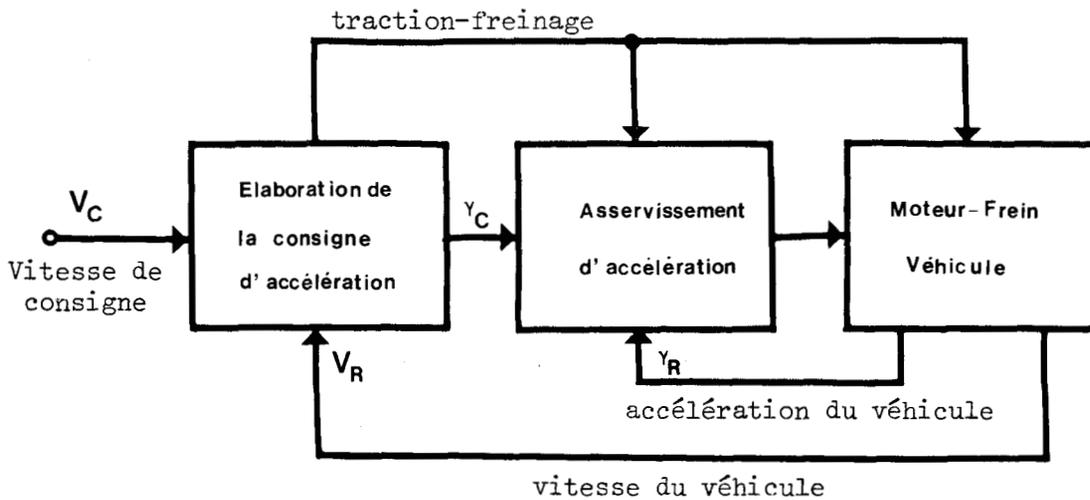


Fig.2.

Nous étudions en premier lieu le dispositif élaborant la consigne d'accélération γ_c en supposant que l'asservissement d'accélération est parfait c'est-à-dire qu'il réalise l'égalité entre la consigne d'accélération et l'accélération réelle du véhicule. Nous supposons d'autre part dans cette étude préliminaire que le temps de commutation traction-freinage est nul.

Dans une seconde partie, nous introduisons l'influence de perturbations telles que le temps de commutation traction-freinage, la limitation de l'accélération aux vitesses élevées dues aux caractéristiques des moteurs et les imperfections de l'asservissement d'accélération.

II.2. ETUDE PRELIMINAIRE DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE

Le cahier des charges impose la limitation de l'accélération à $1,3\text{m/s}^2$ et la dérivée d'accélération à $0,65\text{m/s}^3$.

La réponse de l'asservissement à un échelon de la vitesse de consigne positif comportera donc trois phases principales :

- 1ère phase accélération croissante $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 = 0,65\text{m/s}^3$
- 2ème phase accélération constante $\dot{\gamma} = 0 ; \gamma = \gamma_0 = 1,3\text{m/s}^2$
- 3ème phase accélération décroissante $\dot{\gamma} = -\dot{\gamma}_0 = -0,65\text{m/s}^3$

La vitesse et l'accélération au cours des phases 1 et 3 sont données par les relations suivantes :

1ère phase

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0$$

$$\gamma = \dot{\gamma}_0 t \quad (1)$$

$$V = V_0 + \frac{1}{2} \dot{\gamma}_0 t^2 = V_0 + \frac{1}{2} \frac{\gamma^2}{\dot{\gamma}_0}$$

à la fin de la 1ère phase on a :

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \dot{\gamma}_0 t_1 \\ V_1 &= V_0 + \frac{1}{2} \frac{\gamma_1^2}{\dot{\gamma}_0} \end{aligned} \quad (3)$$

3ème phase

$$\dot{\gamma} = -\dot{\gamma}_0$$

$$\gamma = \gamma_2 - \dot{\gamma}_0 t \quad (2)$$

$$V = V_2 + \gamma_2 t - \frac{1}{2} \dot{\gamma}_0 t^2$$

à la fin de la 3ème phase on a :

$$\begin{aligned} \gamma_3 &= 0 = \gamma_2 - \dot{\gamma}_0 t_3 \\ V_3 &= V_c = V_2 + \frac{1}{2} \frac{\gamma_2^2}{\dot{\gamma}_0} \end{aligned} \quad (4)$$

Pendant la 2ème phase, l'accélération est constante, d'où :

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \gamma_2 \\ (V_1 - V_0) &= (V_3 - V_2) = \frac{\gamma_1^2}{2 \dot{\gamma}_0} \end{aligned} \quad (5)$$

La valeur maximale de γ_1 est $\gamma_0 = 1,3m/s^2$, la phase à accélération constante n'existe pas si :

$$V_c < (V_1 - V_0) + (V_3 - V_2) = \frac{\gamma_0^2}{\dot{\gamma}_0} \quad (6)$$

A partir des relations précédentes, on détermine la valeur de commande de la dérivée de l'accélération en fonction de la vitesse de consigne, de la vitesse réelle, et de l'accélération réelle du véhicule :

$$\dot{\gamma} = +\dot{\gamma}_0 \text{ pour } \gamma < \gamma_0 \text{ et } V < \left[V_c - \frac{\gamma|\gamma|}{2\dot{\gamma}_0} \right] \quad (7)$$

$$\dot{\gamma} = -\dot{\gamma}_0 \text{ pour } \gamma > -\gamma_0 \text{ et } V > \left[V_c - \frac{\gamma|\gamma|}{2\dot{\gamma}_0} \right] \quad (8)$$

$\dot{\gamma} = 0$ dans tous les autres cas

La figure.3. représente la vitesse, l'accélération et la dérivée d'accélération pour différents échelons de la vitesse de consigne.

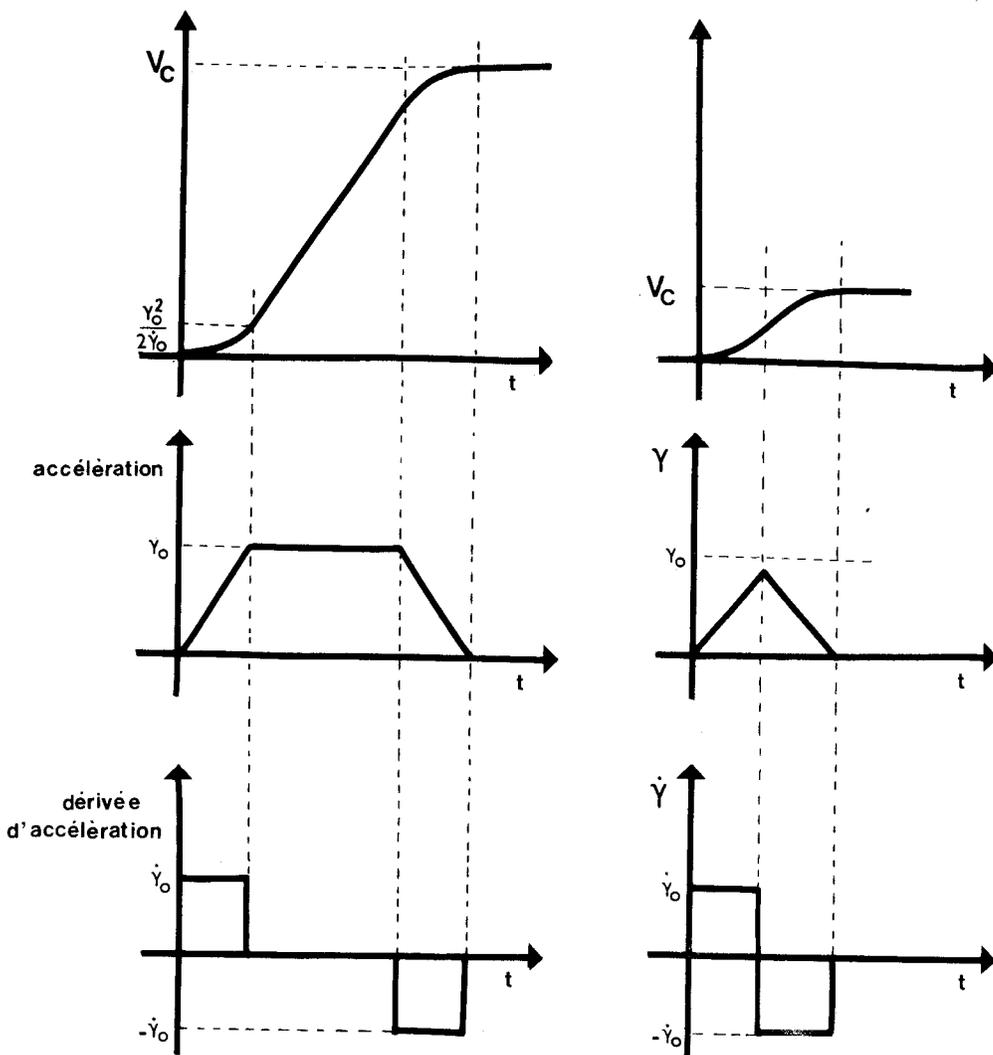


Figure.3.

II.2.1. Elaboration de la structure de l'asservissement de vitesse pour obtenir une réponse optimale

La réponse optimale de l'asservissement à un échelon de vitesse est obtenue si l'on respecte strictement les relations (7) et (8) définies précédemment. Ces relations montrent qu'il est facile d'élaborer une consigne d'accélération en comparant la vitesse de consigne avec la vitesse du véhicule anticipée d'une valeur proportionnelle au carré de l'accélération : $\alpha \gamma^2$ signe de γ

$$\text{avec } \alpha = \frac{1}{2 \dot{\gamma}_0} \quad (9)$$

L'asservissement peut être représenté par le schéma simplifié de la figure.4.

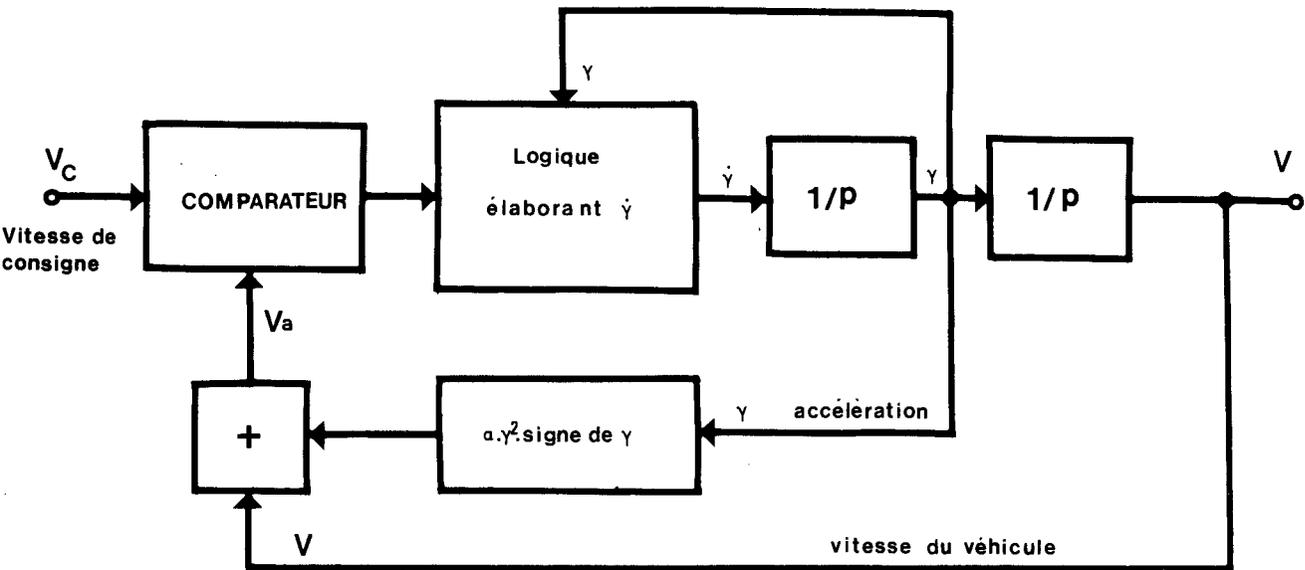


Figure.4.

avec $\dot{\gamma} = + \dot{\gamma}_0$ pour $V_c > V_a$ (10)

$\dot{\gamma} = - \dot{\gamma}_0$ pour $V_c < V_a$ (11)

$\dot{\gamma} = 0$ pour $V_c = V_a$ (12)

Tant que $|\gamma|$ reste inférieur à γ_0 , l'équation de l'asservissement est donnée par la relation suivante :

$$\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_0 (\text{signe}) [(V - V_c) + \alpha\gamma^2 (\text{signe } \gamma)] = 0 \quad (13)$$

Il est intéressant de tracer les trajectoires de phases $\gamma = f(V - V_c)$ pour différentes valeurs de la vitesse de consigne.

Tant que $\gamma < \gamma_0$ on peut écrire :

$$\frac{d\gamma}{dv} = \frac{d\gamma}{dt} \cdot \frac{dt}{dv}$$

$$\frac{d\gamma}{dv} = \frac{\dot{\gamma}_0}{\gamma}$$

$$\gamma d\gamma = \dot{\gamma}_0 \cdot dv$$

$$\text{soit : } \gamma^2 = 2 \dot{\gamma}_0 v \quad (14)$$

Si v_i et γ_i représentent le point initial, l'équation des trajectoires est de la forme :

$$(\gamma^2 - \gamma_i^2) = 2 \dot{\gamma}_0 (v - v_i) \quad (15)$$

Les trajectoires sont des paraboles d'équations paramétriques :

$$\gamma = \dot{\gamma}_0 t + \gamma_i \quad v = \frac{\dot{\gamma}_0}{2} t^2 + \gamma_i t + v_i \quad (16)$$

lorsque γ atteint γ_0 l'équation se réduit à :

$$\gamma = \gamma_0 = \text{cte} \quad \text{et} \quad v = \gamma_0 t + v_i \quad (17)$$

L'équation de la courbe de commutation, c'est-à-dire le lieu du plan de phase ou la dérivée d'accélération change de signe, est donnée par la relation :

$$(V - V_c) + \alpha\gamma^2 \text{ signe de } \gamma = 0 \quad (18)$$

La réponse est optimale, quelque soit l'échelon de vitesse appliqué à l'entrée de l'asservissement, lorsque le lieu de commutation est identique à la loi d'évolution de la vitesse en fonction de l'accélération, ce qui est vérifié lorsque :

$$\alpha = \frac{1}{2\dot{\gamma}_0} \quad (19)$$

Le plan de phase de la figure.5. montre que la réponse de l'asservissement reste bien optimale quelque soit l'échelon de vitesse. Cependant la réalisation de la fonction [$\alpha \gamma^2$ signe de γ] peut entraîner quelques complications technologiques. Nous allons montrer qu'il est possible d'éviter ces complications en choisissant une solution simplifiée qui donne néanmoins une réponse quasi optimale.

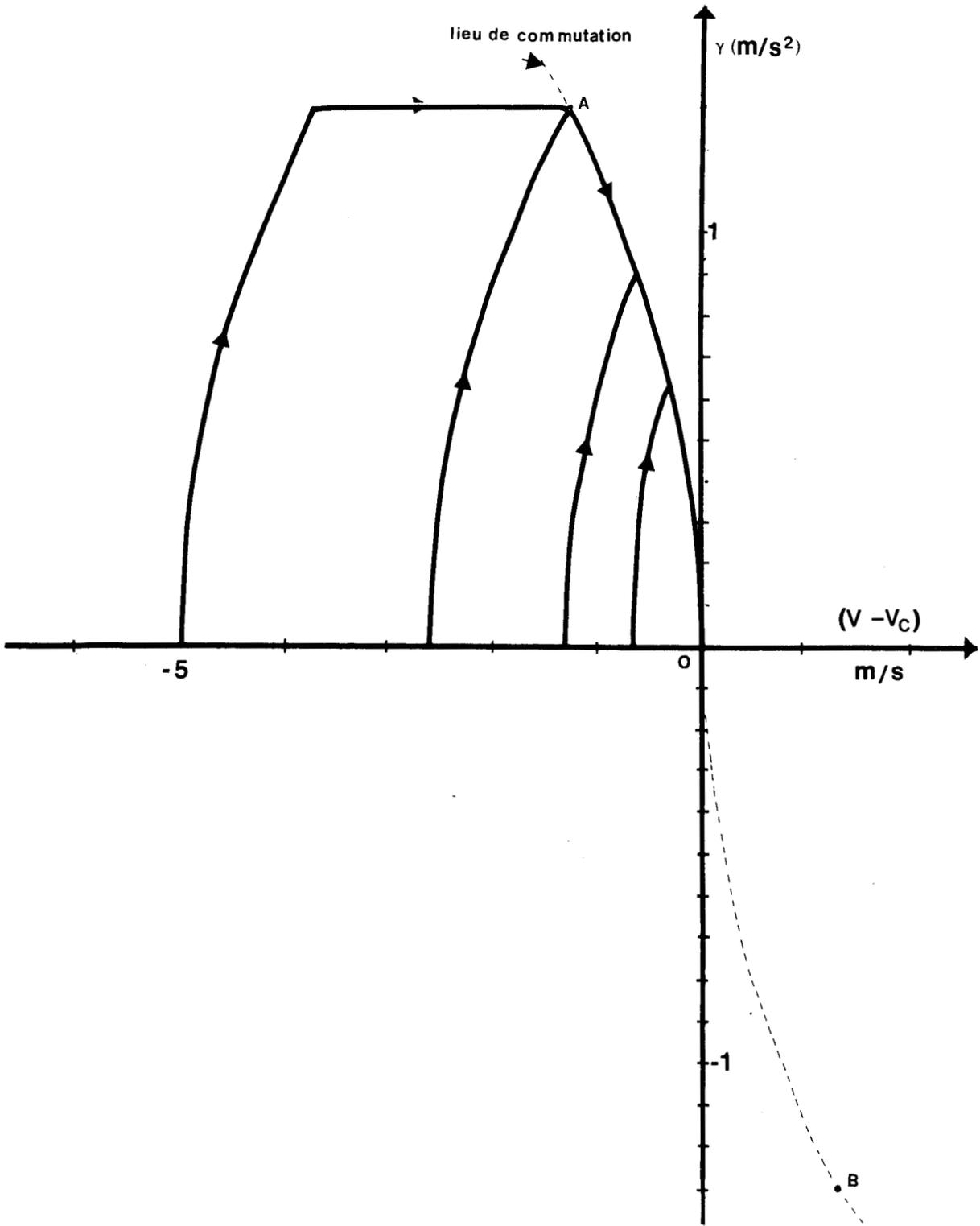


Figure.5.



II.2.2. Simplification de l'asservissement

En vue de faciliter la réalisation de l'asservissement de vitesse, nous proposons de remplacer le terme d'anticipation de la vitesse :

$$\frac{\gamma^2}{2\dot{\gamma}_0} \text{ (signe } \gamma) \text{ par la fonction } k\gamma \text{ avec } k = \frac{\gamma_0}{2\dot{\gamma}_0} = \text{Cte}$$

La valeur de l'accélération maximum étant égale à γ_0 , la dernière fonction est une majorante de la précédente.

Dans le plan de phase, le lieu de commutation est alors une droite d'équation (figure.6.) :

$$\gamma = -\frac{1}{k} (V - V_c) \text{ avec } k = \frac{\gamma_0}{2\dot{\gamma}_0} \quad (20)$$

La réponse de cet asservissement est identique si l'on rencontre la droite de commutation aux points A, O et B (figure.6.) puisque ces points sont communs aux deux lieux de commutation.

Toutefois lorsque la pente de la tangente à la trajectoire $\gamma = f(V - V_c)$ immédiatement après la commutation est en valeur absolue supérieure à la pente de la droite de commutation, la trajectoire ne traverse pas la droite de commutation et le point figuratif décrit la droite de commutation. Dans ces conditions on dit qu'il y a régime glissant⁽³⁾ pour le système. La trajectoire aboutit alors au point $\gamma = 0$ et $V = V_c$ en suivant la droite de commutation. La relation entre l'accélération " γ " et la vitesse " V " est alors de la forme :

$$\frac{dv}{dt} = \gamma = -\frac{1}{k} v \text{ avec } k = \frac{\gamma_0}{2\dot{\gamma}_0} \quad (21)$$

L'évolution de la vitesse et de l'accélération en fonction du temps suit donc une loi exponentielle de constante de temps $k = \frac{\gamma_0}{2\dot{\gamma}_0}$.

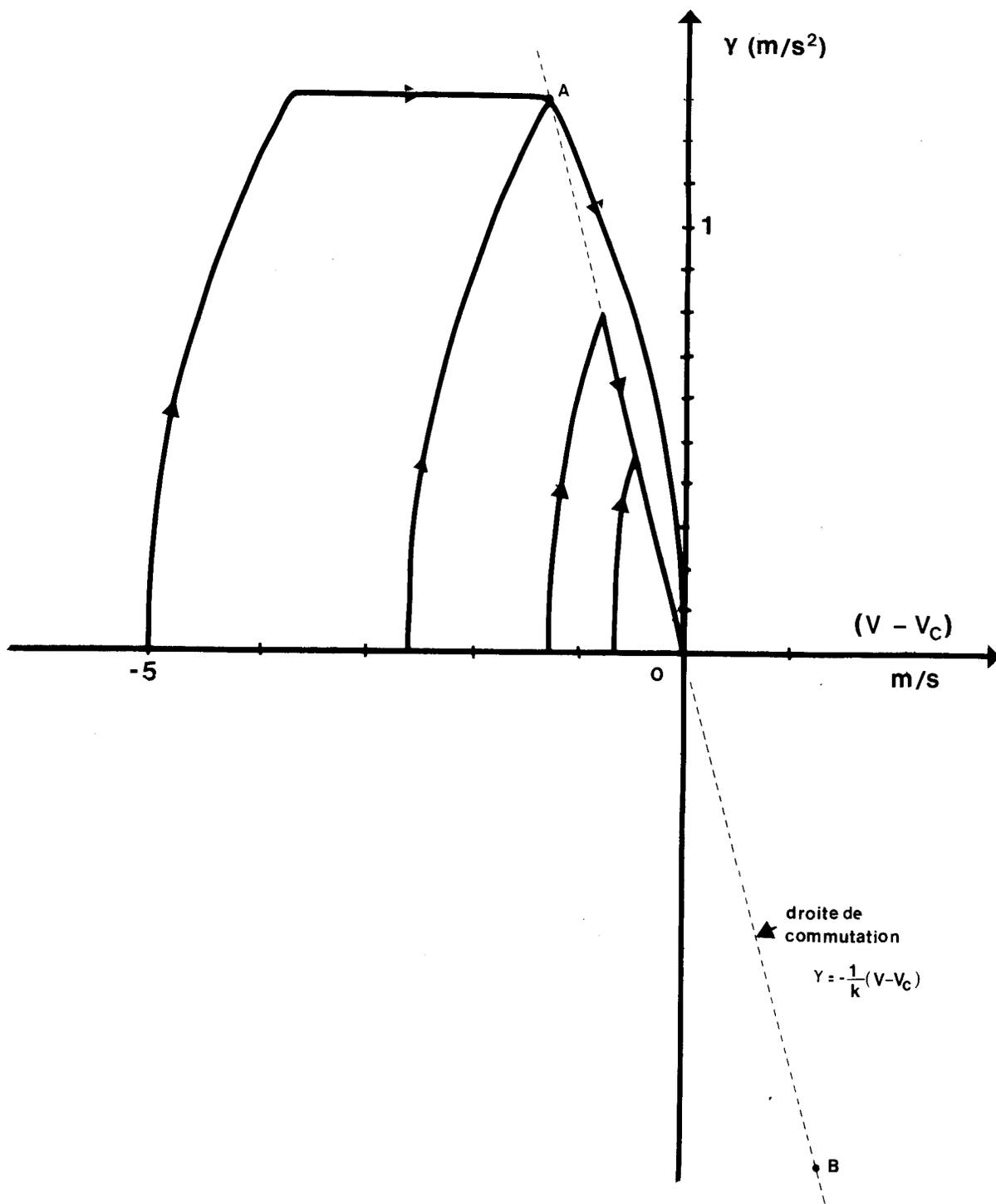


Figure.6.



II.2.3. Conclusion

La simplification envisagée entraîne une légère augmentation du temps de réponse de l'asservissement pour des échelons de vitesse de consigne inférieur à $\gamma_0^2 / \dot{\gamma}_0$, mais présente l'avantage de simplifier la réalisation technologique du pilote automatique en remplaçant la fonction quadratique $\alpha\gamma^2$ signe de γ par la fonction linéaire $k\gamma$.

Nous donnons figure.7., le schéma synoptique de l'asservissement simplifié.

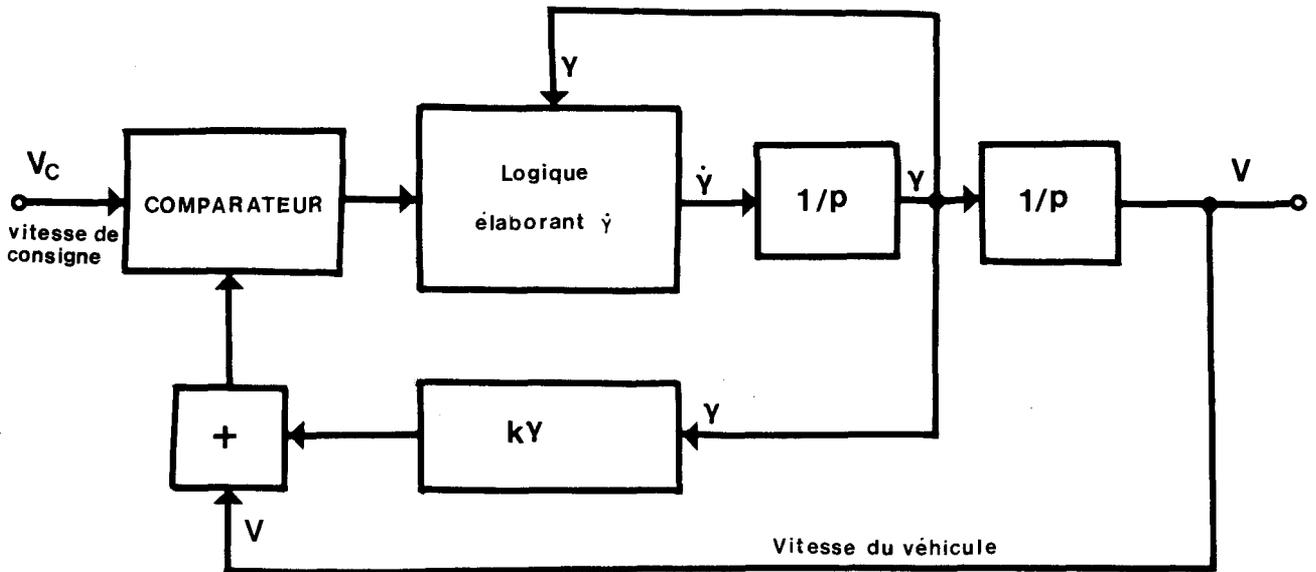


Figure.7.

II.3. CONSEQUENCES SUR LA REPOSE EN VITESSE DE LA LIMITATION DE LA PUISSANCE DES MOTEURS ET DU TEMPS DE REPOSE DES ORGANES MECANIQUES ET ELECTRIQUES

L'étude analytique de l'influence des paramètres décrivant les caractéristiques propres du matériel de traction est très complexe. Nous avons mis au point un programme de calcul numérique (Annexe.2.) simulant le fonctionnement de l'asservissement compte tenu de l'influence de ces différents paramètres. Ce programme a pour but de faciliter la conception des dispositifs de correction et d'optimiser les réglages afin d'obtenir rapidement des valeurs numériques satisfaisantes pour la réalisation technique.

Cette méthode nous a permis d'éviter un processus de mise au point par essais et retouches successives.

II.3.1. Asservissement d'accélération

II.3.1.1. Différents paramètres intervenant dans l'asservissement d'accélération

La figure.8. donne un schéma général montrant les différents paramètres intervenant dans cet asservissement. La signification des paramètres est donnée ci-dessous :

- γ_c = consigne d'accélération
- γ_R = accélération du véhicule
- V_R = vitesse du véhicule
- EET = effort électrique de traction
- EEF = effort électrique de freinage
- EPF = effort pneumatique de freinage
- E_R = effort résistant
- M = masse du véhicule
- p = pente de la voie
- g = accélération de la pesanteur

Niveau logique 1 ou 0

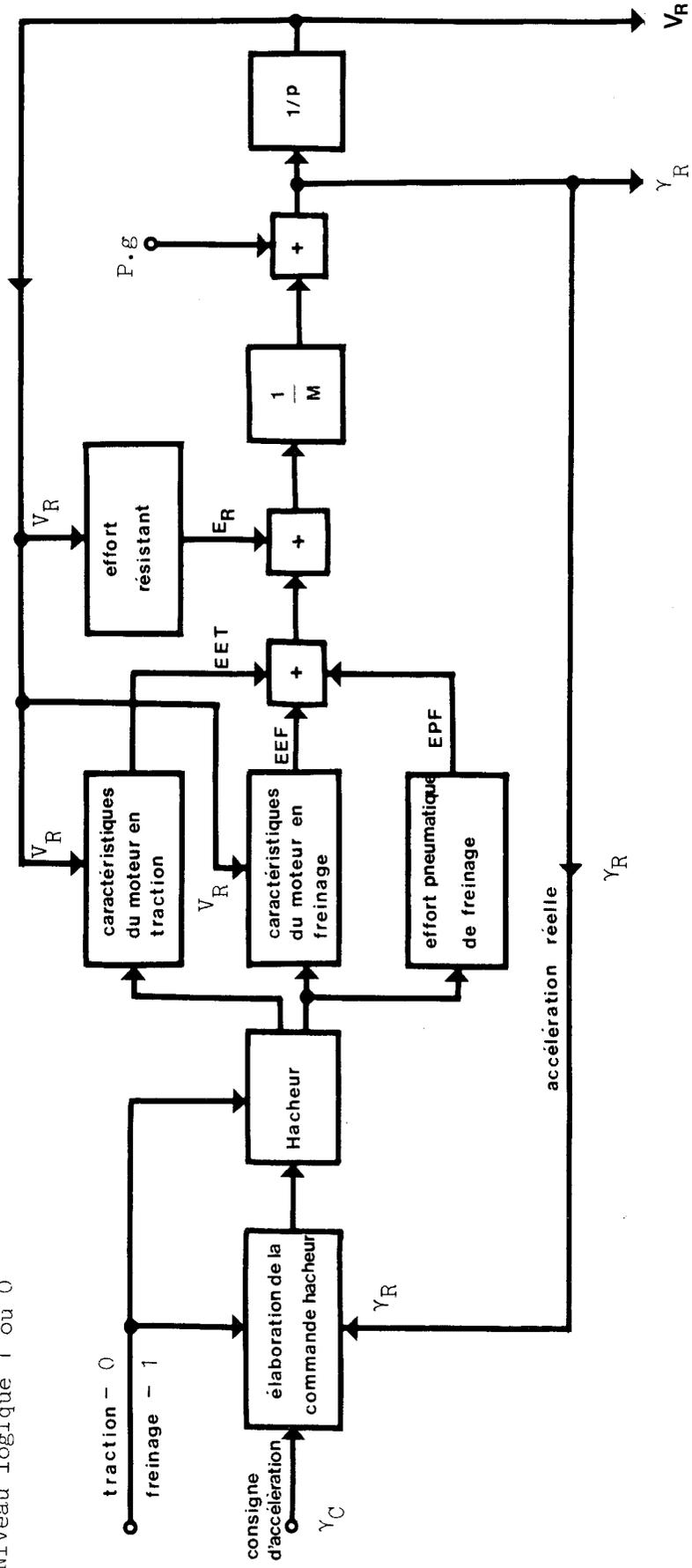


Figure. 8.

ASSERVISSEMENT D'ACCELERATION



L'étude de l'asservissement d'accélération est classique, nous n'en donnons pas le détail et nous admettons qu'il donne les résultats suivants :

a) en traction

$$\begin{aligned} \gamma_R &= \gamma_C \quad \text{tant que } \gamma_C \leq \gamma_{MM} \\ \text{et} \quad \gamma_R &= \gamma_{MM} \quad \text{pour } \gamma_C > \gamma_{MM} \end{aligned}$$

γ_{MM} est l'accélération maximum possible du véhicule (fonction des caractéristiques des moteurs, de la vitesse, de la pente de la voie, de la masse du véhicule, etc ...).

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{MM} = \left[(EET_{\max})_{(v)} + E_{R(v)} \right] \frac{1}{M} + P_g \quad (22)$$

$(EET_{\max})_{(v)}$ est l'effort électrique de traction pour la vitesse considérée.

b) en phase de commutation traction - freinage ou freinage - traction

$$\gamma_R = [E_R] \frac{1}{M} + P_g \quad (23)$$

c) en phase de freinage

Le freinage électrique associé au freinage oléopneumatique permet d'obtenir un effort de freinage constant quelle que soit la vitesse.

La valeur minimale de la décélération dépend de l'effort résistant :

$$\gamma_R = [E_R] \frac{1}{M} + P_g \quad \text{tant que } |\gamma_C| < [E_R] \frac{1}{M} + P_g \quad (24)$$

$$\gamma_R = \gamma_C \quad \text{pour } |\gamma_C| > [E_R] \frac{1}{M} + P_g \quad (25)$$

L'asservissement ne peut donner instantanément $\gamma_R = \gamma_C$. Pour simuler le temps de réponse de l'asservissement, nous introduisons un retard entre γ_R et γ_C .

II.3.1.2. Commutation traction-freinage

Le passage de traction en freinage ou de freinage en traction s'effectue au changement de signe de la consigne d'accélération. Pour respecter la limitation du maximum de la dérivée d'accélération, la consigne d'accélération doit rester nulle pendant la phase de commutation.

Afin de ne pas avoir de commutation traction - freinage intempestive, il est indispensable que le comparateur donne l'information "égal" non pour l'égalité stricte entre V_c et $(V_R+k\gamma)$ mais pour une fourchette de vitesse " ΔV " autour de cette égalité. (figure.9.)

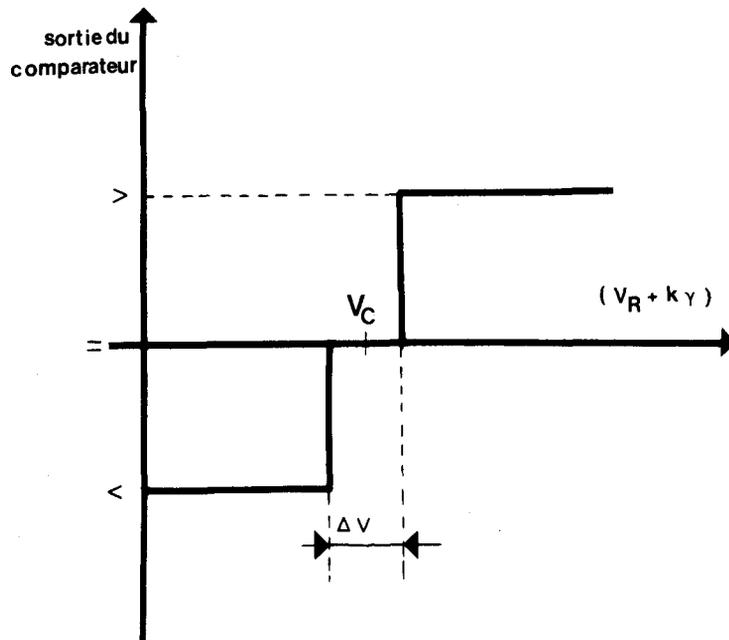
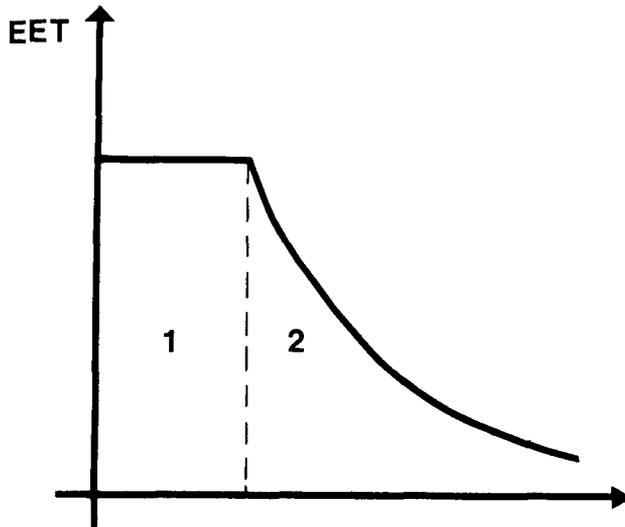


Figure.9.

La largeur de cette fourchette " ΔV " sera choisie en fonction de l'option technologique retenue et du niveau de bruit sur la mesure de la vitesse et de l'accélération.

11.3.2. Influence de la caractéristique des moteurs sur l'asservissement de vitesse

La caractéristique donnant l'effort de traction en fonction de la vitesse a l'allure suivante : (fig.10.)



Cette caractéristique comprend :

1. un palier correspondant à un courant maximum délivré par le hâcheur.
2. une caractéristique intrinsèque d'équation approchée :

$$EET = E_0 \left(\frac{1}{1 + V/V_0} \right)^2 \quad (26)$$

EET : effort électrique de traction

Figure.10.

l'accélération du véhicule en fonction de la vitesse est de la forme :

$$\gamma_R = \left[(EET)_{(v)} - E_{R(v)} \right] \frac{1}{M} + Pg \quad (27)$$

$E_{R(v)}$ = effort résistant

M = masse du véhicule

P = pente de la voie

g = accélération de la pesanteur

Pour les véhicules prototypes du V.A.L. équipés des moteurs C.E.M. type GIM 332 (shuntés à 78%) la formule (26) s'écrit avec les valeurs numériques suivantes :

$$(EE_T \text{ max}) = \left[\frac{364 \cdot 10^4}{(1,5+V)^2} \right] \text{ limité à 25 000 Newton} \quad (28)$$

L'effort résistant comprend 3 composantes :

1. un frottement sec existant à faible vitesse
2. un effort constant
3. les efforts aérodynamiques proportionnels au carré de la vitesse

Pour les prototypes du V.A.L. ces composantes donnent pour l'effort résistant par la formule numérique suivante :

$$(E_R) = p [1450 - 360V] + 1550 + 2,98V^2 \text{ Newton} \quad (29)$$

p = partie positive.

La figure.11. donne les valeurs numériques de l'accélération maximum du véhicule en fonction de la vitesse, de la masse et de la pente de la voie.

Le point de cassure de la caractéristique donne la vitesse à laquelle l'accélération devient inférieure à la valeur nominale $\gamma_0 = 1,3m/s^2$.

Nous appelons $V_{1,3}$ la valeur de cette vitesse.

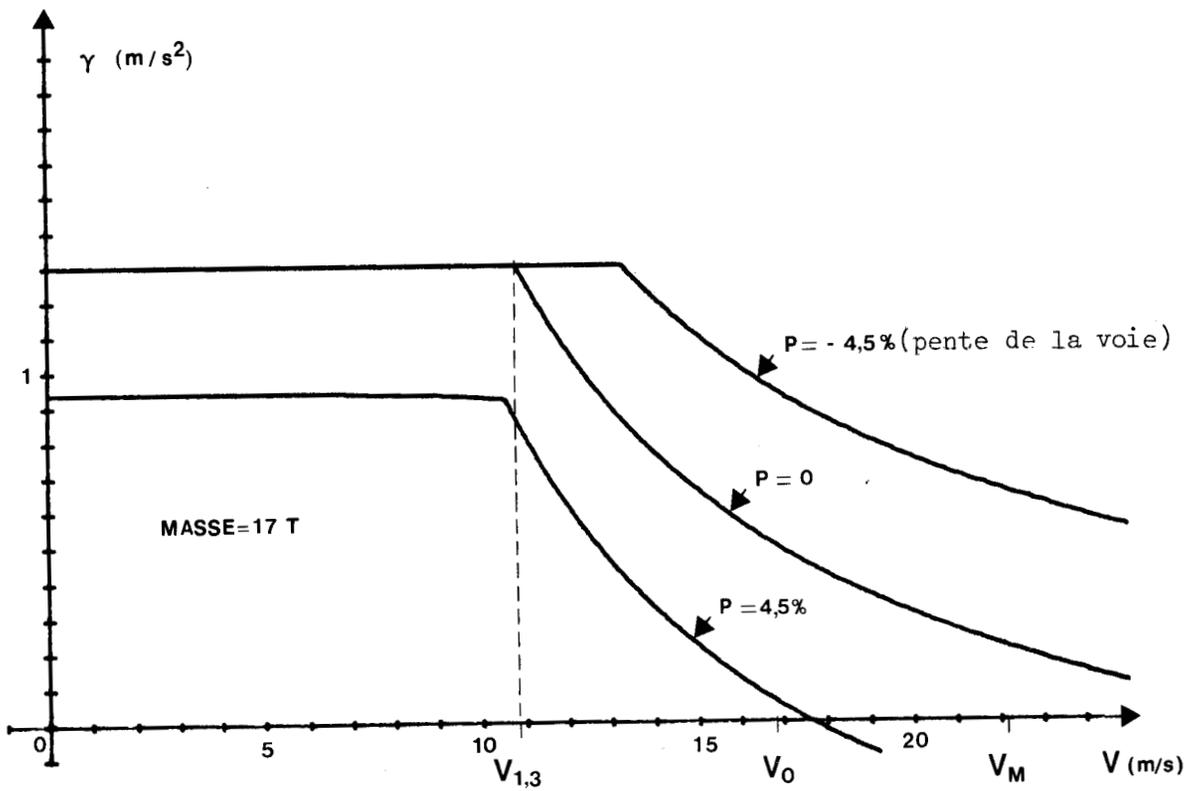
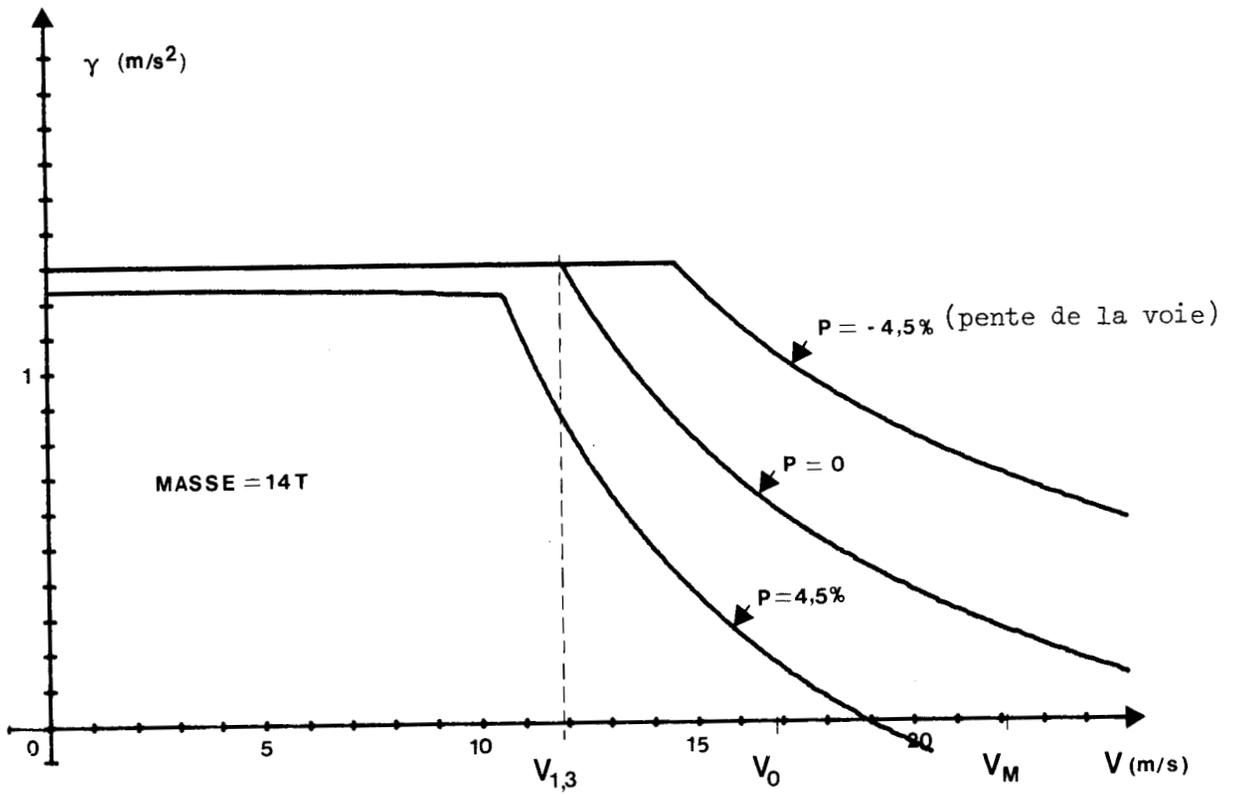


Figure.11.



La planche.1. obtenue par simulation numérique donne la réponse de l'asservissement à un échelon de vitesse :

- . la courbe A correspond à la caractéristique du moteur représenté sur la figure.11. pour une masse du véhicule de 14 tonnes et avec une pente de la voie nulle.
- . la courbe B correspondrait à un moteur idéal donnant une accélération γ_0 jusque la vitesse maximale.

Dans le cas d'un moteur réel où l'accélération est limitée, on peut mettre en évidence 4 phases :

- 1) la consigne d'accélération et l'accélération du véhicule augmentent jusque $\gamma = \gamma_0$ et restent constantes tant que $V < V_{(1,3)}$
- 2) l'accélération du véhicule diminue lorsque la vitesse est supérieure à $V_{1,3}$. Cette diminution de l'accélération correspond à la limitation de puissance des moteurs.

Tant que :

$$(V_R + k\gamma_R) < V_c$$

l'accélération du véhicule est donnée par la relation

$$\gamma_R = \left[(EE_{T(v)} + E_{R(v)}) \right] \frac{1}{M} + pg \quad (30)$$

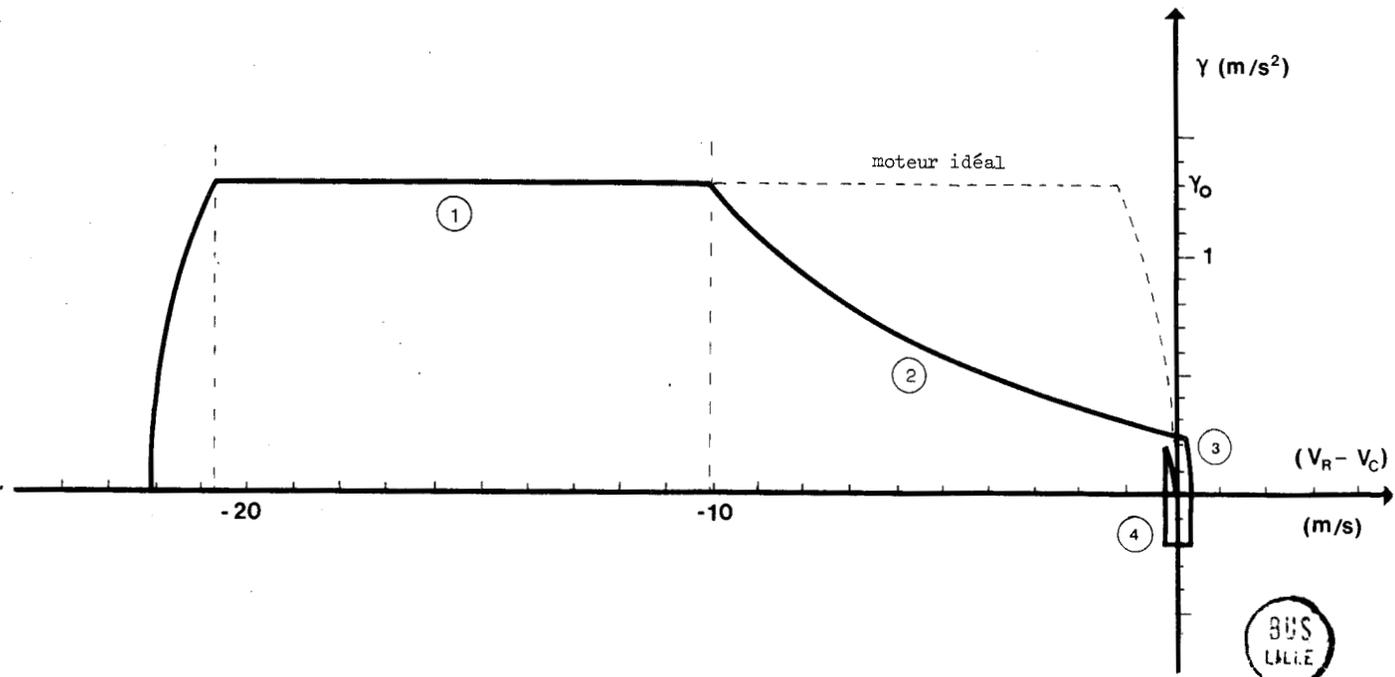
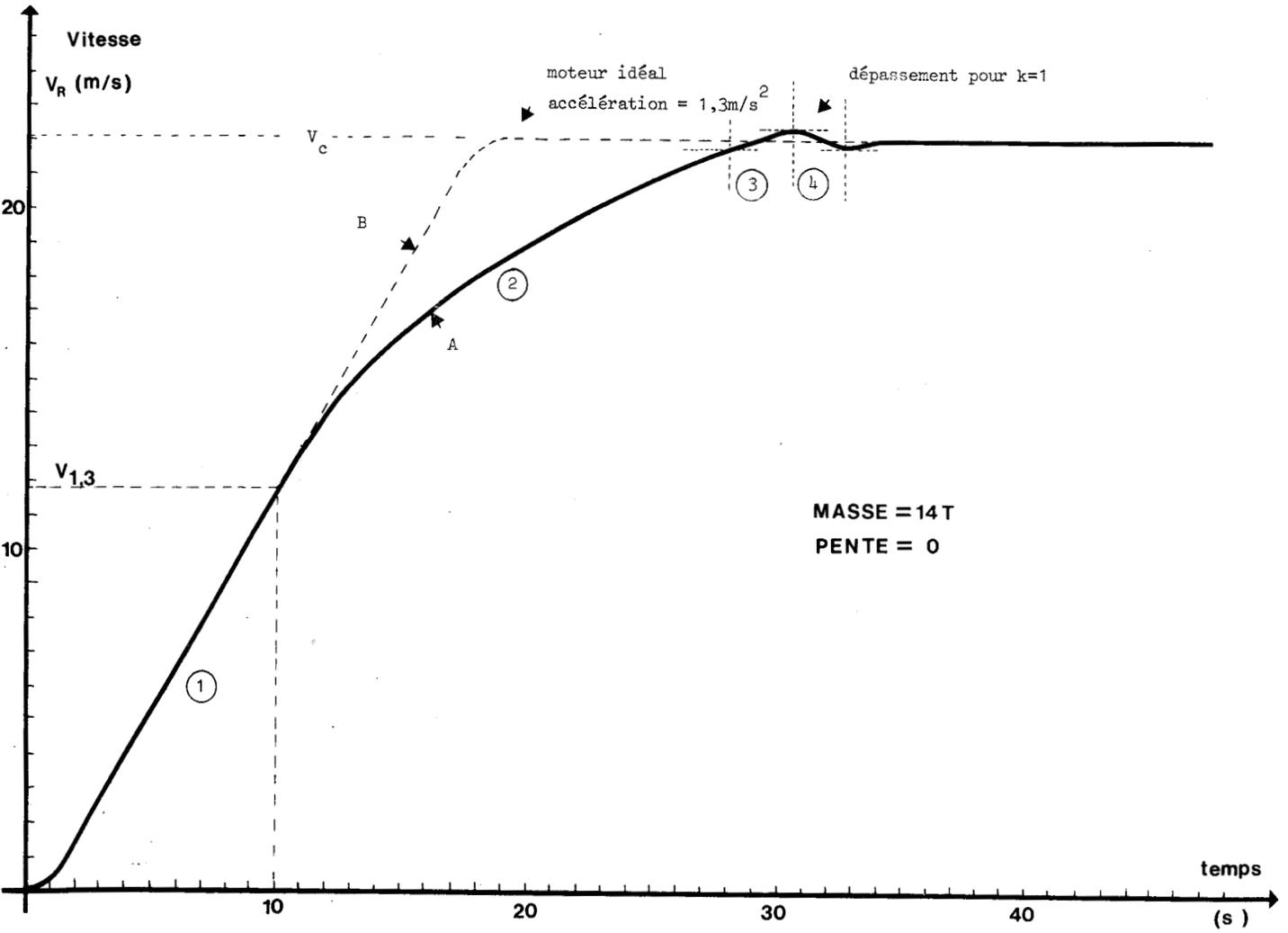
- 3) $(V_R + k\gamma_R)$ atteint la valeur de la vitesse de consigne V_c .

A cet instant :

$$\gamma_c = \gamma_0 > \gamma_R$$

L'asservissement d'accélération est donc en butée et la vitesse du véhicule continue de croître. On a donc :

$$(V_R + k\gamma_R) > V_c$$



LIMITATION DUE A LA CARACTERISTIQUE DU MOTEUR



Ceci entraîne une diminution de la consigne d'accélération.

L'accélération réelle du véhicule γ_R qui était inférieure à γ_C ne commence donc à décroître que lorsque $\gamma_C < \gamma_R$. Ce retard entraîne un dépassement de la vitesse du véhicule par rapport à la vitesse de consigne.

- 4) Ce dépassement entraîne une commutation traction-freinage puis freinage-traction et la vitesse atteint enfin la vitesse de consigne. La planche 2 montre qu'il y a un dépassement de vitesse dans tous les cas où l'échelon de la vitesse de consigne est supérieur à $V_{1,3}$.

Pour ne pas avoir de dépassement, il faut que l'accélération du véhicule puisse décroître immédiatement lorsque la relation suivante est satisfaite :

$$V_C < (V_R + k\gamma_R) \quad (31)$$

Pour satisfaire cette condition et ainsi éviter le dépassement de vitesse et la commutation traction-freinage, nous avons envisagé 3 méthodes :

1. Majoration du coefficient "k"
2. Limitation de la consigne d'accélération γ_C à une valeur proche de l'accélération maximale γ_{MM} qui tient compte des possibilités limites des moteurs.
3. Remplacement du terme d'anticipation de la vitesse du véhicule $k\gamma_R$ par $k\gamma_C$

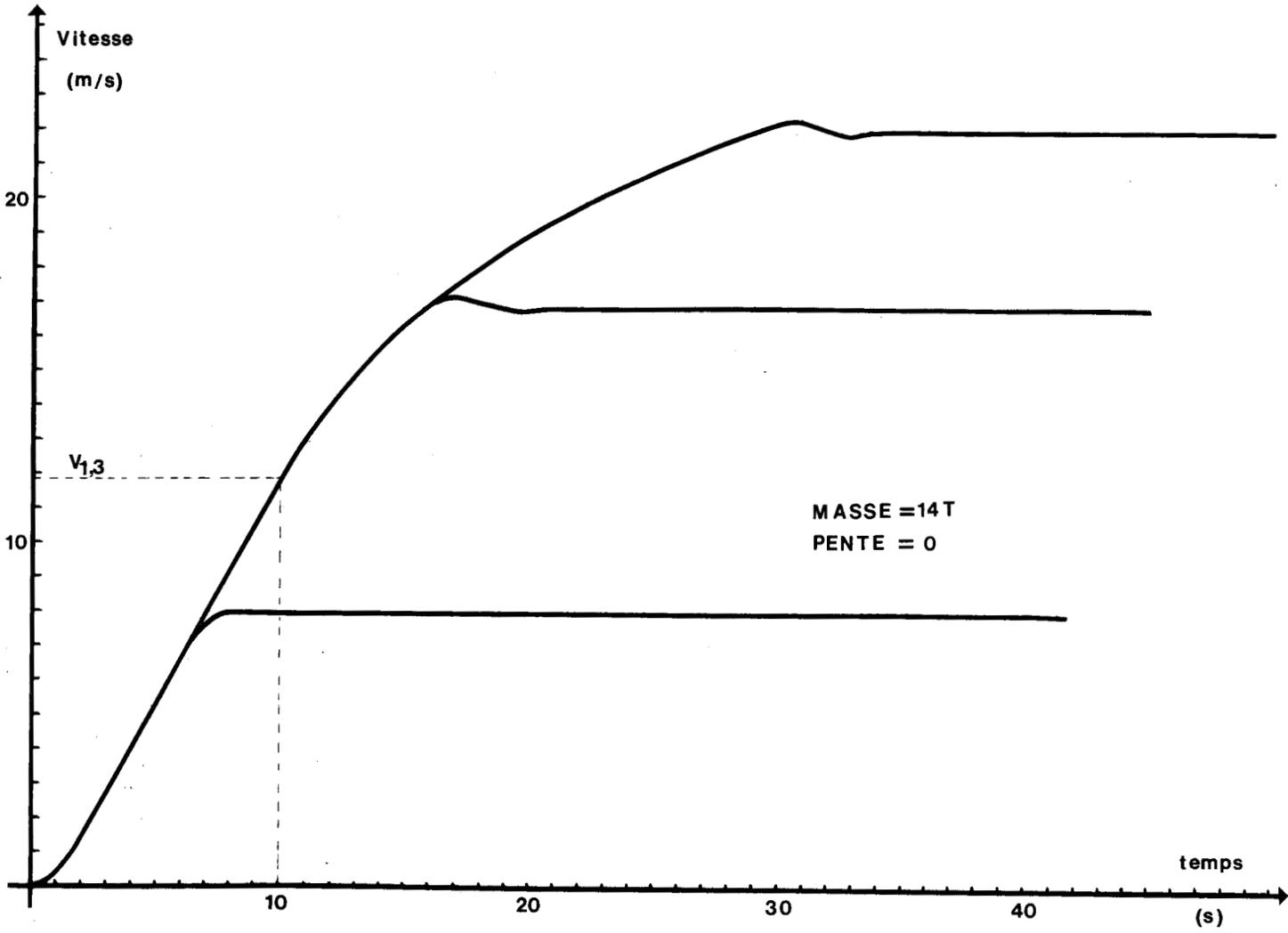


PLANCHE. 2.



II.3.2.1. Méthodes d'optimisation de la réponse de l'asservissement de vitesse

a) 1ère méthode : majoration du coefficient "k"

Compte tenu de la limitation de puissance des moteurs, la figure.12. donne les évolutions optimales de l'accélération et de la vitesse en fonction du temps.

La consigne d'accélération et l'accélération réelle doivent s'annuler à l'instant précis "t₀" où la vitesse réelle atteint la vitesse de consigne. Cela implique que la consigne d'accélération γ_c commence à décroître à partir de l'instant t₂ défini par la relation :

$$t_2 = t_0 - \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0}$$

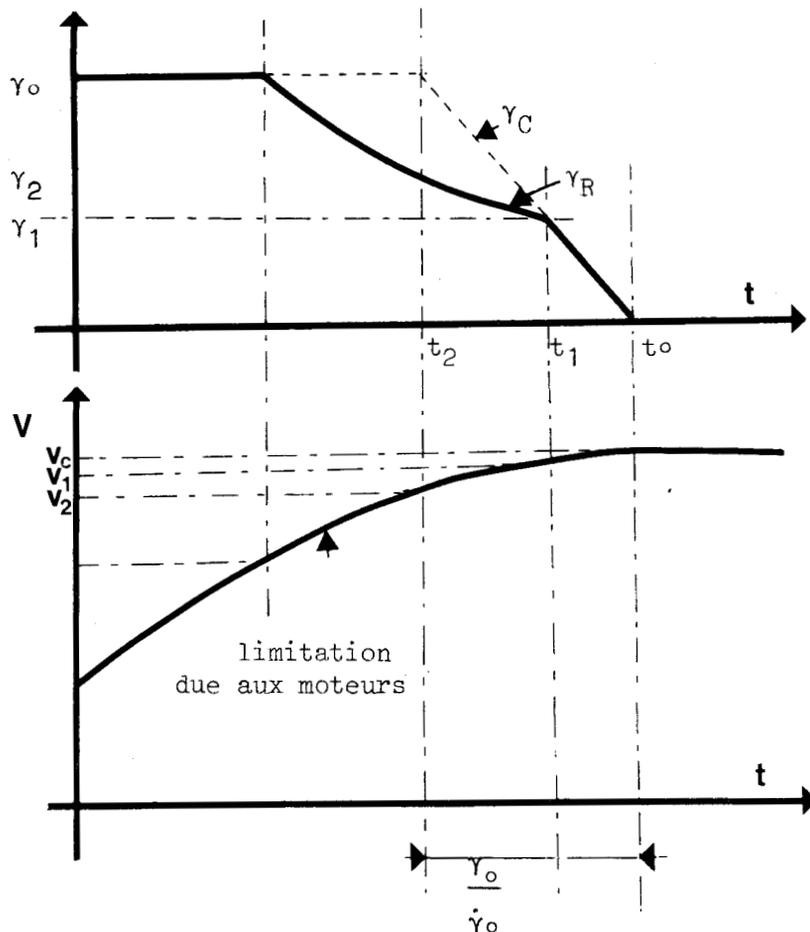


Figure.12.

Déterminons la valeur de k qui permet de diminuer la consigne à partir de l'instant t_2 .

A cet instant le véhicule a une vitesse V_2 et une accélération γ_2 .

Comme la consigne d'accélération décroît lors que :

$$V_c < (V_R + k\gamma_R)$$

nous pouvons déterminer le lieu du changement de signe de la dérivée d'accélération donnant ce résultat.

Considérons le plan de phase $\gamma = f(v)$ de la figure.13.

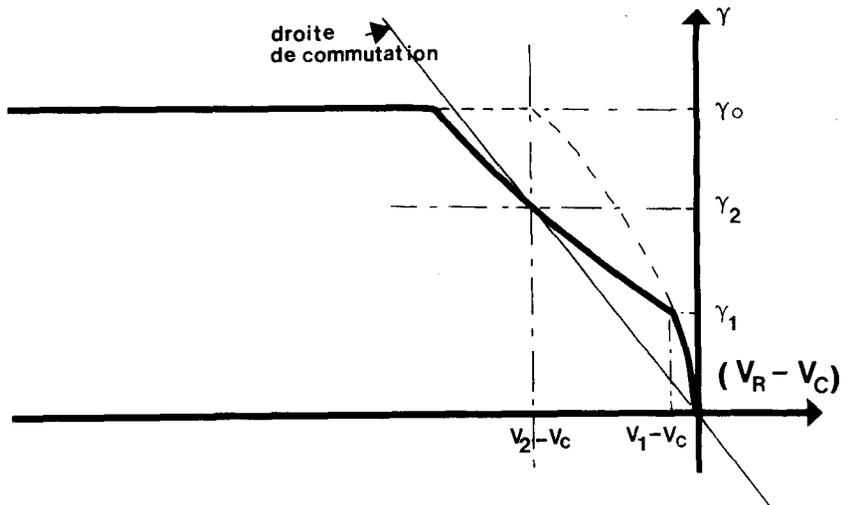


Figure.13.

Pour que la consigne d'accélération puisse décroître à l'instant t_2 , le lieu de changement de signe de la dérivée de la consigne d'accélération doit passer par les points :

$$\gamma_2 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad ; \quad (V_2 - V_c) \text{ (m/s)}$$

$$0 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad ; \quad 0 \text{ (m/s)}$$

Le lieu le plus simple passant par ces points est une droite de pente $-1/k$

avec :

$$k = \frac{-(V_2 - V_c)}{\gamma_2} \quad (32)$$

Méthode de calcul de k

$$k = \frac{-(V_2 - V_c)}{\gamma_2} \quad (32)$$

V_2 et γ_2 sont donnés par le système d'équations suivant :

$$\gamma = \left[(EE_{Tmax}) (v) - E_R(v) \right] \frac{1}{M} + Pg \quad (33)$$

$$\gamma = \frac{dv}{dt} \quad (34)$$

lorsque $t = t_2$.

L'instant t_2 est lui-même donné par le système d'équation suivant :

$$\begin{aligned} t_2 &= \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} - (t_0 - t_1) \\ V_1 &= V_c - \frac{1}{2} \dot{\gamma}_0 (t_0 - t_1)^2 \\ \gamma_1 &= \dot{\gamma}_0 (t_0 - t_1) \\ \gamma_1 &= \left[(EE_{Tmax}) (v_1) - E_R(V_1) \right] \frac{1}{M} + Pg \end{aligned} \quad (35)$$

Dans ce système, t_1 désigne l'instant où la consigne d'accélération est égale à l'accélération réelle.

Les valeurs numériques de V_2 et γ_2 sont obtenues par la résolution de ces équations à l'aide d'une calculatrice.

La figure.14. donne k en fonction de la vitesse de consigne pour les valeurs de l'effort de traction et de l'effort résistant données par les relations (28) et (29).

La valeur de "k" n'est optimale que pour une vitesse, une masse et une pente données. Une valeur de k trop importante entraîne une dégradation des caractéristiques d'autant plus marquée que la vitesse est faible.

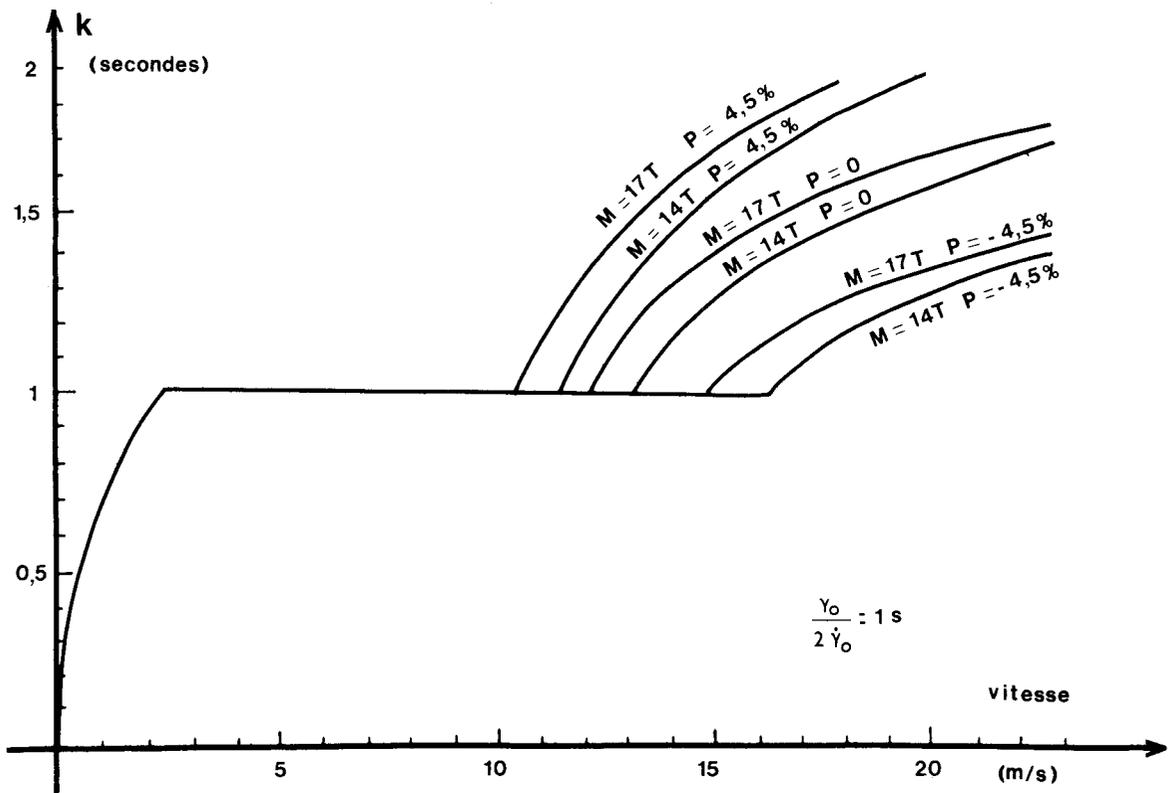


Figure.14.

Nous avons chiffré le temps perdu pour différentes vitesses au cours de la phase d'accélération pour $k = 2$.

vitesse m/s	3,9	9,1	16,9
temps perdu	0,6s	0,3s	0,06s

Nous remarquons que la perte de temps reste négligeable même à vitesse faible.

Cette méthode permet donc d'éviter les dépassements de vitesse (et par suite les commutations traction-freinage et freinage-traction intempestives) aux prix d'une dégradation relativement faible du temps de réponse de l'asservissement.

Elle est efficace à condition de choisir pour k la valeur correspondant à la combinaison de masse et de pente de voie la plus défavorable.

b) 2ème méthode : limitation de la consigne d'accélération à une valeur proche de l'accélération maximale γ_{MM}

Au lieu de modifier la valeur du coefficient k , on limite la consigne d'accélération à une valeur très proche de la valeur maximale γ_{MM} qui tient compte des limites du moteur à grande vitesse. Ceci évite de faire travailler l'asservissement d'accélération en régime de saturation mais impliquera de disposer d'une information supplémentaire liée au courant passant dans le moteur.

Dans ce cas, comme l'indique la figure.15., il suffit que la droite de commutation rencontre la trajectoire au point $((v_1 - v_c), \gamma_1)$ pour atteindre correctement la valeur finale.

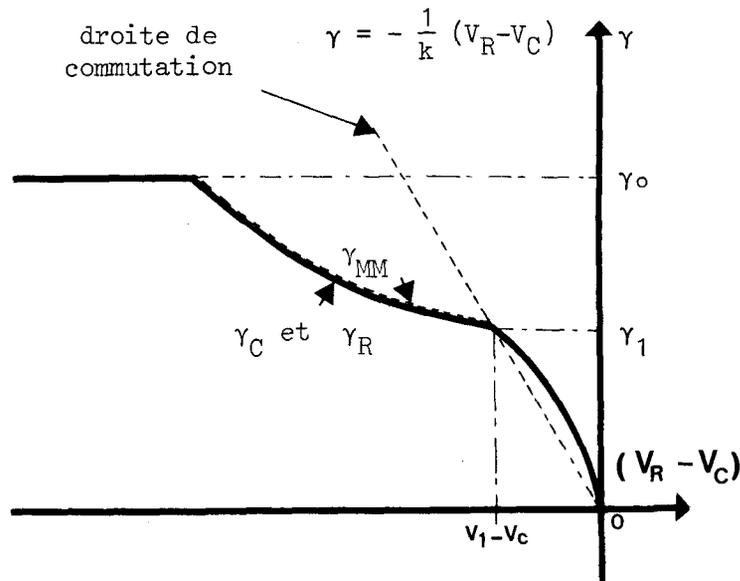


Figure.15.

La valeur de k donnant la réponse optimale est donc donnée par :

$$k = - \frac{(v_1 - v_c)}{\gamma_1} \quad (36)$$

La figure.16. donne la valeur de k en fonction de la vitesse de consigne pour diverses combinaisons de masse du véhicule et de pente de la voie.

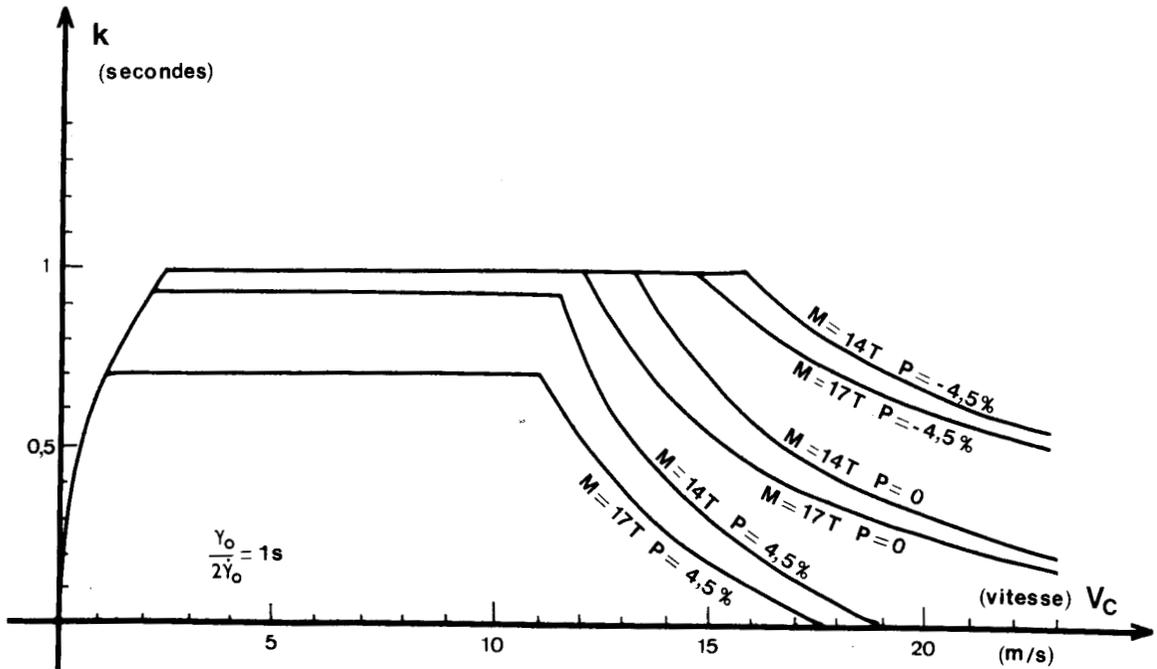


Figure.16.

Nous remarquons qu'il n'est pas nécessaire dans ce cas de majorer la valeur de k puisque la valeur donnant une réponse optimale est toujours inférieure à 1 seconde et diminue pour les vitesses élevées.

Cette méthode permet d'obtenir un très bon résultat mais au prix d'une assez grande complication technologique dans la construction du pilote (limitation de γ_c à la valeur γ_{MM}).

c) 3ème méthode : remplacement du terme d'anticipation $k\gamma_R$ par $k\gamma_C$

Les deux premières méthodes que nous venons de décrire permettent de tenir compte des limitations dues aux moteurs et satisfont les conditions expérimentées au paragraphe.II.3.2. Une troisième méthode possible consiste à remplacer le terme d'anticipation de la vitesse $k\gamma_R$ de l'expression (31) par $k\gamma_C$.

L'asservissement de vitesse génère alors une consigne d'accélération γ_C tel que :

$$\gamma_C = \left[\int_0^t \dot{\gamma}_0 (\text{signe de } [V_C - (V_R + k\gamma_C)]) dt \right]_{\text{limité à } \gamma_0} \quad (37)$$

Si l'on applique un échelon de vitesse V_C inférieur à " $v_{1,3}$ " à l'entrée de l'asservissement, la réponse est identique à celle décrite dans l'étude préliminaire (chapître.II.) puisque γ_R reste égal à γ_C .

Pour un échelon de la vitesse de consigne supérieur à " $v_{1,3}$ ", l'accélération du véhicule décroît bien que la consigne d'accélération γ_C reste à la valeur nominale γ_0 .

La consigne d'accélération ne commence à décroître que lorsque la trajectoire de phase $\gamma_C = f(V_R - V_C)$ rencontre la droite de commutation $\gamma = -\frac{1}{k}(V_R - V_C)$ (figure.17.)

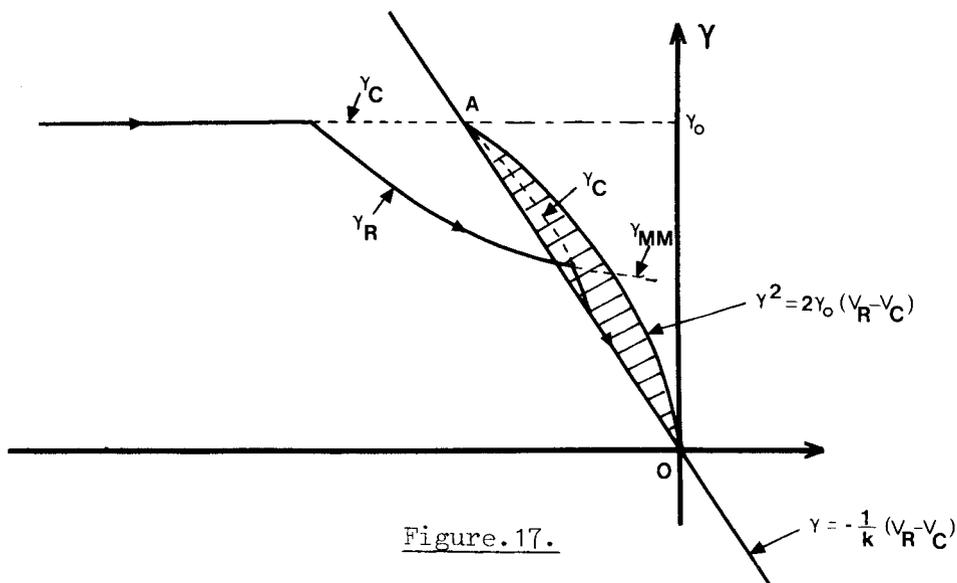


Figure.17.

Ceci se produit à l'instant t_0 (point A de la fig.17.) pour lequel :

$$V_c - (V_R + k\gamma_c) = 0$$

$$\gamma_c = \gamma_0$$

Les valeurs de la vitesse et de l'accélération sont alors :

$$V_R(t_0) = V_c - k\gamma_0$$

$$\gamma_c(t_0) = \gamma_0$$

La vitesse et l'accélération évoluent à partir de cet instant suivant la loi :

$$V_R = V_c - k\gamma_0 + \int_{t_0}^t \gamma_R dt \quad (38)$$

$$\gamma_c = \gamma_0 - \dot{\gamma}_0 \int_{t_0}^t S dt \quad (39)$$

S étant la fonction représentative du signe de $V_c - (V_R + k\gamma_c)$ tel que :

$$S = +1 \text{ pour } V_c - (V_R + k\gamma_c) > 0$$

$$S = 0 \text{ pour } V_c - (V_R + k\gamma_c) = 0$$

$$S = -1 \text{ pour } V_c - (V_R + k\gamma_c) < 0$$

Nous obtenons, d'après les relations (37), (38) et (39) :

$$S = \text{signe de } \left[- \int_{t_0}^t (\gamma_R + kS\dot{\gamma}_0) dt \right] \quad (40)$$

Mais cette relation n'est pas explicite. En effet, on remarque que "S" intervient dans son second membre. Pour expliciter "S" il faut alors distinguer 2 cas suivant l'ordre de grandeur de γ_R par rapport à $k\dot{\gamma}_0$.

1) Si $\gamma_R > k\dot{\gamma}_0$

Le terme intégral est toujours positif donc S sera négatif. Le point représentatif se situe entre la droite de commutation : $\gamma = -1/k (V_R - V_C)$ et la parabole correspondant à la loi de variation maximum de la consigne d'accélération soit : $\gamma^2 = 2\gamma_0(V_R - V_C)$.

2) Si $\gamma_R < k\dot{\gamma}_0$

Il est évident que l'on obtient un régime d'oscillations puisque l'expression (40) peut s'écrire : $S = \text{signe}(-S)$. On est alors en régime glissant et la trajectoire $\gamma_C = f(V_R - V_C)$ converge vers le point 0 en suivant la droite de commutation.

Dans tous les cas lorsque γ_C devient inférieur à γ_{MM} , l'asservissement d'accélération contrôle parfaitement l'accélération du véhicule et la trajectoire $\gamma_R = f(V_R - V_C)$ se confond avec la trajectoire $\gamma_C = f(V_R - V_C)$.

d) Comparaison des 3 méthodes

Les planches 3 à 5 montrent les résultats obtenus par simulation numérique avec chacune de ces 3 méthodes.

Dans chaque cas nous avons tracé la vitesse et l'accélération pour 3 vitesses de consigne différentes :

- . vitesse maximale (22,1m/s)
- . vitesse nominale (16,9m/s)
- . vitesse inférieure à la vitesse critique du véhicule $V_{1,3}$ soit 8m/s pour le moteur et le véhicule simulés.

Planche 3 (1ère méthode)

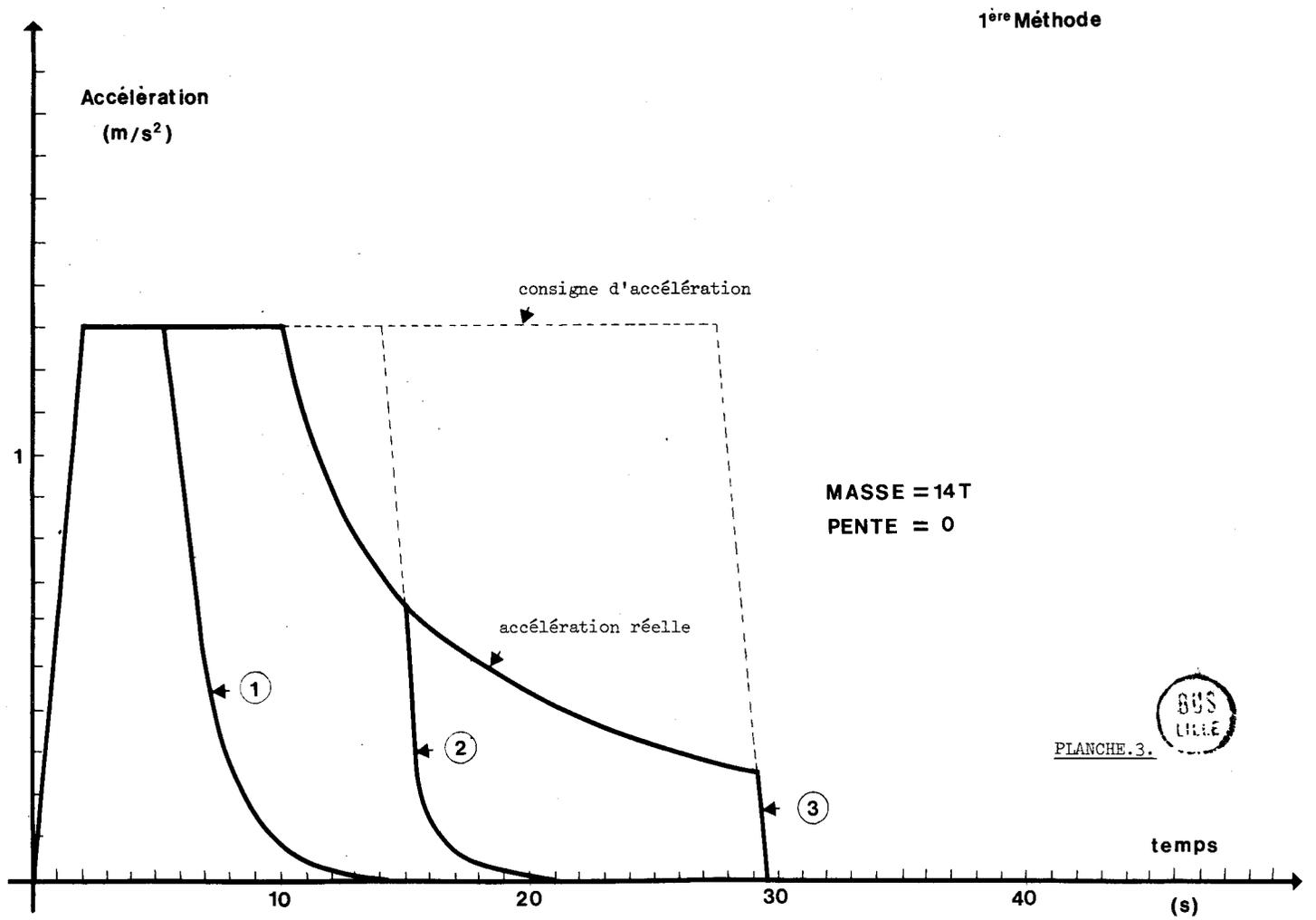
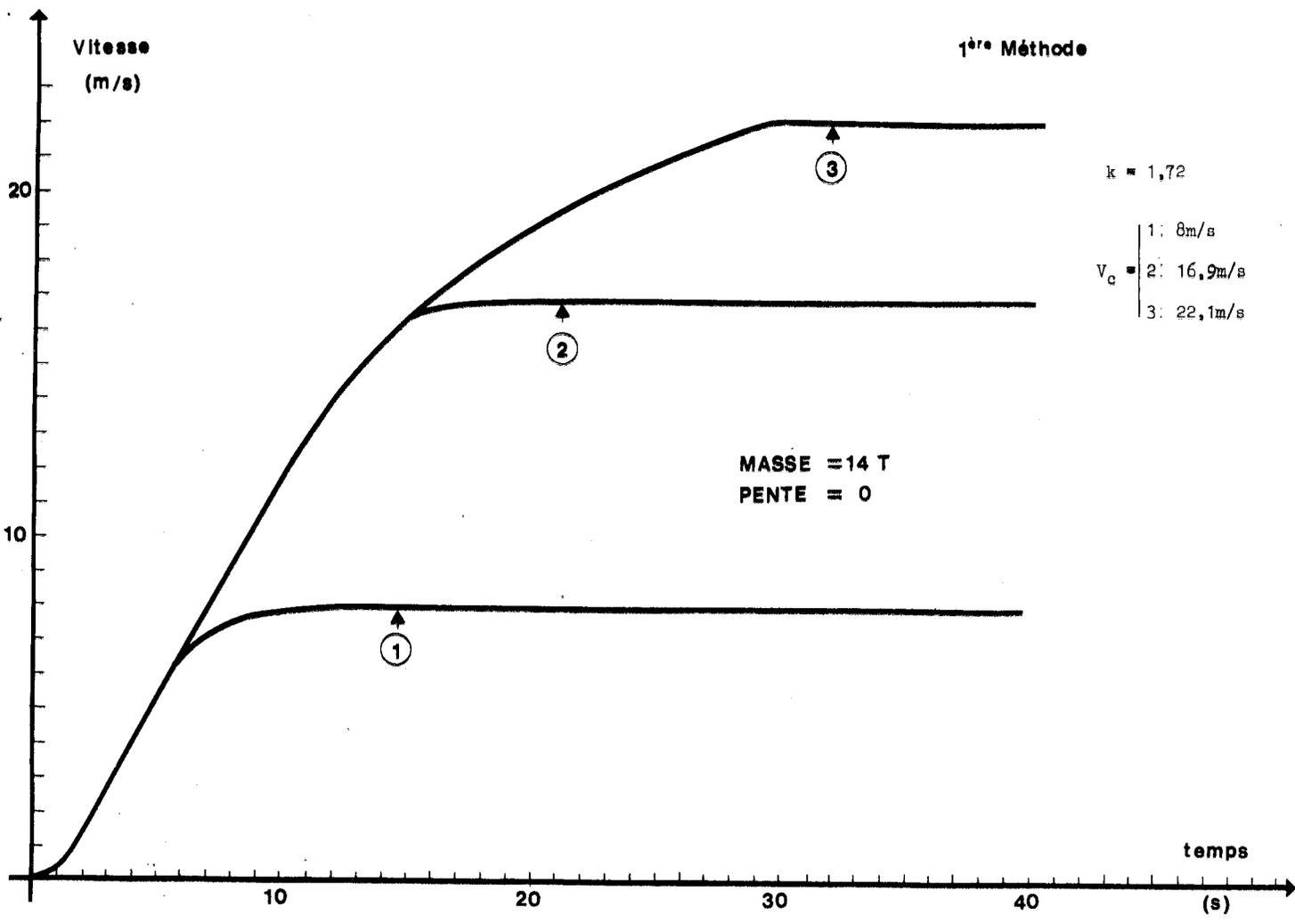
La réponse est optimale pour la vitesse maximale puisque le coefficient "k" a été établi pour cette vitesse. La décroissance de l'accélération est linéaire et la pente correspond à une dérivée d'accélération égale à $0,65\text{m/s}^3$.

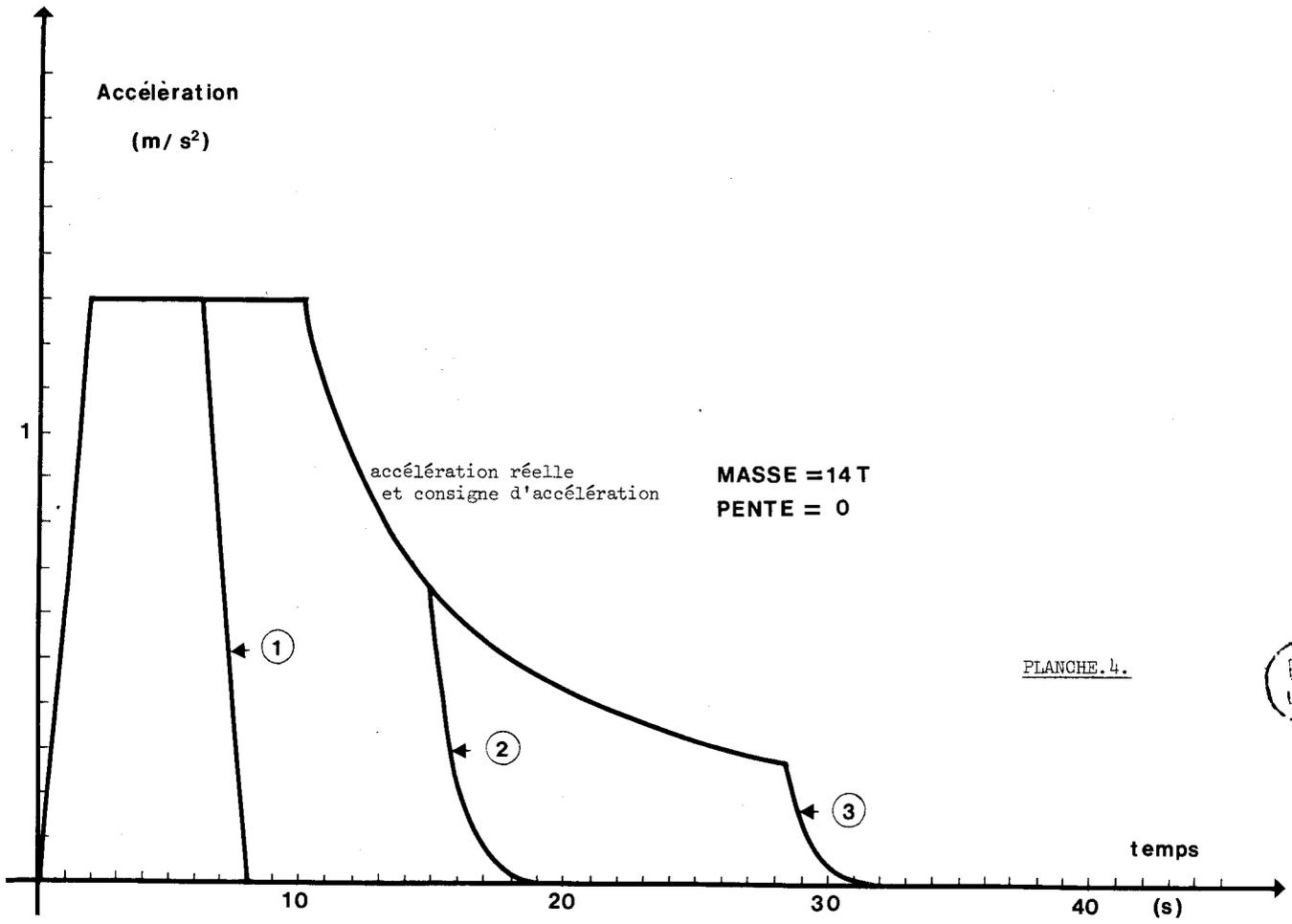
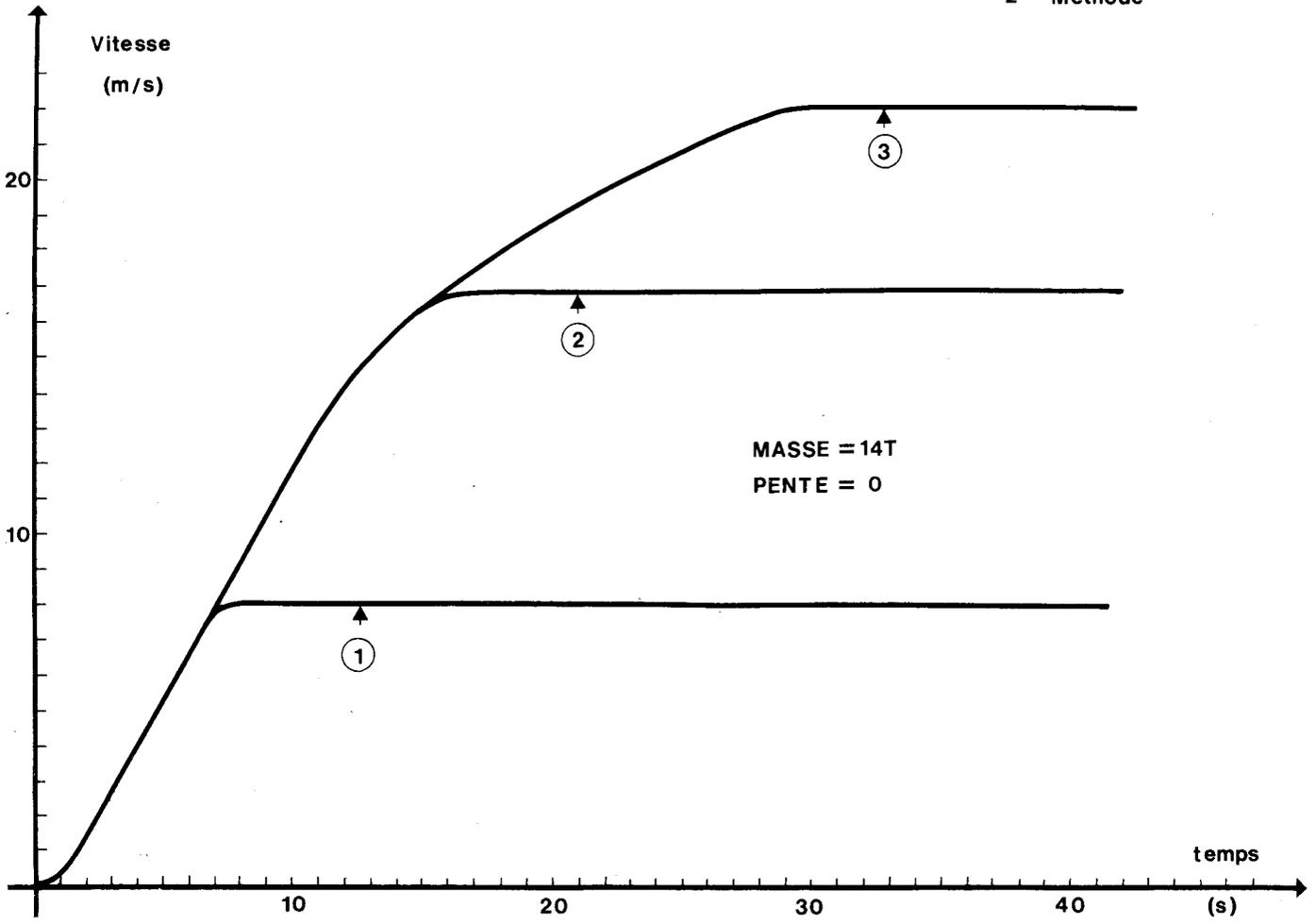
Pour une vitesse de consigne inférieure à V_M , la fin de décroissance de l'accélération est exponentielle. Ce phénomène a été décrit dans l'étude préliminaire (§.II.2.2.). Pendant cette phase exponentielle la vitesse et l'accélération sont liées par la loi linéaire : $\gamma_R = \frac{1}{k} (V_R - V_c)$.

Il en résulte une augmentation du temps nécessaire pour atteindre la vitesse de consigne d'autant plus importante que celle-ci est faible.

Planches 4 et 5 (2ème et 3ème méthode)

Pour ces 2 méthodes, la réponse est optimale pour des vitesses inférieures à la vitesse critique $V_{1,3}$. C'est dans ce cas pour des vitesses supérieures à $V_{1,3}$ qu'apparaît une phase exponentielle puisque la valeur de k est établie pour une accélération égale à γ_0 (§.II.3.)





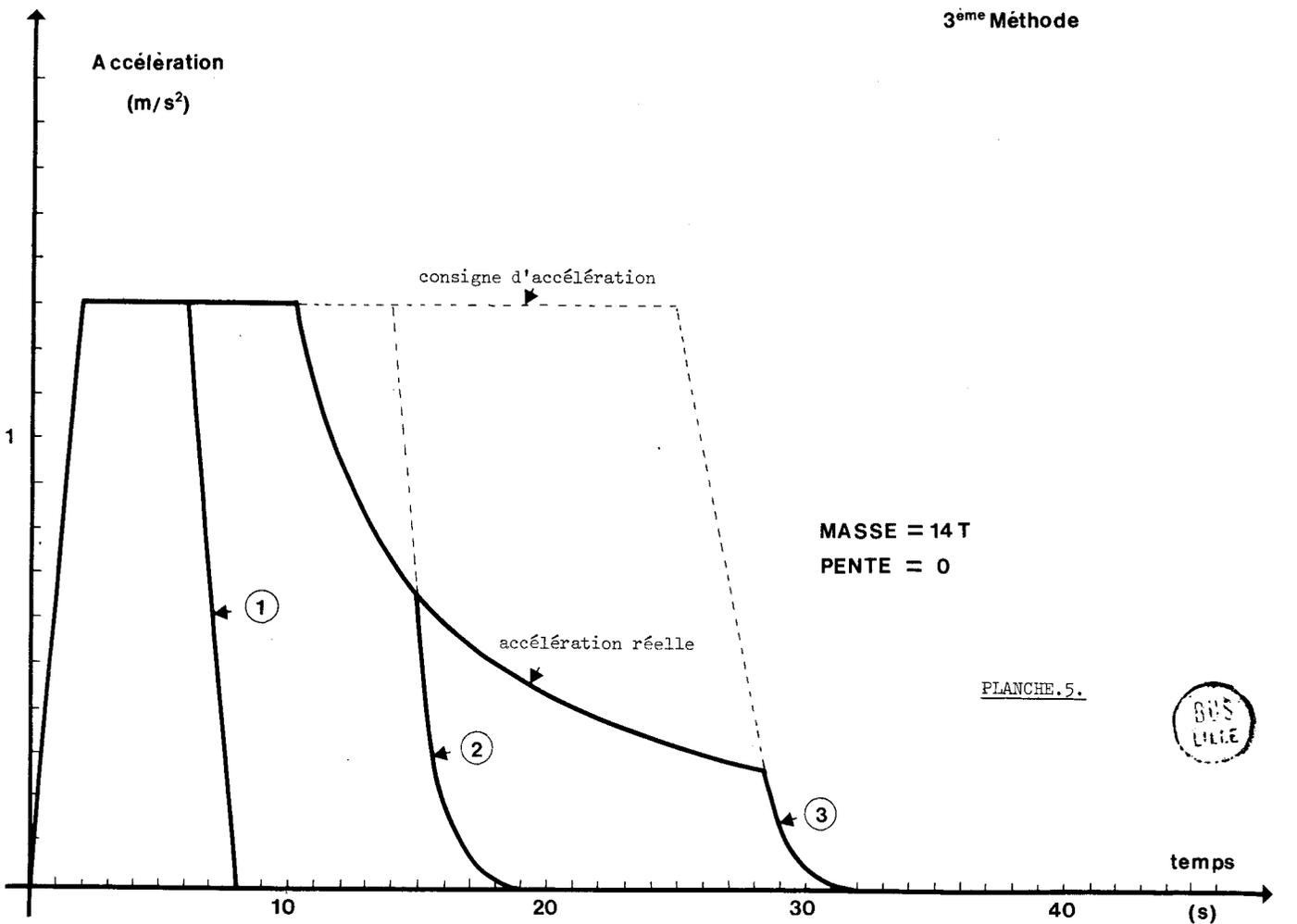
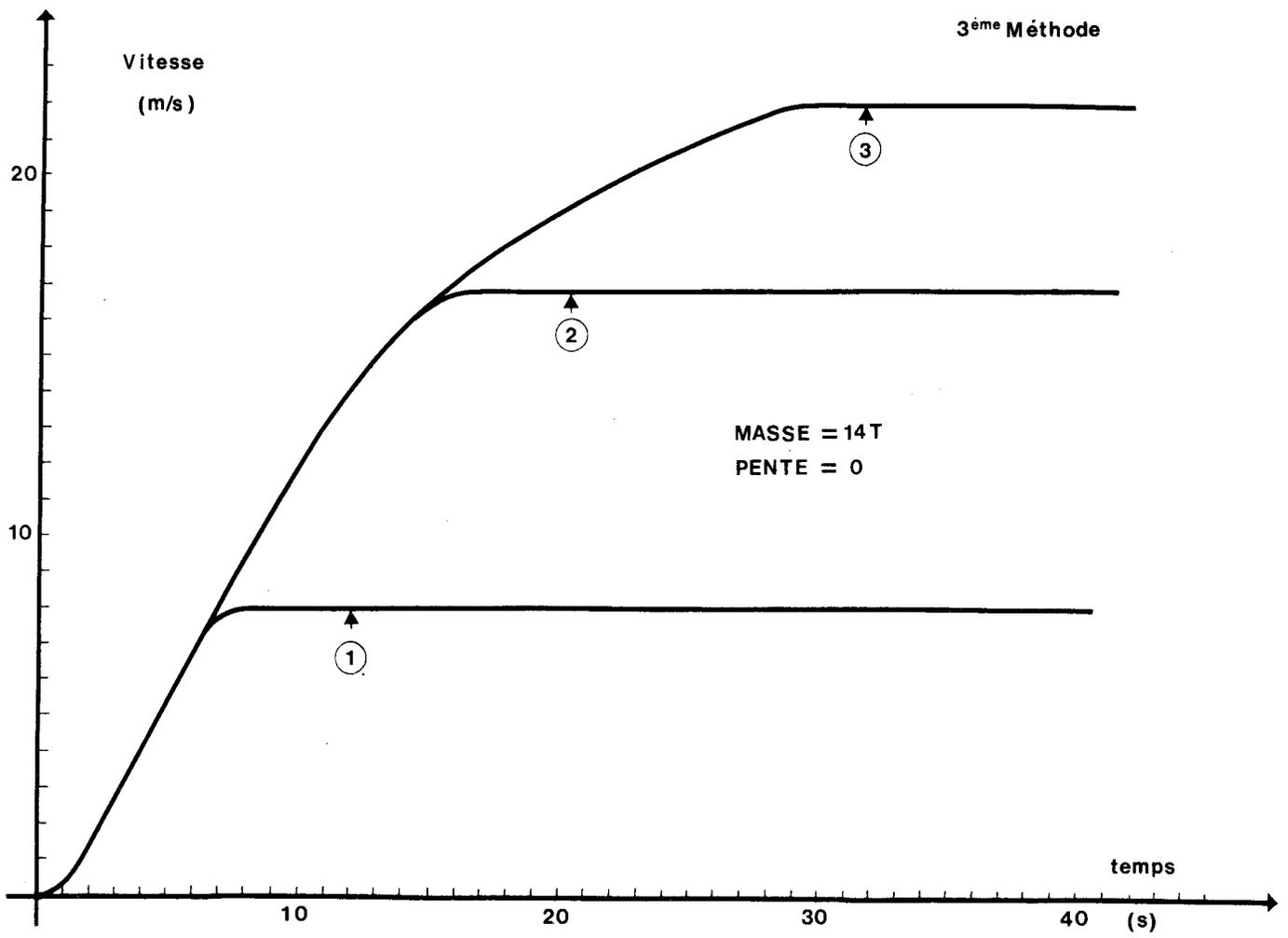


PLANCHE.5.



11.3.2.2. Conclusion

Nous voyons que la deuxième et la troisième méthode conduisent à des résultats équivalents (l'une donnant de meilleurs résultats à la vitesse maximum et les deux autres à des vitesses plus faibles). Mais la réalisation technologique du pilote est beaucoup plus simple si l'on utilise la troisième méthode. Ceci constitue son principal intérêt.

Cependant la comparaison des planches 1 et 3, pourrait laisser penser que la première méthode est pratiquement aussi bonne que la troisième (tant du point de vue résultats que du point de vue simplicité de la réalisation technologique).

Nous allons montrer que la troisième méthode s'avère plus intéressante si l'on tient compte des retards purs et constantes de temps des éléments (électromécaniques principalement) intervenant dans l'asservissement d'accélération.

11.3.3. Influence du temps de réponse de l'asservissement d'accélération

Nous avons supposé dans les chapitres précédents que l'asservissement d'accélération était parfait du point de vue temps de réponse. C'est-à-dire que dans tous les cas où la consigne d'accélération γ_c reste inférieure à l'accélération maximum permise par les moteurs le véhicule suit exactement et sans aucun retard cette consigne.

En réalité, si l'on tient compte des différentes constantes de temps et retards purs des éléments électromécaniques intervenants dans cet asservissement, l'accélération du véhicule est toujours en retard sur la consigne.

Nous étudions dans ce chapitre l'influence d'un retard pur de l'asservissement d'accélération sur la réponse en vitesse. On peut considérer qu'un retard pur a un effet plus défavorable qu'une constante de temps de même valeur et correspond au cas le plus défavorable.

Dans un premier temps, nous examinerons l'influence d'un retard pur sans tenir compte de la limitation d'accélération due à la puissance des moteurs. Nous examinerons ensuite les effets conjugués de ces deux types de perturbations.

La figure.18. montre le schéma fonctionnel de l'asservissement de vitesse que nous étudions lorsqu'il fonctionne en tenant compte de ce retard pur.

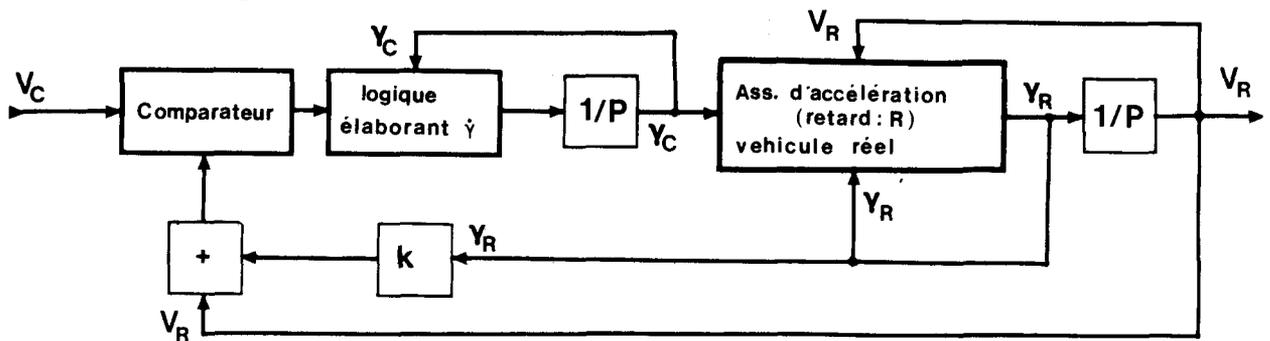


Figure.18.

Ce schéma représente davantage les conditions réelles de fonctionnement que le schéma précédemment étudié (figure.7.).

La planche.6. montre l'effet d'un retard pur sur la réponse en vitesse pour différents retards.

Suivant le retard, la vitesse du véhicule atteint la vitesse de consigne après un dépassement, dans d'autres cas la vitesse oscille autour de la vitesse de consigne.

L'explication est simple. La consigne d'accélération γ_c décroît lorsque :

$$V_R + k\gamma_R = V_C$$

Soit sur le plan de phase de la figure.19. lorsque la trajectoire $\gamma_R = f(V_R - V_C)$ rencontre la droite de commutation $\gamma = -\frac{1}{k}(V_R - V_C)$.

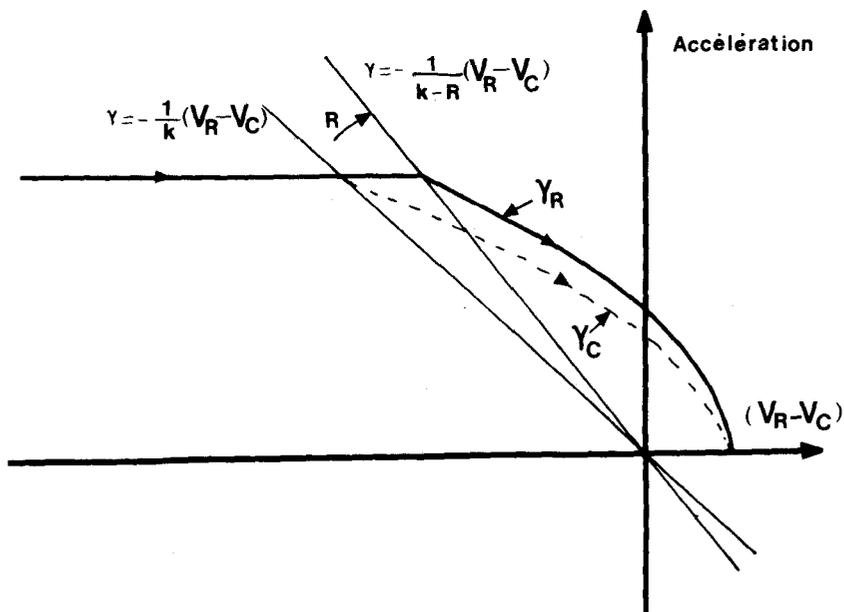
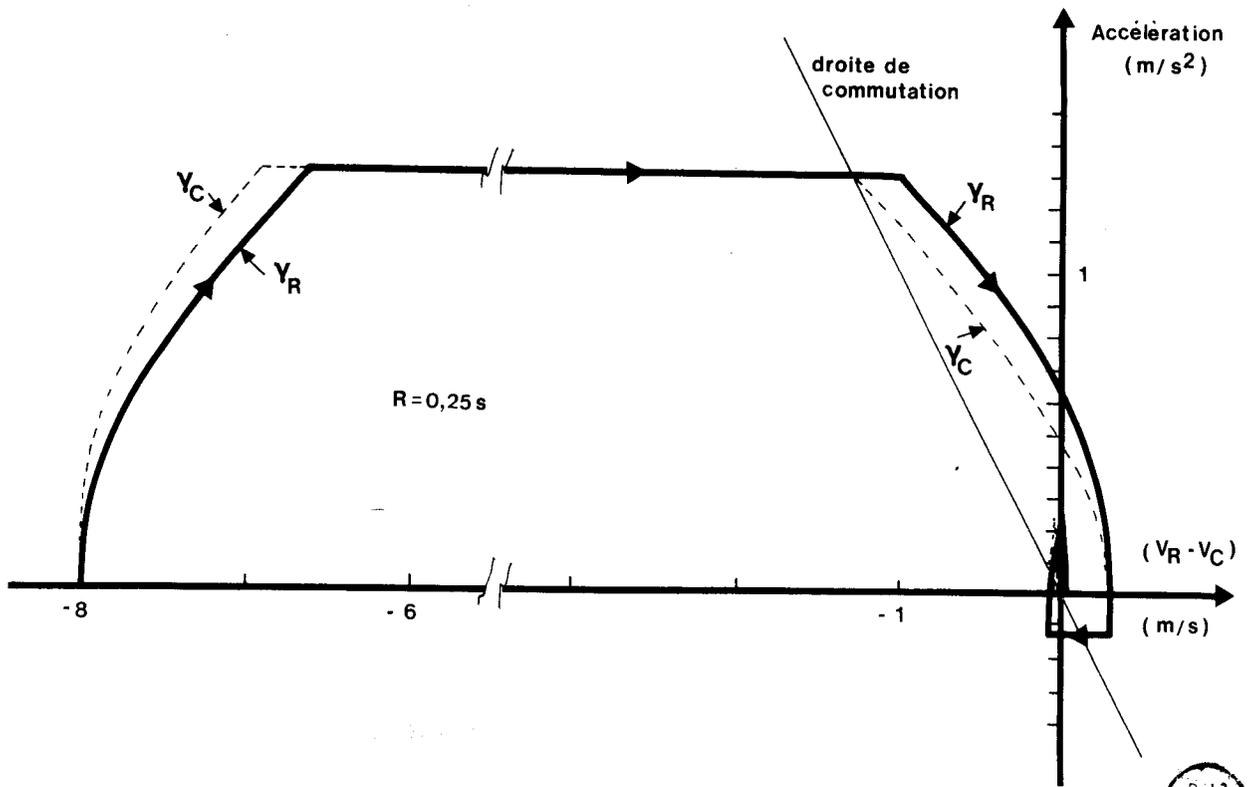
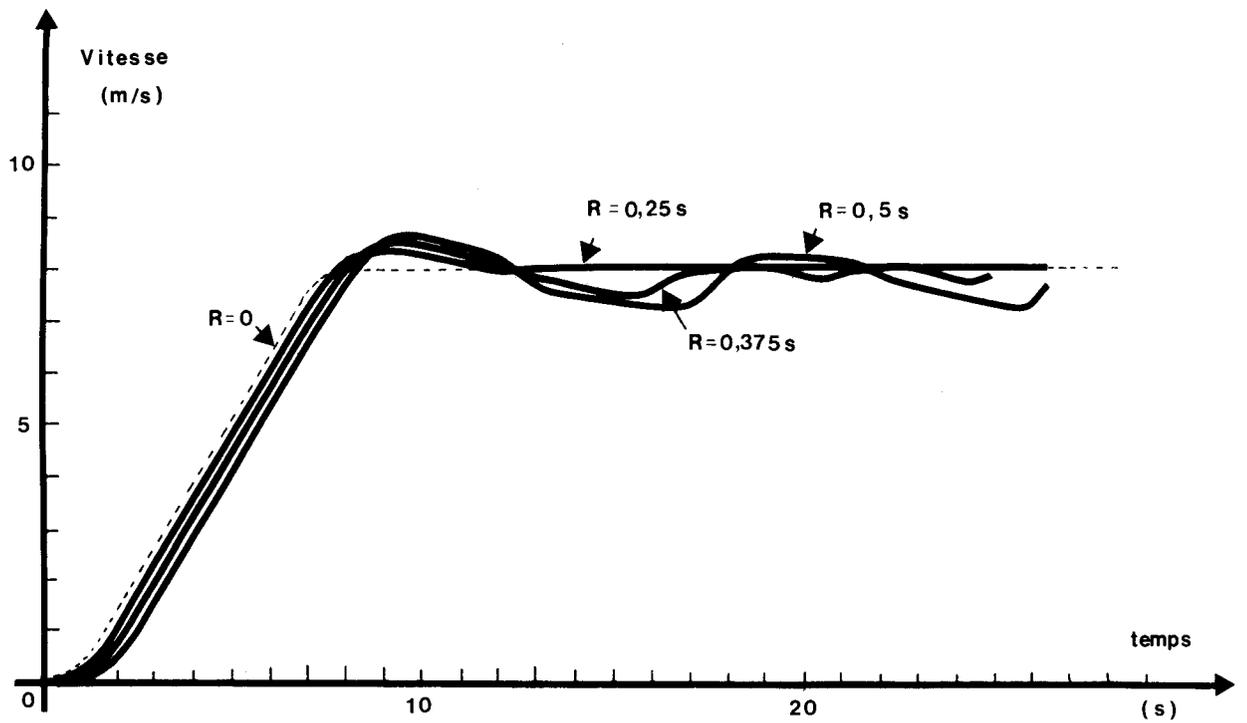


Figure.19.



L'accélération réelle γ_R ne commence à décroître qu'après le retard R. Les trajectoires $\gamma_R = f(V_R - V_C)$ et $\gamma_C = f(V_R - V_C)$ ne peuvent donc aboutir directement à la valeur finale sans dépassement.

La droite de commutation de l'accélération réelle est donc obtenue par rotation de la droite de commutation de la consigne d'accélération. Son équation est :

$$\gamma = - \frac{1}{(k-R)} (V_R - V_C) \quad (44)$$

R exprime le retard de l'asservissement.

Pour éviter le dépassement, il suffit de faire tourner la droite de commutation de la consigne d'accélération $\gamma = - \frac{1}{k} (V_R - V_C)$ d'une valeur qui permet de compenser le retard. On obtient donc la nouvelle droite de commutation de la consigne d'accélération $\gamma = - \frac{1}{(k+R)} (V_R - V_C)$ simplement en majorant le coefficient k de la valeur du retard R (figure.20.).

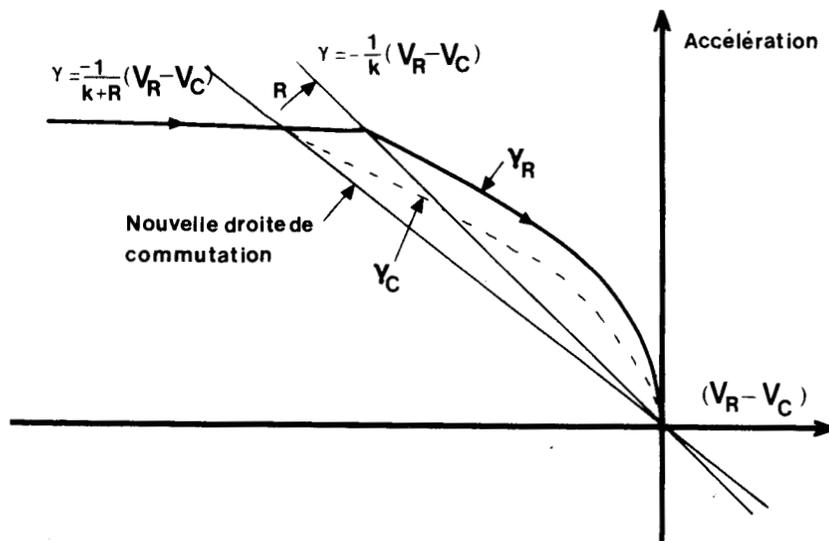


Figure.20.

La planche.7. donne la réponse en vitesse avec la nouvelle droite de commutation de la consigne d'accélération : $\gamma = -\frac{1}{(k+R)} (V_R - V_c)$

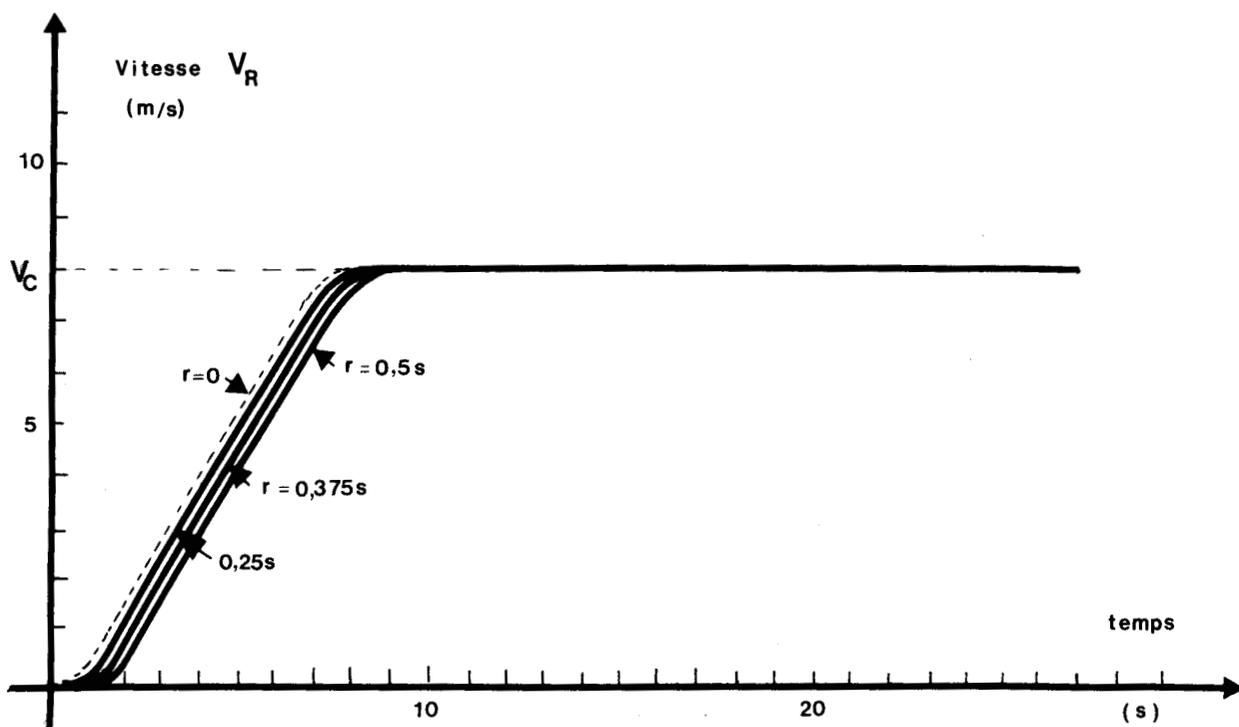


Planche.7.



II.3.4. Effets conjugués d'un retard pur de l'asservissement d'accélération et de la limitation d'accélération due aux moteurs

Dans le chapitre précédent, nous avons donné 3 méthodes permettant de remédier aux effets de la limitation d'accélération due à la puissance limitée des moteurs sur la réponse en vitesse. Nous reprenons ici chaque méthode et nous l'étudions dans l'hypothèse d'un retard pur de l'asservissement d'accélération.

Nous avons majoré dans chaque cas, le coefficient d'avance de phase "k" d'une valeur égale au retard.

L'étude analytique étant complexe, il est plus rapide de procéder par simulation numérique. Cette étude permet de dégager la méthode donnant les meilleures performances.

II.3.4.1. Réponse obtenue avec chacune des 3 méthodes précédentes

a) majoration du coefficient "k"

Les résultats numériques donnés par la planche.8. montrent que la réponse est optimale pour la vitesse maximum 22,1m/s. Pour des vitesses inférieures, l'accélération fluctue autour de la valeur nominale. La fluctuation dépend du retard et croît avec celui-ci.

b) limitation de la consigne d'accélération

La réponse est optimale pour des vitesses faibles tant que l'accélération du véhicule peut atteindre γ_0 ($1,3\text{m/s}^2$). Pour des vitesses supérieures l'accélération fluctue proportionnellement au retard (planche.9.).

c) remplacement du terme d'anticipation k_R par k_C

La planche.10. montre qu'avec cette méthode l'accélération de la rame décroît régulièrement sans aucune fluctuation.

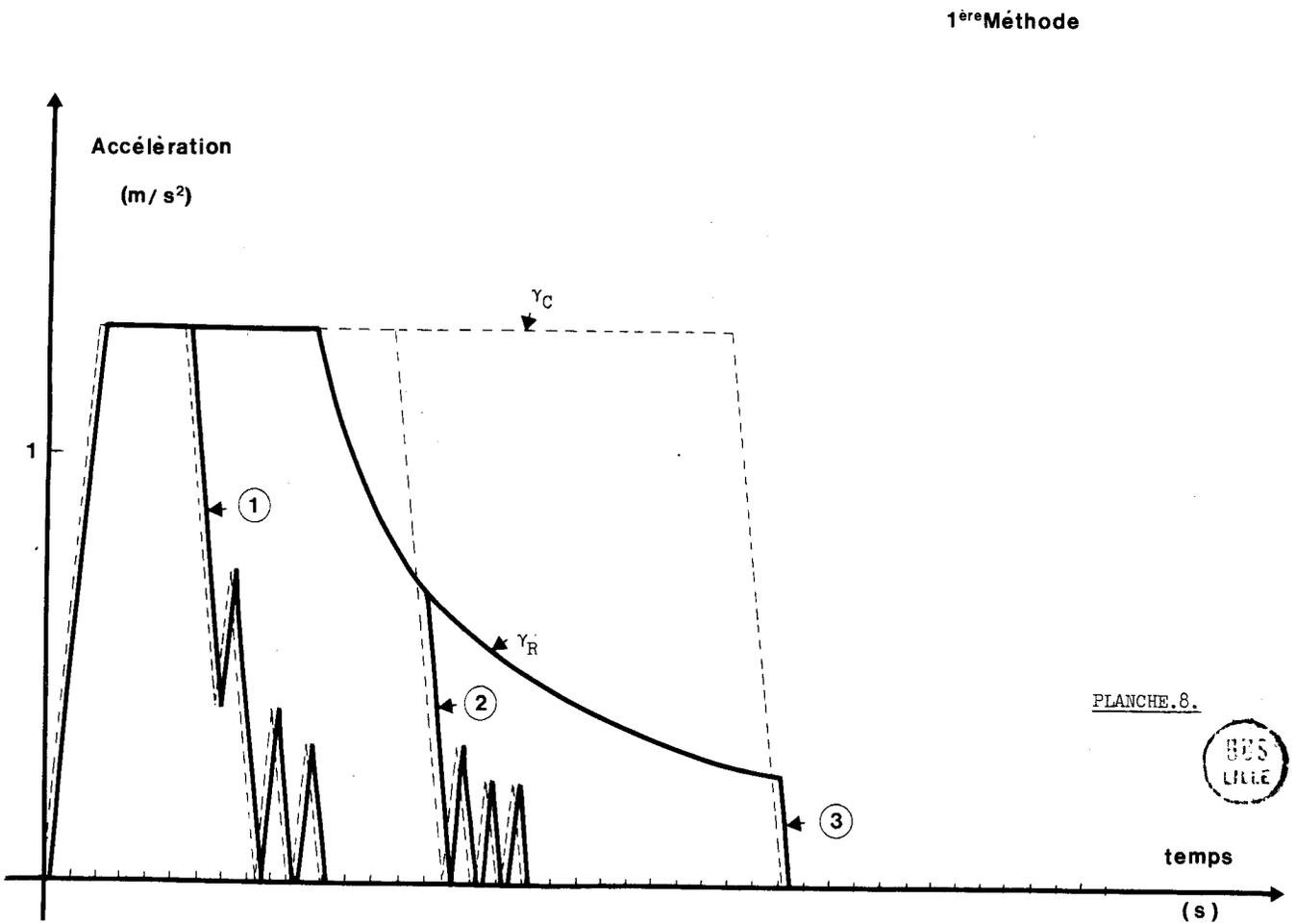
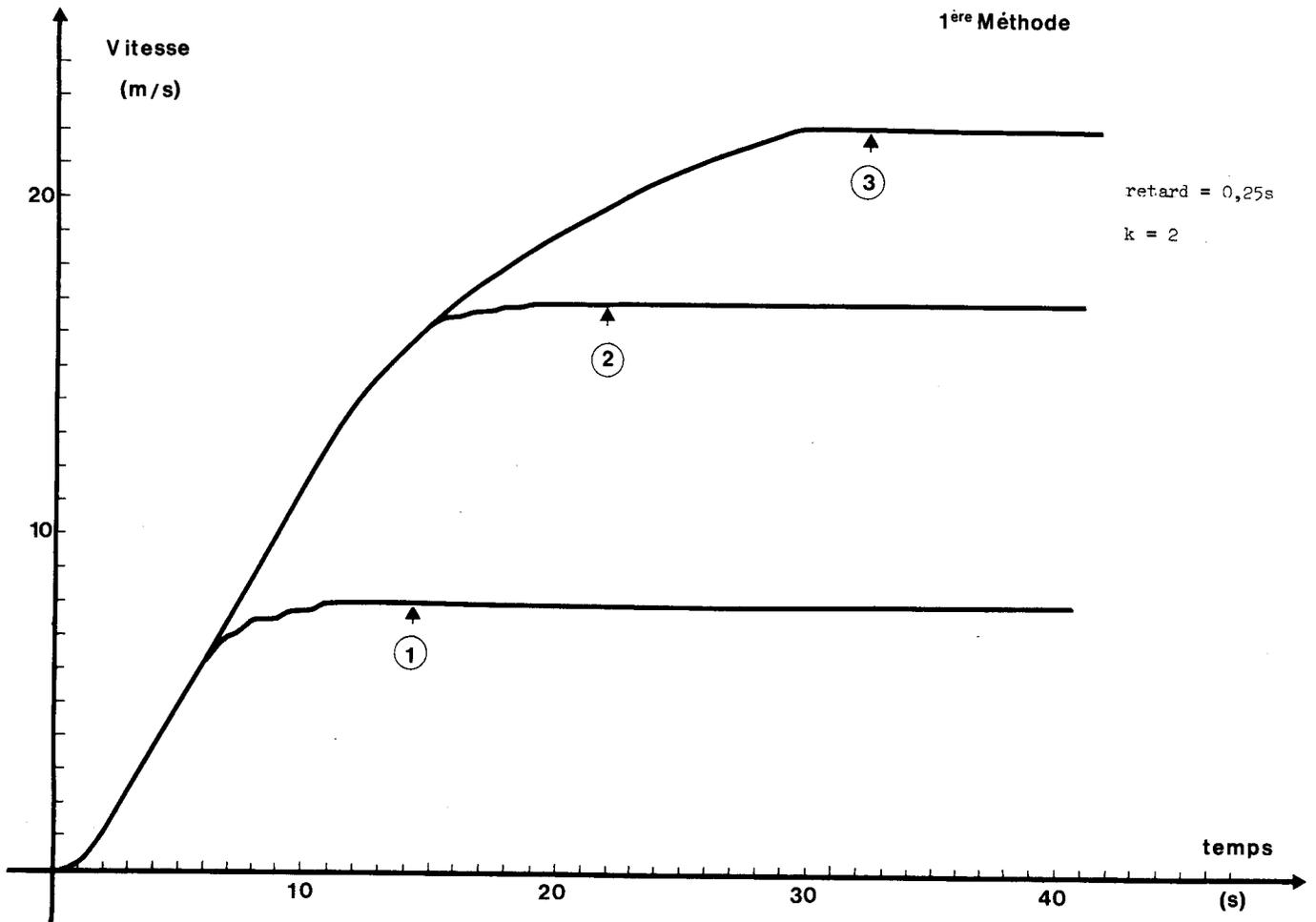
D'autre part cette méthode permet, en remplaçant γ_R (obtenue par dérivation de la vitesse) par γ_C , d'obtenir une consigne d'accélération moins bruitée. Ceci est très intéressant puisque la commutation traction-freinage est obtenue au changement de signe de la consigne d'accélération.

Remarque

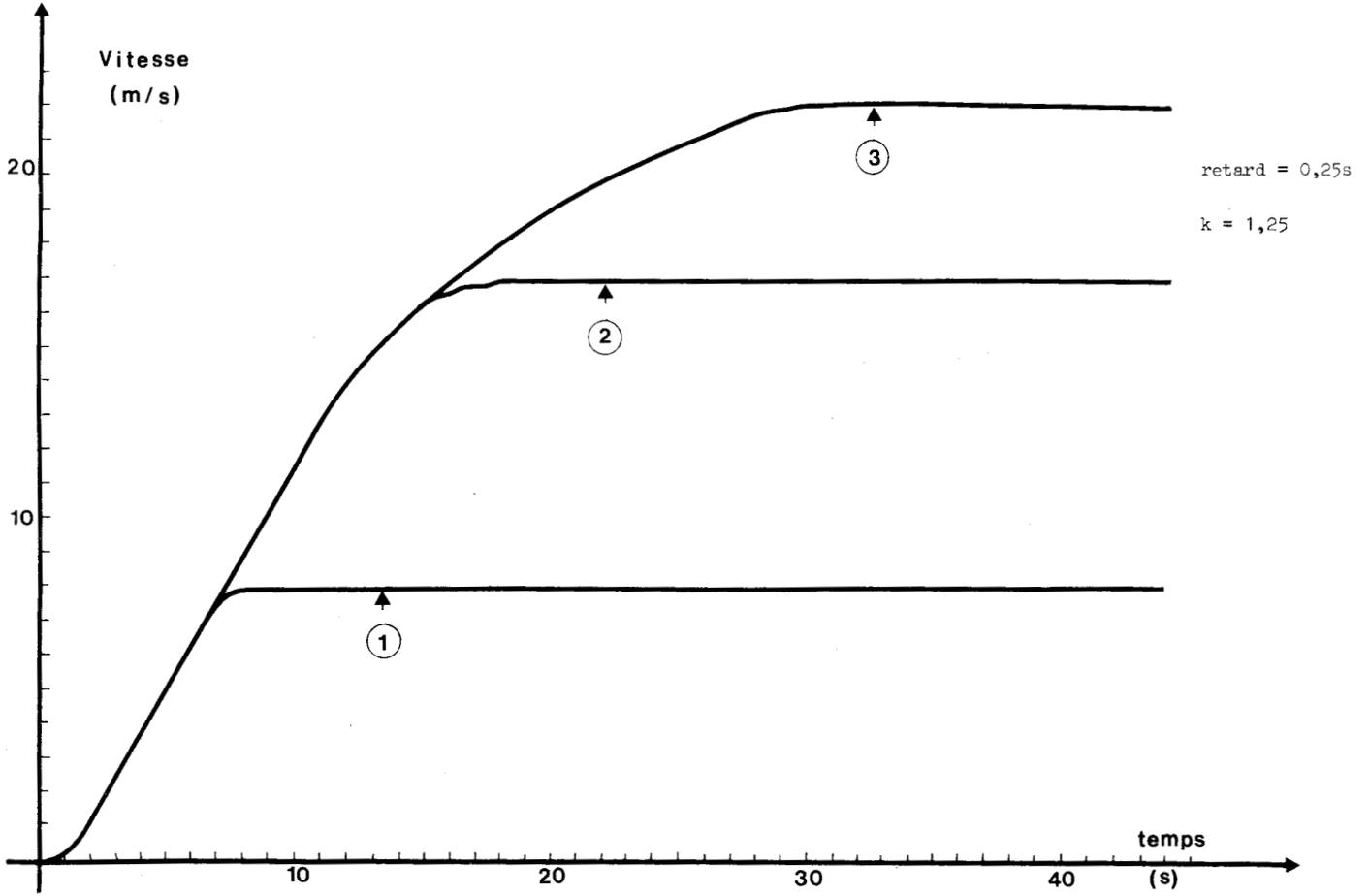
Nous avons supposé que le retard de l'asservissement était parfaitement connu et fixe. Afin d'obtenir un fonctionnement correct, il faut envisager une valeur maximum du retard (pire des cas) pour déterminer la valeur du coefficient "k".

La planche.11. permet de mettre en évidence que seule la 3ème méthode permet d'obtenir un fonctionnement correct sans fluctuations parasites de l'accélération de la rame dues au retard de l'asservissement lorsque l'on majore le coefficient k.

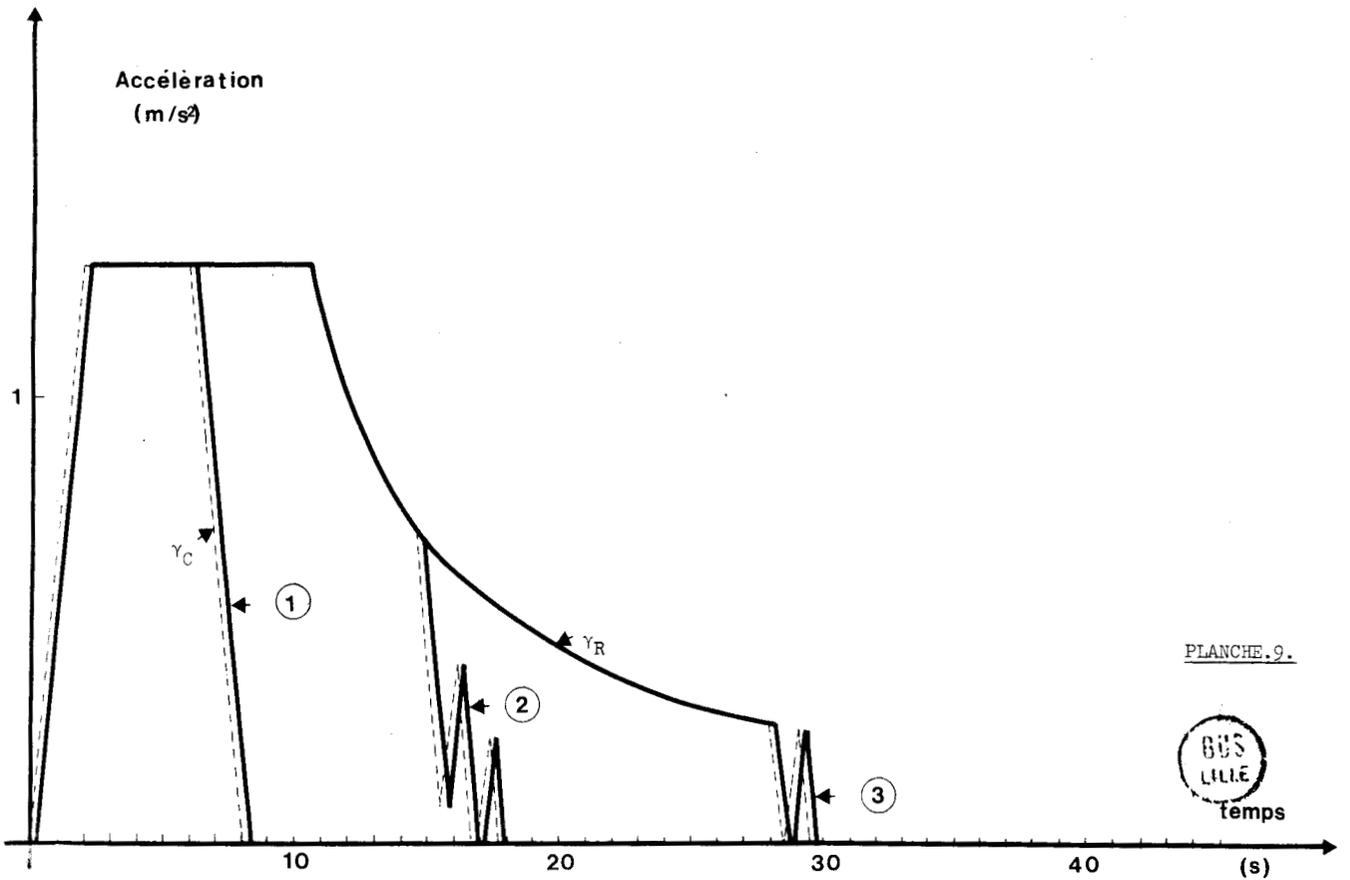
La planche.12. montre la réponse en vitesse obtenue avec la troisième méthode pour 3 valeurs de la vitesse de consigne avec $k = 1,5s$ lorsque le retard de l'asservissement d'accélération est égal à $0,25s$.

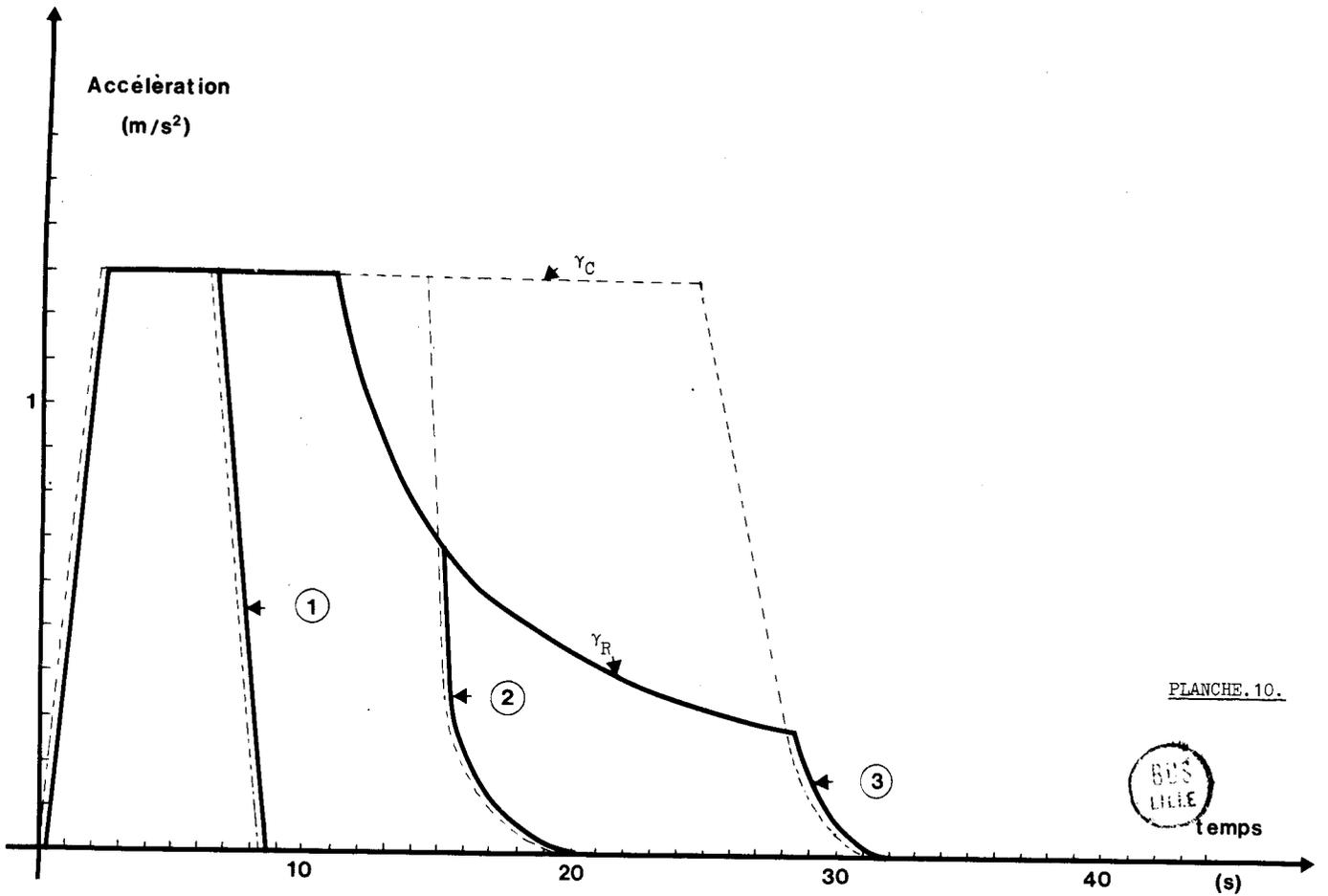
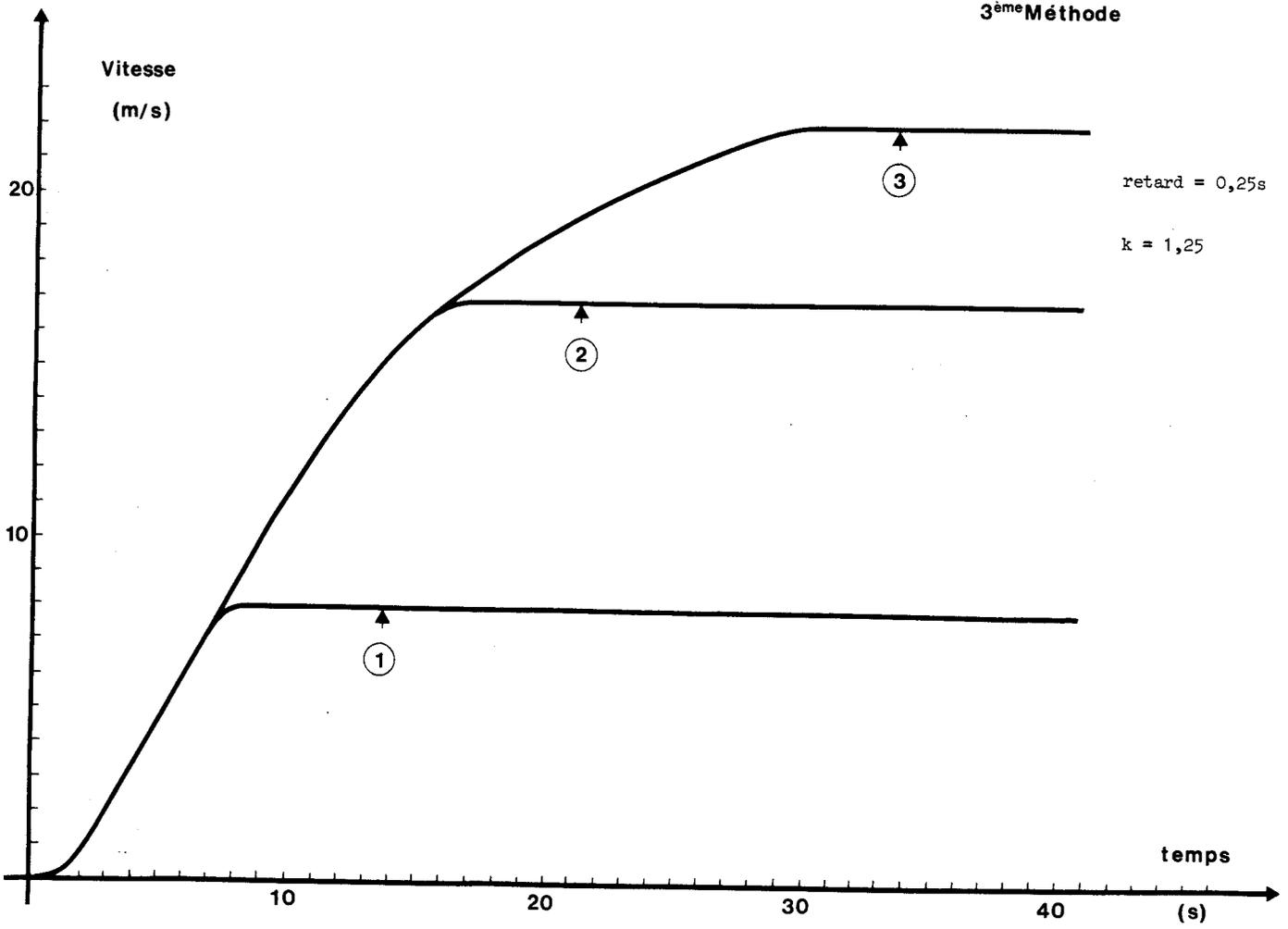


2^{ème} Méthode



2^{ème} Méthode





retard = 0,25s

k = 1,5

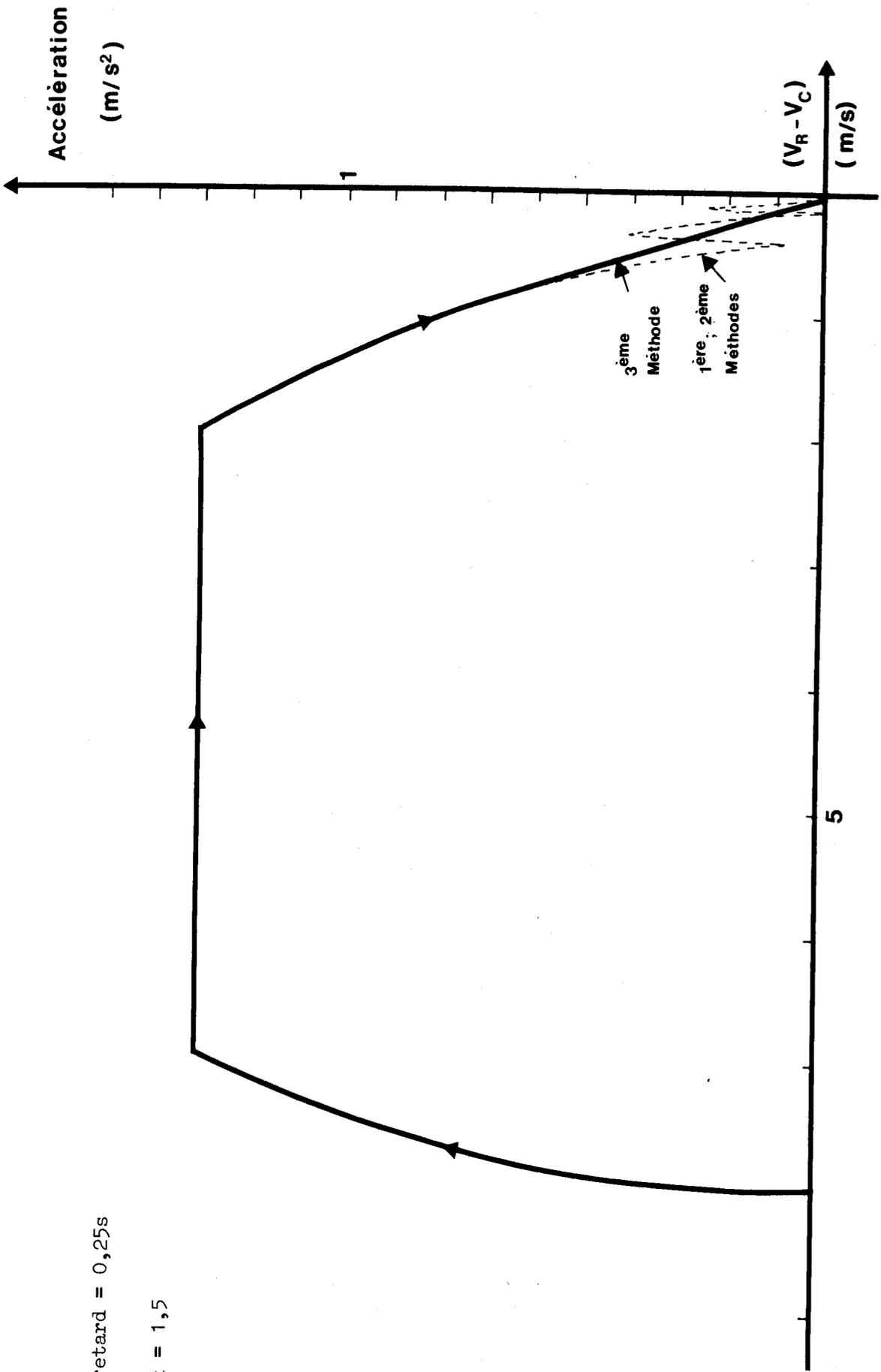


PLANCHE. 11.



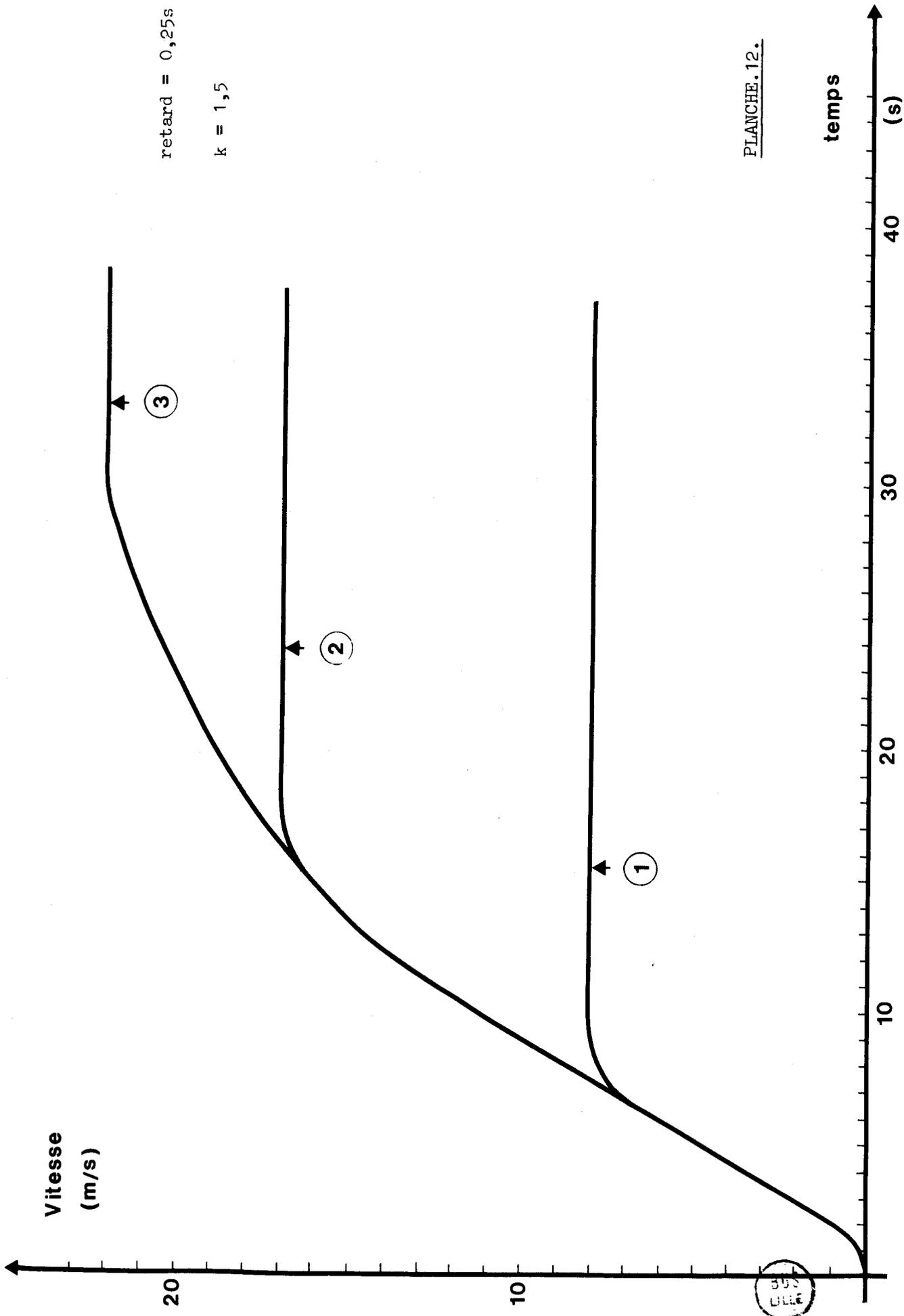


PLANCHE. 12.

505
LILLE

II.4. CONCLUSION

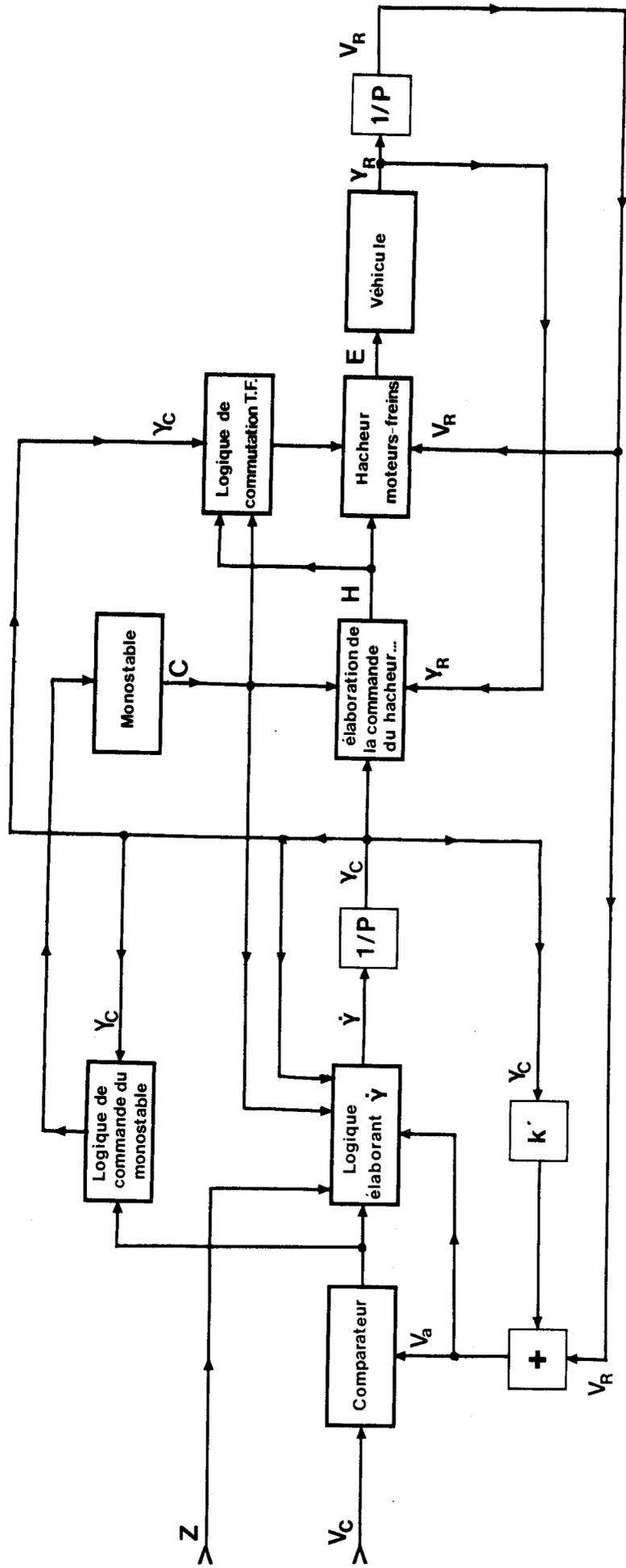
L'étude de base nous a permis d'établir une structure simple d'asservissement de vitesse avec lequel l'accélération et sa dérivée ne dépassent pas les limites imposées par le cahier des charges.

L'analyse de l'influence des caractéristiques propres du matériel de traction utilisé (puissance des moteurs, temps de réponse des différents organes mécaniques et électriques) montre que la réponse s'écarte de la réponse optimale et entraîne des instabilités.

Après avoir examiné plusieurs corrections permettant d'éliminer ou de réduire ces effets, nous avons dégagé une méthode simple permettant d'atteindre le plus rapidement possible la vitesse de consigne sans fluctuations périodiques de l'accélération.

Il est enfin très intéressant de remarquer que l'adaptation de cet asservissement à un moteur de caractéristiques différentes ne nécessite que la modification d'un seul paramètre (k).

La figure.21. présente un schéma fonctionnel d'un asservissement de vitesse utilisant ce procédé.



SCHEMA FONCTIONNEL DE L'ASSERVISSEMENT DE VITESSE

figure 21



Equations logiques se rapportant au schéma fonctionnel de l'asservissement de vitesse de la figure.21.

a) logique élaborant

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \text{ pour } \left[\left[(V_C > V_a) \cdot (\gamma_C < \gamma_0) \cdot \overline{[Z \cdot (\gamma_C = 0_-)]} \right] + (V_a < 0) \right] \cdot \bar{C} = 1$$

$$\gamma = -\dot{\gamma}_0 \text{ pour } \left[(V_C < V_a) \cdot (\gamma_C > -\gamma_0) + Z \cdot (\gamma_C > 0_-) \right] \cdot \bar{C} = 1$$

$\dot{\gamma} = 0$ dans tous les autres cas

b) logique de commande du monostable

$$\left[(V_C > V_a) \cdot (\gamma_C = 0_+) \right] + \left[(V_C < V_a) \cdot (\gamma_C = 0_-) \right] = 1$$

Lorsque cette relation est satisfaite le monostable est déclenché et sa sortie "C" reste au niveau logique 1 pendant le temps τ nécessaire à annuler la commande Hâcheur et à effectuer la commutation traction-freinage (dans notre cas τ est fixé à 2 secondes).

c) logique de commutation traction - freinage

commutation traction pour $C \cdot \overline{(H = 0)} \cdot (\gamma_C = 0_+) = 1$

commutation freinage pour $C \cdot \overline{(H = 0)} \cdot (\gamma_C = 0_-) = 1$

d) signification des symboles utilisés

V_C	vitesse de consigne
V_R	vitesse réelle du véhicule
V_a	$= (V_R + k' \cdot \gamma_R)$ avec $k' = \frac{\gamma_0}{2\dot{\gamma}_0} + R$
γ_C	consigne d'accélération
γ_R	accélération réelle du véhicule
γ_0	valeur maximum de l'accélération
$\dot{\gamma}_0$	valeur maximum de la dérivée d'accélération
R	temps de retard de l'asservissement d'accélération
H	commande Hâcheur
C	état de sortie du monostable (1 ; 0)
Z	ordre de remise à zéro de la consigne d'accélération

CHAPITRE. III.

ETUDE DU DISPOSITIF D'ELABORATION DES CONSIGNES

Pour chaque fonction de conduite et de régulation, le pilote élabore une vitesse de consigne particulière. La vitesse la plus faible est sélectionnée et envoyée à l'asservissement de vitesse.

Ces consignes sont classées en trois catégories :

- 1°) les consignes d'arrêt en station
- 2°) les consignes de régulation de la vitesse des véhicules
- 3°) les consignes de régulation de trafic.

Les consignes de pilotage (arrêts en station et régulation de vitesse) sont établies par le pilote grâce à des repères passifs placés le long de la voie.

Le dispositif de régulation de trafic utilise, en plus des repères passifs, des informations provenant d'un poste central de commande (fig. 22.).

Nous étudions dans ce chapitre les dispositifs d'élaboration des différentes consignes.

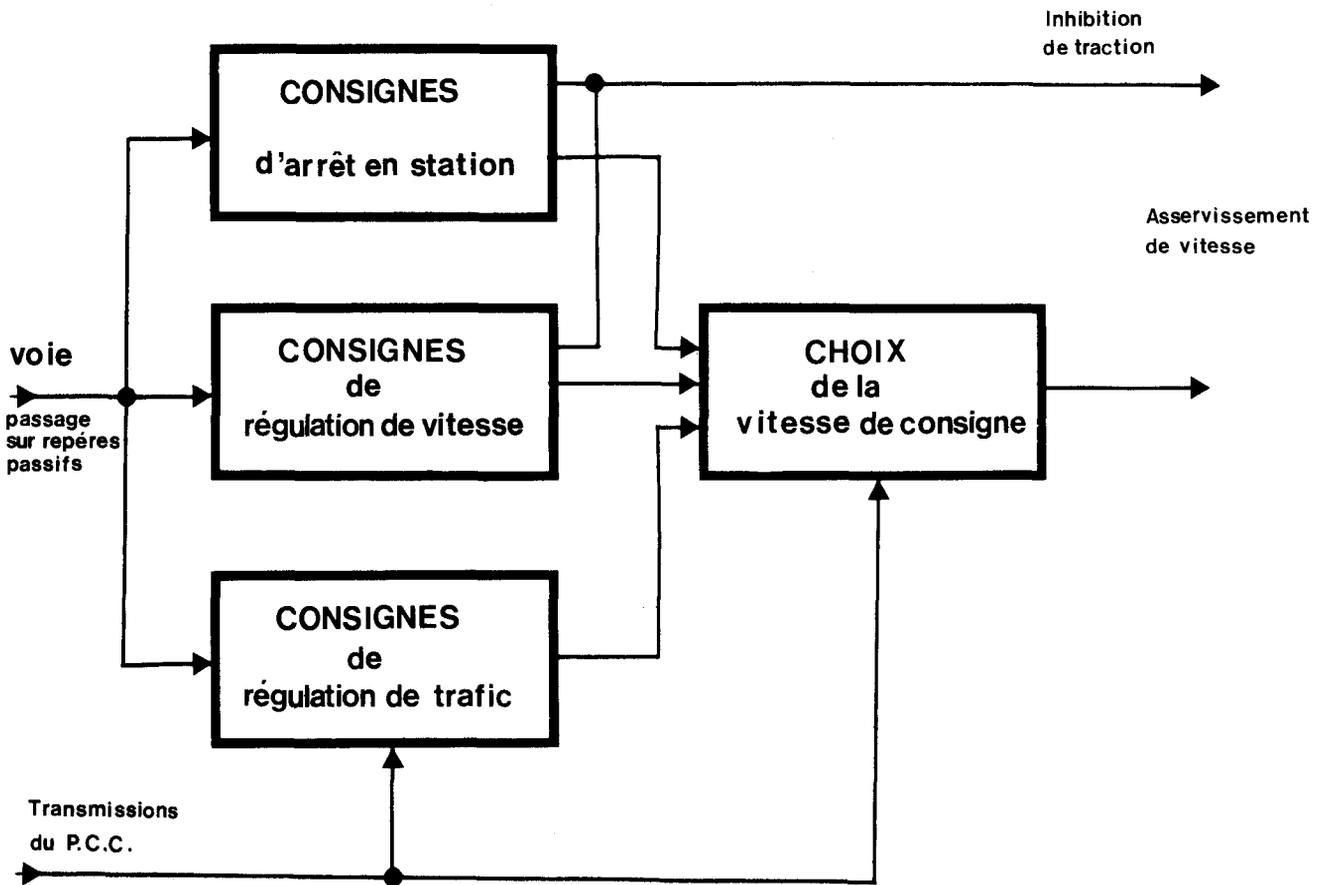


Figure.22.



III.1. CONSIGNE EN PHASE D'ARRIVEE EN STATION

III.1.1. Différentes phases du mouvement d'un véhicule s'arrêtant en station

Le mouvement d'un véhicule s'arrêtant en station comprend 3 phases principales dont la durée dépend de la vitesse et de l'accélération initiale :

- annulation de l'accélération
- commutation traction-freinage
- freinage.

L'annulation de l'accélération et l'établissement du freinage doivent respecter la limitation de dérivée d'accélération. La figure.23. donne les différentes phases du mouvement d'un véhicule s'arrêtant en station.

La précision d'arrêt de $\pm 30\text{cm}$ imposée par le cahier des charges ne peut être obtenue qu'en dosant convenablement l'effort de freinage pendant toute la phase de ralentissement précédant la station.

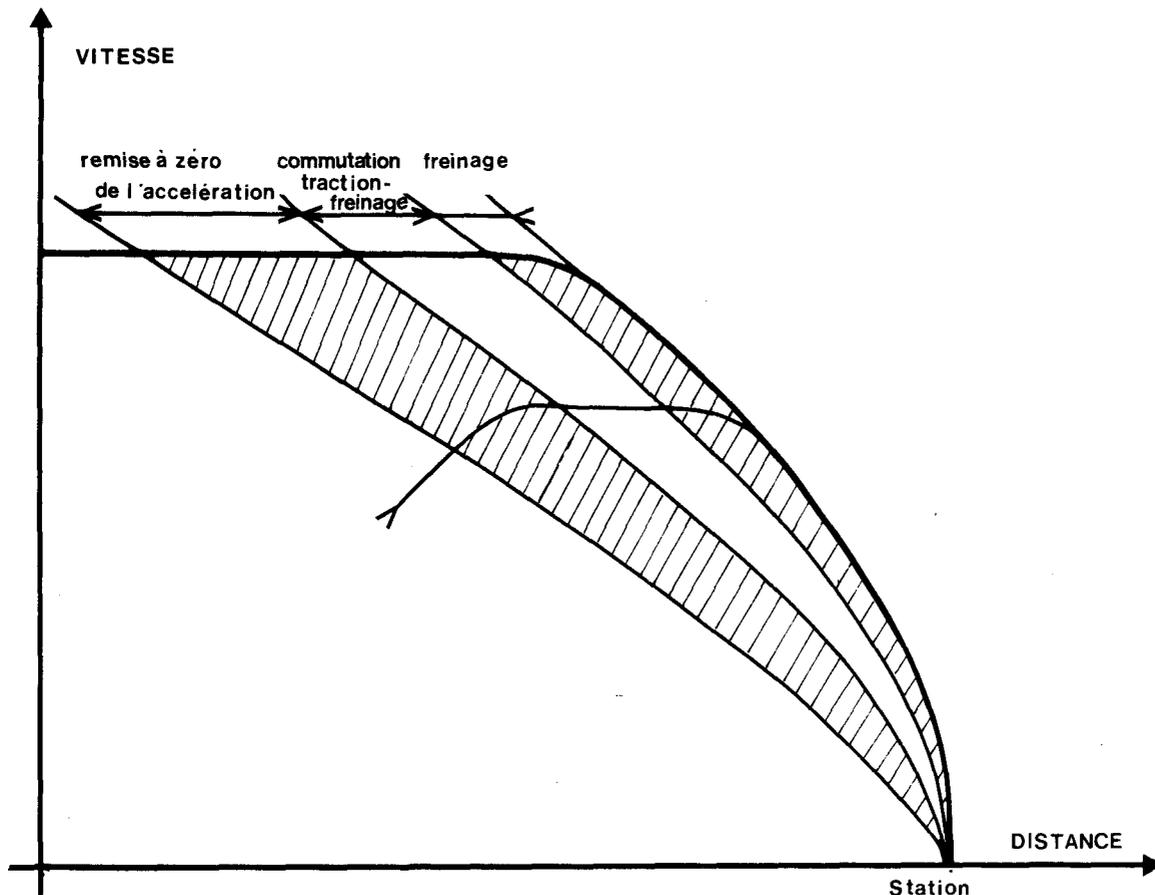


Figure.23.

III.1.2. Processus utilisé pour obtenir l'arrêt d'un véhicule en station

III.1.2.1. Vitesse de consigne

La phase de ralentissement est essentiellement à décélération constante " γ_0 ". Le programme de vitesse en fonction de la distance séparant le véhicule du point d'arrêt est donné par la relation (45) :

$$V_p = \sqrt{2\gamma_0(x_0-x)} \quad (45)$$

V_p = vitesse de programme

γ_0 = décélération nominale

(x_0-x) = distance séparant le véhicule du point d'arrêt.

Pour suivre cette vitesse de programme nous utilisons l'asservissement décrit précédemment. Rappelons que cet asservissement génère une consigne d'accélération fonction de l'écart entre la vitesse de consigne et la vitesse réelle du véhicule.

Le régime permanent est obtenu lorsque la relation (46) est satisfaite :

$$V_c = V_R + k\gamma_c \quad (46)$$

V_c = vitesse de consigne

V_R = vitesse réelle du véhicule

γ_c = consigne d'accélération.

Dans la partie à décélération constante, nous avons :

$$\gamma_c = -\gamma_0 \quad (47)$$

Des relations (45), (46) et (47), nous obtenons la vitesse de consigne permettant au véhicule de suivre le programme de marche idéal ($V_R=V_p$):

$$V_c = \sqrt{2\gamma_0(x_0-x)} - k\gamma_0 \quad (48)$$

III.1.2.2. Contrôle de position

Lorsqu'un véhicule passe à l'abscisse x_R , la vitesse de consigne appliquée à l'entrée de l'asservissement de vitesse est :

$$V_c = \sqrt{2\gamma_0(x_0 - x_R)} - k\gamma_0 \quad (49)$$

A une vitesse V_R légèrement différente de la vitesse de programme V_p , correspond une position x'_R en avance ou en retard sur la position réelle x_R tel que :

$$V_R = \sqrt{2\gamma_0(x_0 - x'_R)} \quad (50)$$

avec : $x'_R = x_R + \Delta x$

Des relations (46), (49) et (50) on obtient la valeur vers laquelle tend la consigne d'accélération pour une erreur de position Δx :

$$\gamma_c \rightarrow -\gamma_0 + \frac{\Delta x}{k\sqrt{\frac{2}{\gamma_0}(x_0 - x_R)}} \quad (51)$$

une erreur $\Delta x > 0$ correspond à une vitesse réelle inférieure à la vitesse de programme, le véhicule défreine pour minimiser cette erreur.

Par ailleurs cette relation montre que la modification de la consigne d'accélération est renforcée au fur et à mesure que l'on s'approche du point d'arrêt.

Remarque

Pour obtenir un contrôle effectif, il est indispensable que la décélération puisse prendre une valeur légèrement inférieure à la valeur nominale $-\gamma_0$.

III.1.3. Elaboration de la vitesse de consigne en phase d'arrêt en station

La vitesse de consigne donnée par la relation (48) peut être générée à bord des véhicules à partir d'une mesure de distance depuis une balise située à la distance x_0 du point d'arrêt.

Nous utilisons une méthode plus simple. Des repères sont placés sur la voie de façon qu'un véhicule décélérant avec la valeur γ_0 passe d'un repère au suivant en un temps constant T_0 . Un simple comptage des repères permet d'obtenir d'une façon quantifiée la vitesse de consigne.

En effet :

$$\gamma_0 = \frac{\Delta v}{\Delta T} \quad (52)$$

entre deux repères la variation de vitesse est :

$$\Delta v = \gamma_0 T_0 \quad (53)$$

la vitesse de consigne est obtenue par la relation :

$$V_c = \gamma_0 T_0 (N_0 - N) \quad (54)$$

N_0 est le nombre total de repères placés entre une balise située au début de la phase de ralentissement et le point d'arrêt.

N est le nombre de repères rencontrés depuis la balise.

La relation entre x_0 et N_0 est obtenue d'après (48) et (54), soit :

$$\sqrt{2\gamma_0(x_0 - x)} - k\gamma_0 = \gamma_0 T_0 (N_0 - N) \quad (55)$$

pour $x = 0$; $N = 0$

Soit :

$$N_0 = \left[\sqrt{\frac{2x_0}{\gamma_0}} - k \right] \frac{1}{T_0} \quad (56)$$

On détermine T_0 et x_0 pour que (56) ait une valeur entière.

La vitesse de consigne donnée par la relation (54) varie par bonds de valeur égale à $V = \gamma_0 T_0$ à chaque passage sur un repère.

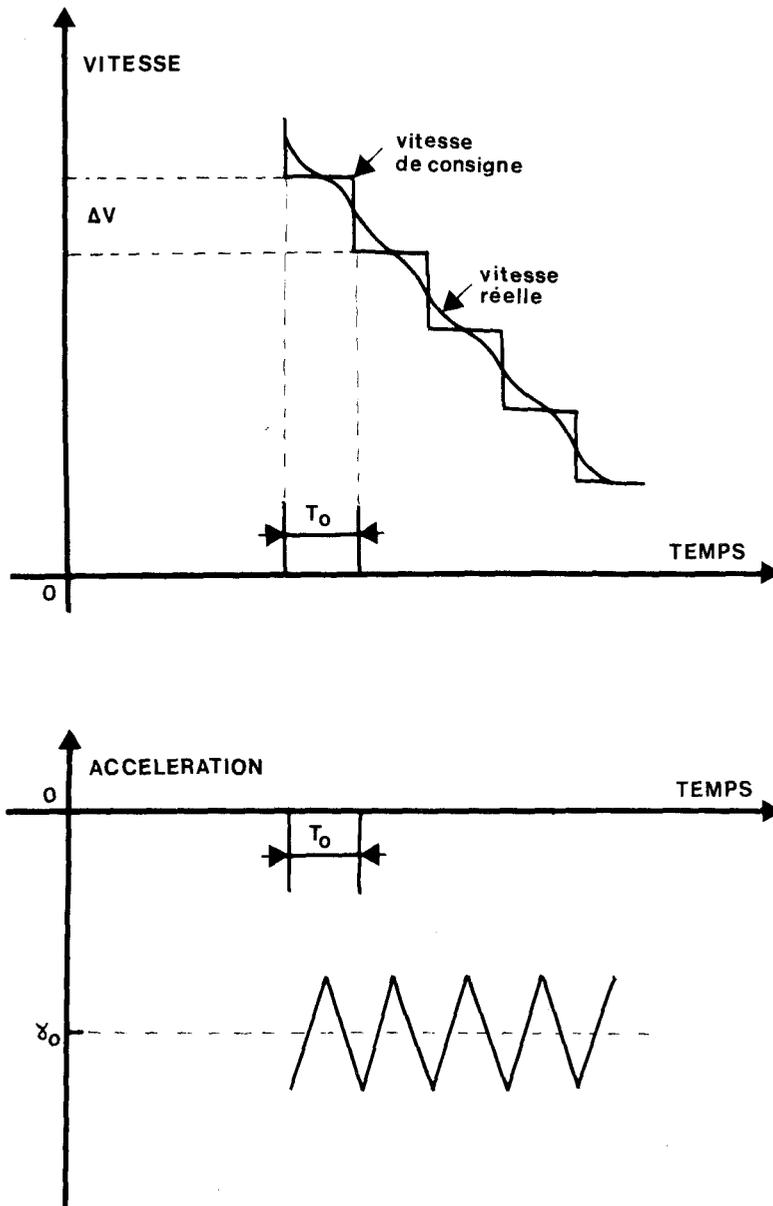


Figure.24.

La figure.24. représente les variations de la vitesse et l'accélération du véhicule lorsque cette vitesse de consigne est directement appliquée à l'entrée de l'asservissement de vitesse.

L'amplitude des variation de l'accélération est donnée par :

$$\Delta\gamma = \frac{\dot{\gamma}_0 T_0}{2} \quad (57)$$

Ce fonctionnement n'est acceptable que si l'accélération ne fluctue pas plus de 10% autour de la valeur nominale. Ceci impose une valeur maximale du temps de passage T_0 entre 2 repères consécutifs :

$$T_0 < \frac{Y_0}{\dot{Y}_0} \times 0,2 \text{ secondes}$$

Si :

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= 1,3\text{m/s}^2 \\ \dot{\gamma}_0 &= 0,65\text{m/s}^3 \end{aligned}$$

On a donc la condition :

$$T_0 < 0,4\text{s}$$

Cette valeur conduit à un nombre de repères supérieur à 40 pour la phase de freinage précédant une station. Ce nombre élevé entraîne des difficultés technologiques pour l'implantation des repères le long de la voie.

C'est pourquoi, pour réduire le nombre de repères, nous réalisons une interpolation linéaire de la vitesse de consigne en fonction du temps.

Lorsque le véhicule suit son programme de marche idéal, il passe d'un repère au suivant pendant le temps T_0 . Dans ce cas, la vitesse de consigne appliquée à l'asservissement de vitesse, décroît linéairement en fonction du temps.

La figure.25. montre les variations de la vitesse de consigne dans les différents cas de fonctionnement possibles.

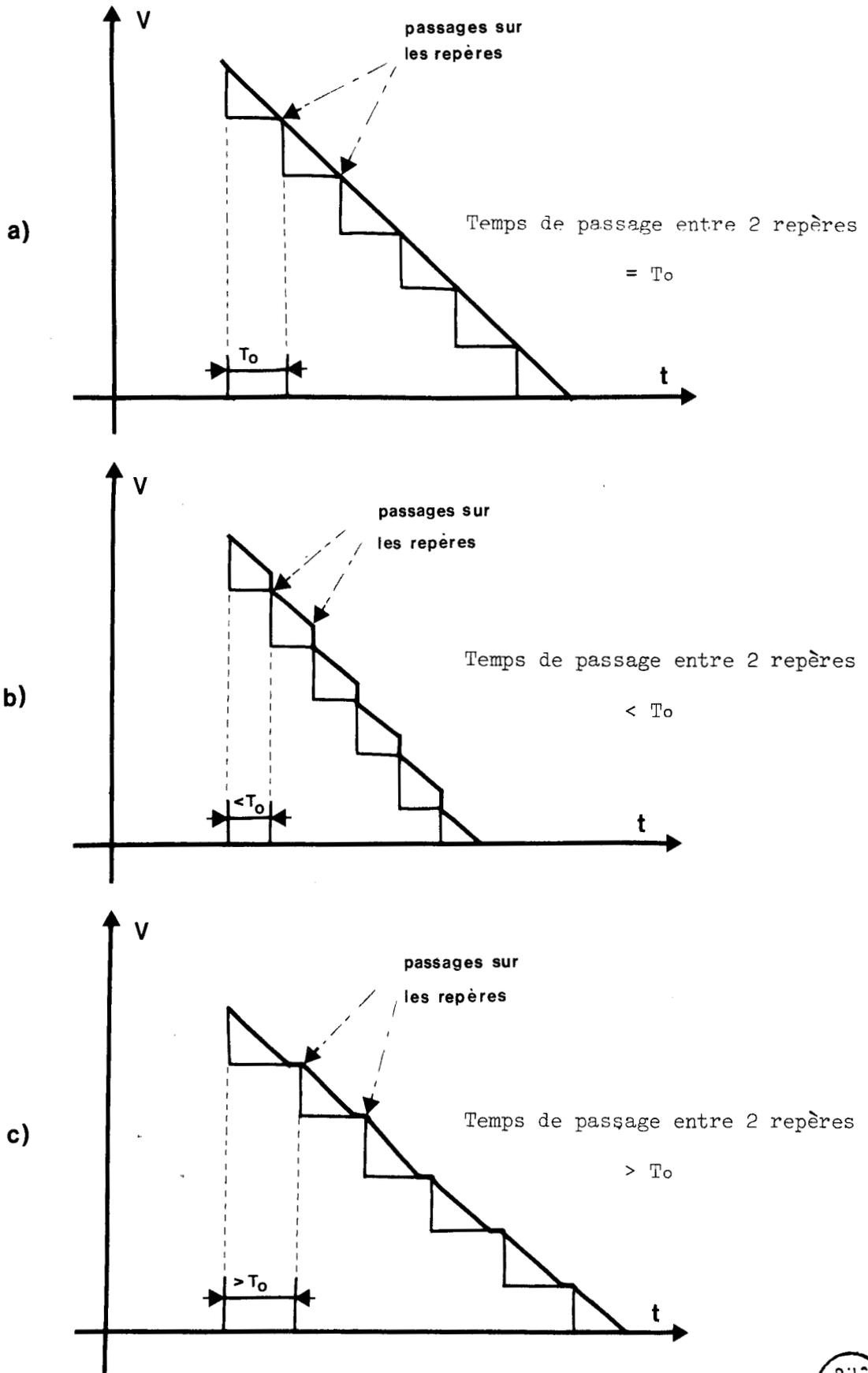


Figure.25.



Le fonctionnement de l'asservissement en phase d'arrêt est le suivant :

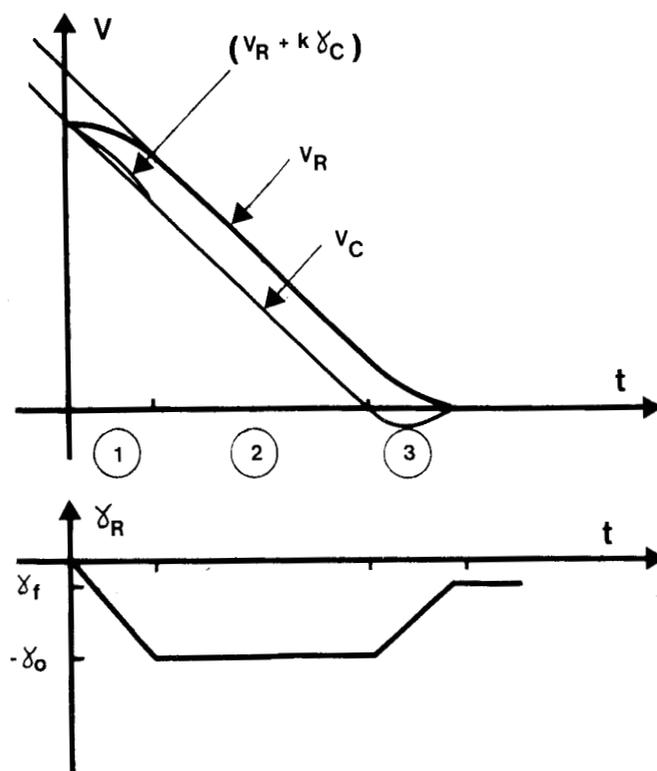


Figure.26.

Zone 1 arrondi supérieur

$$\text{tant que } (V_R + k\gamma_C) > V_C$$

γ_R décroît comme γ_C jusque la valeur nominale $-\gamma_0$.

Zone 2 décélération constante

$$\gamma_R = \gamma_C = -\gamma_0$$

Nous avons en permanence :

$$(V_R + k\gamma_C) = V_C$$

Si la vitesse de la rame s'écarte de la vitesse de programme, la consigne d'accélération est modifiée de façon à minimiser l'erreur.

Zone 3 arrondi inférieur

La vitesse de consigne reste nulle et la consigne d'accélération décroît puisque l'on a :

$$(V_R + k\gamma_C) < 0$$

La vitesse s'arrête avec une décélération correspondant au couple résistant.

III.1.4. Etude de la précision d'arrêt

La précision d'arrêt de $\pm 30\text{cm}$ doit être obtenue dans tous les cas de fonctionnement possibles. Toutefois nous séparons l'étude du fonctionnement normal correspondant à des vitesses d'approche de station supérieures à 10m/s du fonctionnement perturbé où la vitesse du véhicule est inférieure à 10m/s en approche de la station.

III.1.4.1. Influence du temps de passage théorique T_0 entre 2 repères

La planche.13. obtenue par simulation numérique montre l'influence du paramètre T_0 sur la précision d'arrêt. Les différentes courbes donnent la précision d'arrêt en fonction de la vitesse initiale à l'approche de la station pour différentes valeurs de T_0 .

Chaque courbe comprend 2 régions caractéristiques séparées par l'axe vertical.

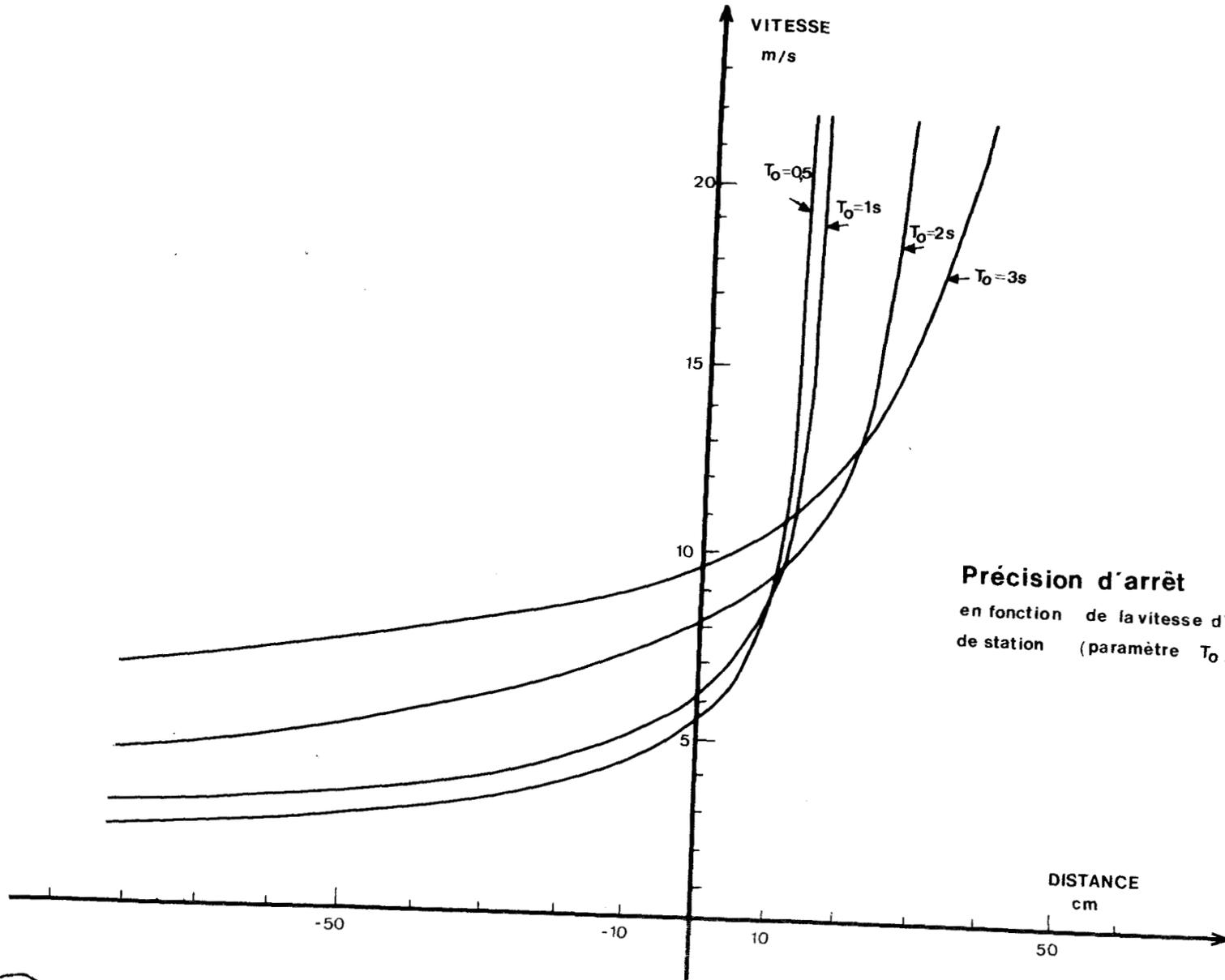
Sur la partie gauche, les courbes sont pratiquement horizontales. Les arrêts sont très imprécis quelque soit la valeur de T_0 et correspondent à un fonctionnement perturbé que nous étudierons ultérieurement.

Au-dessus de 10m/s, nous remarquons que la précision d'arrêt augmente lorsque T_0 diminue. Cependant ce graphique montre qu'il n'est pas nécessaire de diminuer T_0 en-dessous de 1 seconde. En effet pour cette valeur de T_0 le graphique montre que tous les arrêts se situent dans une fourchette en distance inférieure à 10 cm.

III.1.4.2. Influence de la digitalisation de la consigne d'accélération

L'asservissement de vitesse que nous avons réalisé donne une consigne d'accélération digitalisée. Le temps de calcul élémentaire T_1 correspondant à l'incrément minimum $\Delta\gamma$ de la consigne d'accélération est :

$$T_1 = \frac{\Delta\gamma}{\dot{\gamma}_0}$$



Précision d'arrêt
 en fonction de la vitesse d'approche
 de station (paramètre T_0)



Dans le cas le plus défavorable, lorsque la relation :

$$V_c = V_R + k\gamma_c$$

n'est plus satisfaite, il peut donc s'écouler un temps T_1 avant que l'on soit en mesure d'apporter une correction de la consigne d'accélération.

Tout se passe comme si la détection des repères se faisait avec une incertitude sur la distance égale à :

$$\Delta x = V_R T_1$$

Au fur et à mesure que le véhicule s'approche du point d'arrêt, cette incertitude diminue proportionnellement à la vitesse du véhicule.

La simulation numérique montre que la précision d'arrêt est de :

- 30cm pour $T_1 = 125\text{ms}$

- 15cm pour $T_1 = 62,5\text{ms}$.

Ces valeurs sont obtenues en prenant pour T_0 (temps de passage entre 2 repères) la valeur minimale c'est-à-dire : $T_0 = T_1$.

En fixant T_0 à 1 seconde et T_1 à 62,5ms, la précision d'arrêt obtenue pour une vitesse d'arrivée en station comprise entre 6,5 et 22,1m/s est d'environ 20cm.

11.1.4.3. Autres facteurs intervenant sur la précision d'arrêt

La simulation numérique a fait apparaître que la précision de mesure de la vitesse est un facteur déterminant sur la précision d'arrêt.

Une erreur de $\pm 5\%$ de la mesure de vitesse entraîne une erreur de position de l'arrêt de $\pm 30\text{cm}$. Par contre des variations de 30% de la masse du véhicule et de 50% du temps de réponse de l'asservissement d'accélération entraînent une incertitude du point d'arrêt inférieure à 15cm.

La précision d'arrêt de $\pm 30\text{cm}$ est donc *facilement obtenue* même en cas de variations importantes de la masse du véhicule (charge en passagers) ; de l'effort résistant ; et des constantes de temps des organes électro-mécaniques, sous réserve d'une bonne précision de l'organe mesurant la vitesse du véhicule.

On peut montrer qu'il est possible d'accroître la précision de l'arrêt même avec des erreurs de mesure de la vitesse de $\pm 10\%$ en utilisant un asservissement⁽⁴⁾ de position sur les derniers mètres avant la position d'arrêt (c'est ce qui est réalisé dans le pilote MATRA).

III.1.5. Remise à zéro de l'accélération et commutation traction-freinage

La distance du point d'arrêt à laquelle il faut remettre à zéro l'accélération de la rame dépend de sa vitesse et de son accélération.

Cette distance D peut se décomposer en différentes parties (figure.27.).

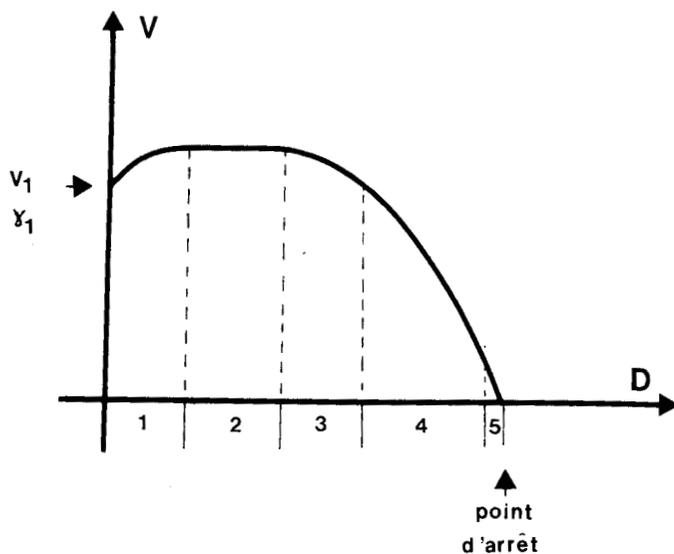


Figure.27.

1. Accélération décroissante (remise à zéro de la consigne d'accélération)

. durée
$$t_1 = \frac{\gamma_1}{\dot{\gamma}_0} \quad (58)$$

. longueur
$$D_1 = \left(v_1 \frac{\gamma_1}{\dot{\gamma}_0} + \frac{1}{3} \frac{\gamma_1^3}{\dot{\gamma}_0^2} \right) \quad (59)$$

Cette phase n'existe que si le véhicule est en période d'accélération avant l'entrée en station. ($\gamma_1 > 0$)

2. Commutation traction-freinage

. durée τ (60)

en première approximation nous pouvons considérer que la vitesse reste constante pendant cette phase.

. longueur $D_2 = \tau \left(V_1 + \frac{\gamma_1^2}{2\dot{\gamma}_o} \right)$ (61)

3. Décélération croissante

. durée $\frac{\gamma_o}{\dot{\gamma}_o}$ (62)

. longueur $D_3 = \left(V_1 + \frac{\gamma_1^2}{2\dot{\gamma}_o} \right) \frac{\gamma_o}{\dot{\gamma}_o} - \frac{1}{6} \frac{\gamma_o^3}{\dot{\gamma}_o^2}$ (63)

4. Décélération constante

. durée : $\frac{V_1 + \frac{\gamma_1^2}{2\dot{\gamma}_o}}{\gamma_o} - \frac{\gamma_o}{\dot{\gamma}_o}$ (64)

. longueur : $D_4 = \frac{V_1 + \frac{\gamma_1^2}{2\dot{\gamma}_o}}{2\gamma_o} - \frac{1}{2} \left(V_1 + \frac{\gamma_1^2}{2\dot{\gamma}_o} \right) \frac{\gamma_o}{\dot{\gamma}_o}$ (65)

5. Décélération décroissante

. durée $\frac{\gamma_o}{\dot{\gamma}_o}$ (66)

. longueur $D_5 = \frac{1}{6} \frac{\gamma_o^3}{\dot{\gamma}_o^2}$ (67)

La longueur totale D est donc égale à :

$$D = \frac{\left(V_1 + \frac{\gamma_1^2}{2\dot{\gamma}_o} \right)}{2\gamma_o} + \left(V_1 + \frac{\gamma_1^2}{2\dot{\gamma}_o} \right) \left(\frac{1}{2} \frac{\gamma_o}{\dot{\gamma}_o} + \tau + \frac{\gamma_1}{\gamma_o} \right) - \frac{1}{6} \frac{\gamma_1^3}{\dot{\gamma}_o^2} \quad (68)$$

Pour simplifier le calcul de la distance au point d'arrêt à laquelle il faut remettre à zéro l'accélération, nous envisageons le cas le plus défavorable correspondant à l'approche de station à l'accélération maximale $\gamma_1 = \gamma_0$. Cette simplification est sans conséquence puisqu'en fonctionnement normal chaque véhicule se présente en station avec une accélération nulle. La relation (68) devient :

$$D = \frac{V_1^2}{2\gamma_0} + V_1 \left(2 \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} + \tau \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_0^2}{\dot{\gamma}_0} \left(\frac{17}{12} \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} + \tau \right) \quad (69)$$

soit, pour $\tau = 2s$; $\gamma_0 = 1,3m/s^2$ et $\dot{\gamma}_0 = 0,65m/s^3$

$$D = \frac{V_1^2}{2,6} + 6V_1 + 6,283 \text{ mètres} \quad (70)$$

Pour obtenir l'ordre de remise à zéro de l'accélération, il suffit de comparer la vitesse du véhicule à la vitesse V_1 liée à la distance du véhicule du point d'arrêt par la relation (69).

Nous remarquons que cette relation est similaire à celle donnant la vitesse de consigne en phase d'arrêt :

$$V_c = \sqrt{2\gamma_0 D} - k\gamma_0 \quad (71)$$

ou encore :

$$D = \frac{V_c^2}{2\gamma_0} + \frac{kV_c}{2} + \frac{k^2 \gamma_0}{2} \quad (72)$$

soit pour $k = 1,25$ et $\gamma_0 = 1,3m/s^2$:

$$D \neq \frac{V_c^2}{2,6} + 0,81V_c + 1,01 \text{ mètres} \quad (73)$$

La figure.28. représente les vitesses V_c et V_1 en fonction de la distance "D" du véhicule au point d'arrêt.

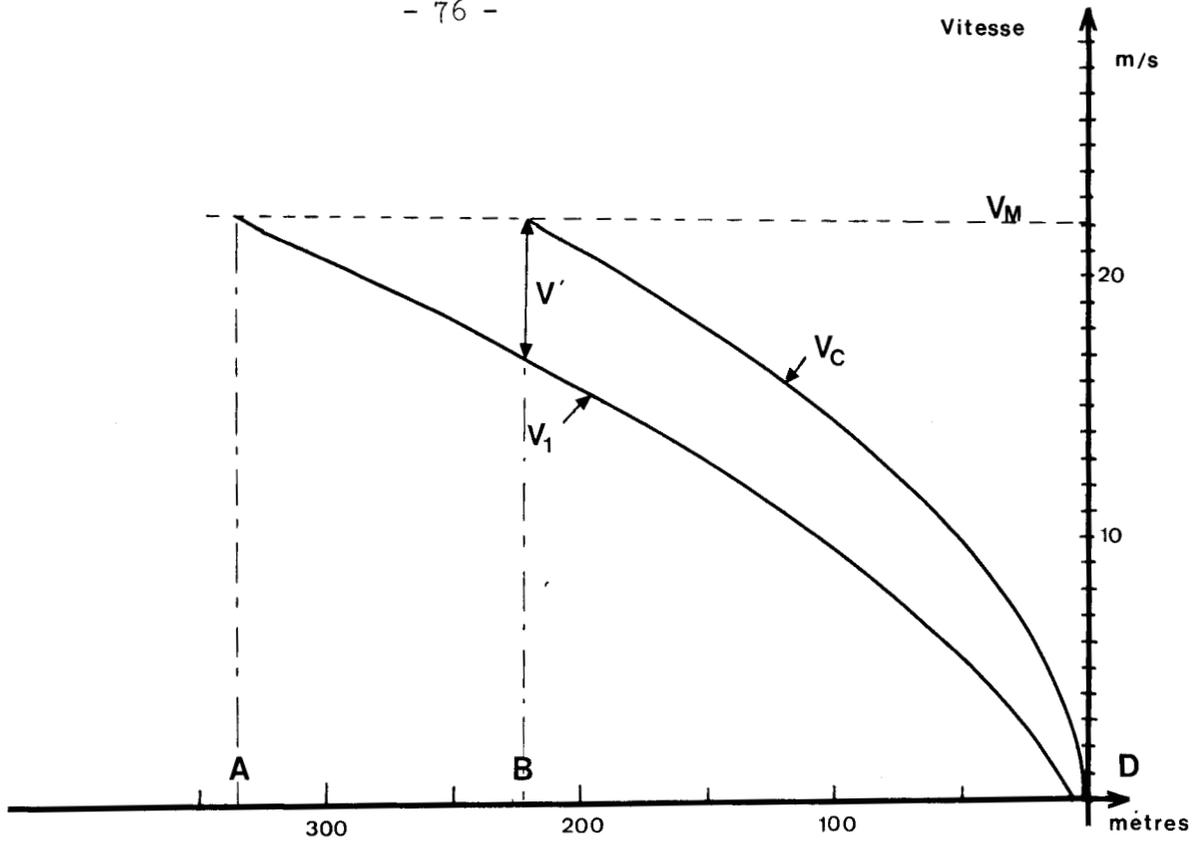


Figure.28.

Nous remarquons qu'il est possible d'obtenir une valeur approchée de V_1 par une translation verticale de la vitesse de consigne d'une valeur V' . Nous appelons V_z cette valeur approchée :

$$V_z = V_c - V' \quad (74)$$

Pour élaborer la consigne V_z jusque la vitesse maximale, la vitesse de consigne est prolongée au-delà de la vitesse maximale.

Le compteur servant à établir la vitesse de consigne est donc incrémenté plus tôt (point A au lieu du point B (figure.28.)).

Entre ces points, les repères sont régulièrement espacés, la vitesse de consigne décroît donc linéairement en fonction de la distance, et l'on a (V_M étant la vitesse maximum autorisée en approche d'une station) :

$$D = \frac{(V_M + k\gamma_0)^2}{2\gamma_0} + \frac{V_M}{\gamma_0} [V_c - V_M] \quad (75)$$

ou encore :

$$D = \frac{(V_M + k\gamma_0)^2}{2\gamma_0} + \frac{V_M}{\gamma_0} [V_Z + V' - V_M] \tag{76}$$

Pour une vitesse du véhicule égale à V_Z , la distance donnée par la relation (76) doit être supérieure ou égale à la valeur donnée par la relation (69), soit :

$$\frac{V_M}{\gamma_0} [V + V' - V_M] + \frac{(V_M + k\gamma_0)^2}{2\gamma_0} \geq \frac{V^2}{2\gamma_0} + V \left(\frac{2\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} + \tau \right) + \frac{1}{2} \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} \left(\frac{17}{12} \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} + \tau \right)$$

Dans notre cas cette inégalité est vérifiée pour :

$$V' = 6,5 \text{ m/s}$$

La figure.29. représente la vitesse V_Z obtenue par translation de la vitesse de consigne.

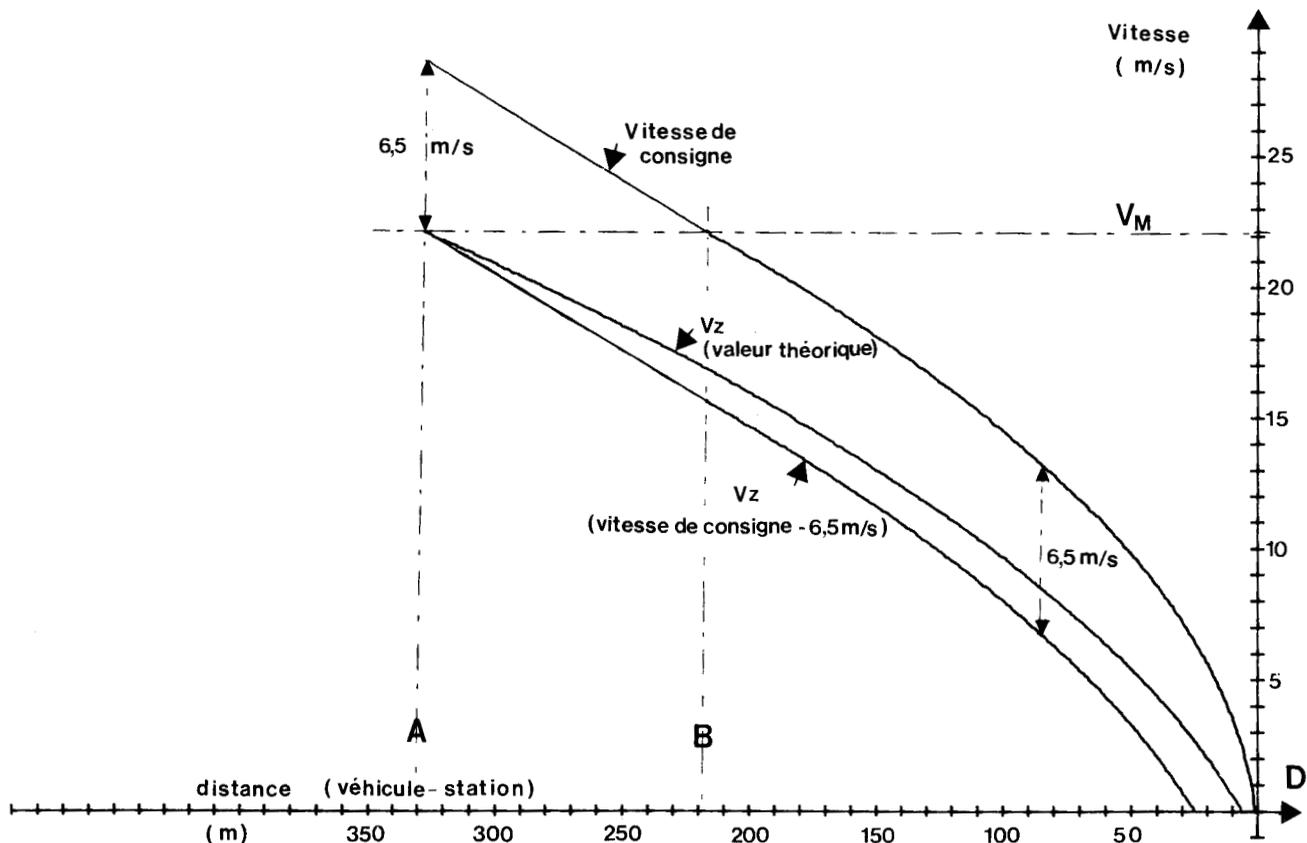


Figure.29.

Il est possible d'établir de la même façon une consigne assurant la commutation traction freinage. Toutefois pour ne pas alourdir notre système, nous procédons de la façon suivante :

Lorsque la vitesse réelle est supérieure à V_z , la consigne d'accélération décroît jusque zéro et change de signe. La commutation traction freinage est effectuée après le délai " θ " correspondant au retard maximum de l'asservissement d'accélération majoré du temps nécessaire pour annuler la commande hâcheur (dans notre cas $\theta = 0,25s$).

En fonctionnement normal, l'accélération du véhicule est pratiquement nulle en approche de station. Le temps nécessaire à la remise à zéro de la consigne d'accélération est très faible et la commutation traction - freinage a lieu avant le lieu théorique donné par la figure.23. Le véhicule reste alors en marche sur l'erre tant que $V_R < V_C$. La perte de temps due à cette simplification est inférieure à 1 seconde par arrêt en station.

III.1.6. Arrêts en station dégradés

Dans certains cas, par exemple à la suite d'un arrêt en ligne engendré par les dispositifs de sécurité ou de régulation, une rame peut se présenter avec une vitesse d'approche inférieure à 10m/s.

L'arrêt se produit alors avant le point d'arrêt théorique (Planche.13.). Par ailleurs si l'arrêt se produit dans les 26 mètres précédant la station (figure.29.), il reste immobilisé puisque V_z est nul dans cette zone.

Il est donc indispensable d'établir une consigne supplémentaire pour permettre au véhicule d'arriver jusqu'à la station dans ce cas particulier.

Il est donc indispensable d'établir une consigne supplémentaire pour permettre au véhicule d'arriver jusqu'à la station dans ce cas particulier.

Lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- . $V_z = 0$
- . $V_R < 0,3\text{m/s}$
- . distance du véhicule au point d'arrêt $> 30\text{cm}$
(ce point peut par exemple être matérialisé sur la voie par le dernier repère avant l'arrêt en station).

Le véhicule a la possibilité de passer en traction et une vitesse de consigne égale à 0,2m/s est imposée au véhicule.

L'arrivée en station a alors lieu à vitesse constante et la vitesse de consigne s'annule à 30cm du point d'arrêt, ce qui permet d'obtenir la précision d'arrêt de $\overset{+}{-}30\text{cm}$ et l'ouverture des portes.

III.1.7. Frein de parking

A chaque arrêt un frein de stationnement assure l'immobilisation du véhicule quelle que soit la pente de la voie. Celui-ci est actionné lorsque la vitesse réelle du véhicule est inférieure à 0,2m/s et que la vitesse de consigne est nulle.

III.2. REGULATION DE LA VITESSE DES VEHICULES

Compte tenu d'une part du rendement énergétique et d'autre part des conditions de confort et de dynamique à respecter dans les courbes il est nécessaire d'imposer en chaque point de la voie une vitesse maximum à ne pas dépasser. Nous appellerons cette vitesse :

$$V_M \text{ (vitesse maximum)}$$

En alignement droit la valeur $V_M = 80 \text{ km/h}$ est demandée par le cahier des charges.

En courbe on doit avoir :

$$V_M = \sqrt{0,23 g R} \quad (77)$$

g est l'accélération de la pesanteur
 R est le rayon de courbure de la voie.

Il est évident qu'en passant d'une courbe à un alignement droit, ou vice-versa le véhicule ne peut pas changer instantanément de vitesse.

On appelle vitesse de programme V_p la loi de vitesse que doit suivre le véhicule en chaque point de la voie pour que sa vitesse réelle s'inscrive au plus près des vitesses maximum sans jamais les dépasser.

La figure.30. montre un exemple de vitesse de programme (courbe $V_p = f(D)$ qui s'inscrit à l'intérieur du polygone des vitesses maximales : $V_M = f(D)$).

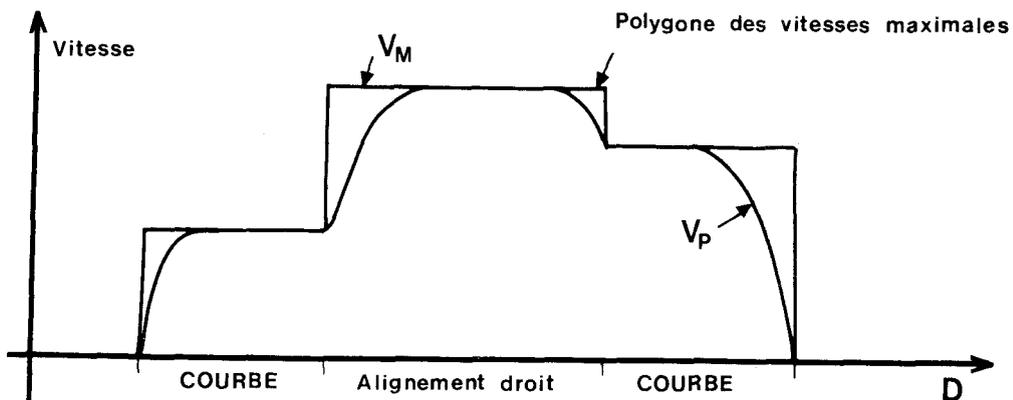


Figure.30.

Dans notre système, la vitesse de consigne qui est appliquée à l'entrée de l'asservissement décrit au chapitre.II.est donnée par l'état d'un compteur N'tel que :

$$V_c = N \cdot \gamma_0 \cdot T_0 \quad (78)$$

Pendant les phases de transitions, le compteur N'est incrémenté d'une unité à chaque repère rencontré par le véhicule. En dehors de ces phases, l'état du compteur reste fixe et l'on a :

$$V_c = V_p.$$

Des balises passives placées le long de la voie indiquent si le compteur doit être incrémenté positivement (augmentation de V_p) ou négativement (diminution de V_p) ou s'il faut maintenir le compteur à une valeur constante.

III.2.1. Augmentation de la vitesse de programme

Pour atteindre la vitesse maximum en un temps minimum, la consigne d'accélération doit croître le plus rapidement possible. Ceci est réalisé lorsque l'inégalité (79) est satisfaite :

$$V_c > (V_R + k\gamma_c) \quad (79)$$

Pour cette raison, à la fin de chaque courbe, on ajoute une constante C_1 au contenu du compteur N!

La valeur de cette constante doit satisfaire en permanence la relation (79) :

$$\begin{aligned} \text{pour } V_R &= V_p \\ \text{et } \gamma_c &= \gamma_0 \end{aligned}$$

Nous obtenons :

$$C_1 = \frac{(V_c - V_p)}{\gamma_0 T_0} \geq \frac{k}{T_0} \quad (80)$$

Pour $k = 1,25s$ et $T_0 = 1s$, la valeur entière de C_1 la plus faible satisfaisant cette relation est égale à 2.

Le compteur N est ensuite incrémenté positivement de 1 unité à chaque repère rencontré. Ces repères sont placés de façon qu'un véhicule suivant la vitesse de programme en rencontre un toutes les T_0 secondes. (figure.31.).

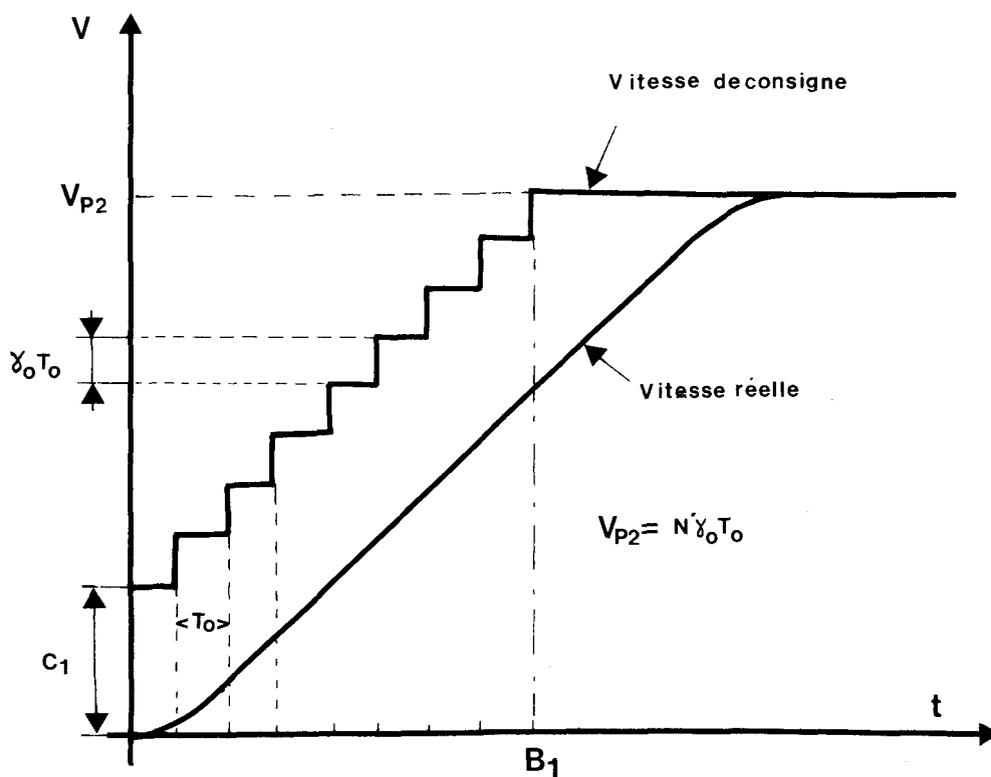


Figure.31.

Il en résulte que dans les zones de montée en vitesse on a $V_c > V_p$ mais ceci est sans importance car l'accélération du véhicule est limitée à la valeur $\gamma_0 = 1,3m/s^2$ par son pilote. La majoration de V_c est précisément réalisée pour faire venir l'asservissement d'accélération du pilote en butée et s'assurer ainsi de la montée en vitesse à l'accélération maximum.

Pour obtenir la nouvelle vitesse de palier V_{p2} , il suffit d'arrêter l'évolution du compteur lorsqu'il atteint la valeur :

$$N'_2 = \frac{V_{p2}}{\gamma_0 T_0} \quad (81)$$

Ceci pourra être réalisé simplement en plaçant sur la voie une balise B_1 à une position que l'on peut déterminer (Annexe.3.).

La vitesse de consigne restera alors constante et égale à V_{p2} . Pour modifier à nouveau la vitesse limite, il faudra placer une balise B_2 qui autorisera à nouveau le comptage des repères avec un incrément initial C_1 tel que nous venons de le définir.

Dans le cas particulier d'un départ de station, l'information "temps d'arrêt terminé" aura le même effet qu'une balise B_2 .

De même il ne sera pas nécessaire de placer une balise B_1 pour donner l'indication "vitesse maximum 80km/h" puisqu'il suffit de décoder la valeur particulière :

$$N' = \frac{V_{Mx}}{\gamma_0 T_0}$$

et d'arrêter à cet instant l'incrémentation du compteur.

Remarque

Le cas particulier où l'écart $V_{p2} - V_{p1}$ est inférieur à $\gamma_0 T_0 C_1$ (2,6m/s dans notre cas) sera traité plus loin.

III.2.2. Diminution de la vitesse de programme

Comme pour un arrêt en station une balise passive (B_3) autorise le décomptage des repères rencontrés depuis cette balise.

Nous avons vu dans le paragraphe.III.1. concernant l'arrêt en station que la vitesse de consigne décroît de la valeur (V_M+V') pour assurer un arrêt correct quelle que soit la vitesse du véhicule en approche de station. Au passage sur la balise B_3 on ajoute donc au contenu du compteur N'_1 une constante C_2 telle que :

$$C_2 = \frac{V'}{\gamma_0 T_0} \quad (82)$$

Pour $V' = 6,5\text{m/s}$

$$\gamma_0 = 1,3\text{m/s}^2$$

$$T_0 = 1\text{s}$$

$$\text{nous avons : } C_2 = 5.$$

Le fonctionnement du pilote automatique est alors le même que pour un arrêt en station.

Lorsque l'état du compteur atteint la valeur particulière N'_2 correspondant à la vitesse de programme V_{p2} telle que :

$$N'_2 = \frac{V_{p2}}{\gamma_0 T_0}$$

une balise B_1 arrête l'évolution du compteur et supprime la consigne de remise à zéro de l'accélération.

La figure.32. montre l'action des différentes balises pour un programme de vitesses typiques comprenant tous les cas possibles.

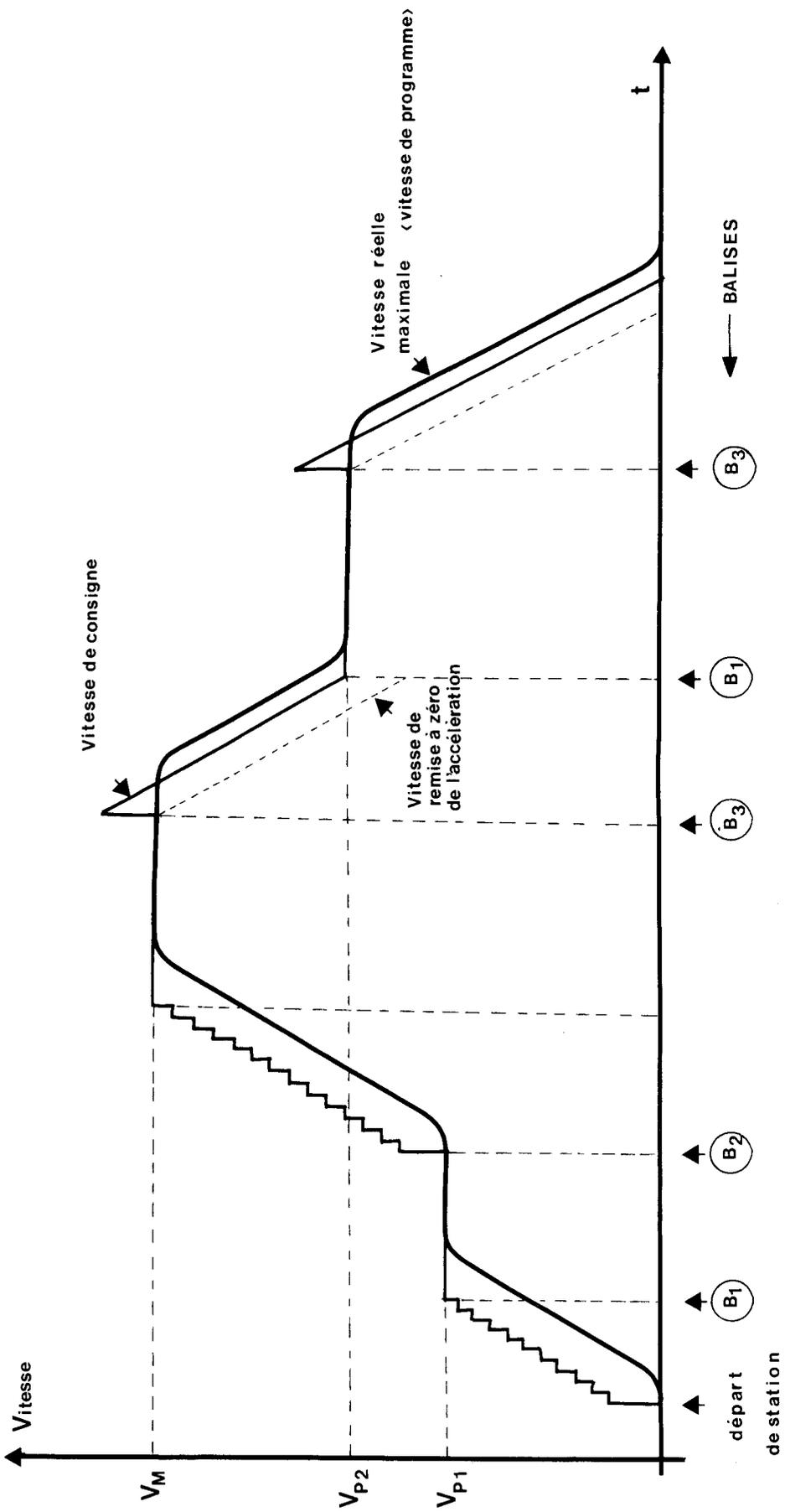


Figure.32.

III.2.3. Cas particulier où l'augmentation de V_p est inférieure à $C_1 \gamma_0 T_0$

Dans ce cas on ne peut pas utiliser les balises B_1 et B_2 car on obtiendrait une vitesse limite supérieure à la vitesse limite souhaitée. Par contre si l'on place une balise B_3 , l'incrémentatation C_2 du compteur autorise une augmentation de la vitesse limite de 6,5 m/s. On placera alors après la balise B_3 une balise B_1 qui ajustera la vitesse limite V_{p2} à la valeur souhaitée (figure.33.).

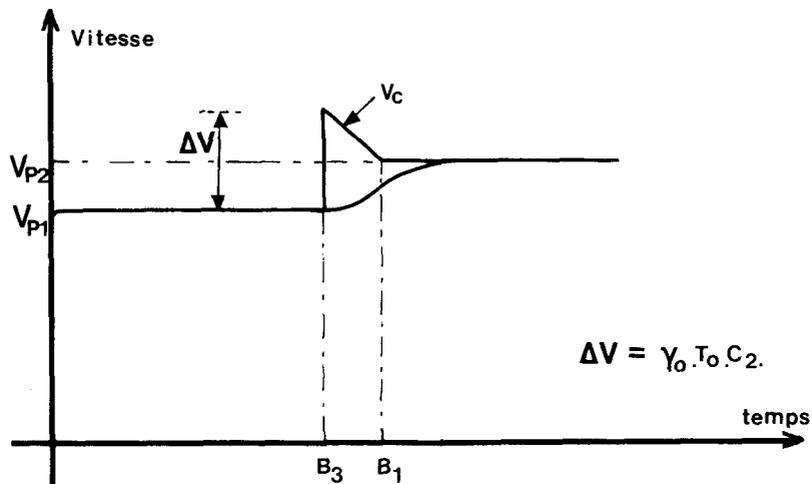


Figure 33

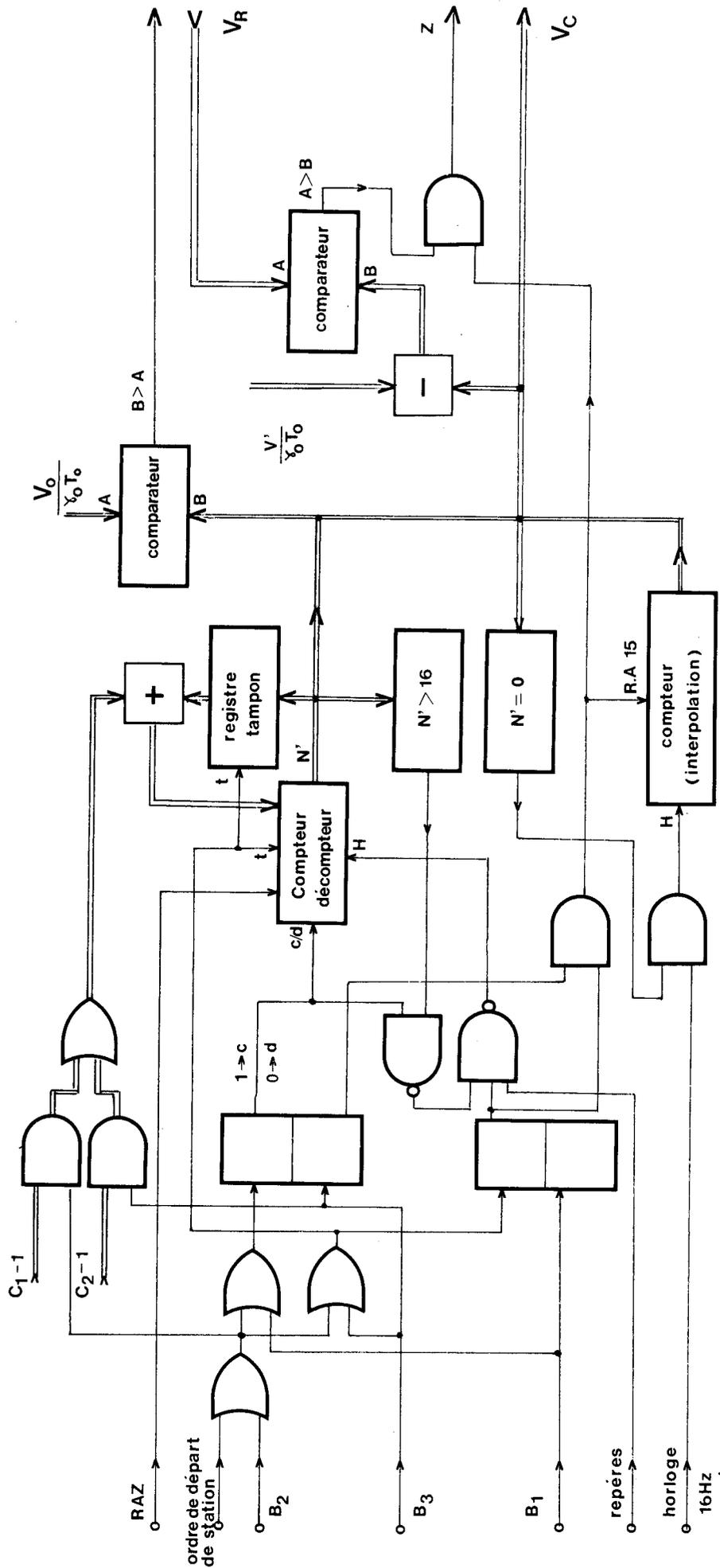
III.2.4. Limitation de vitesse exceptionnelle

Dans le cas où l'on désire faire ralentir exceptionnellement l'ensemble des véhicules jusqu'à une vitesse V_E en un endroit précis de la ligne, il suffit d'ajouter des balises le long de la voie de façon à placer le compteur dans l'état N' tel que :

$$N' = \frac{V_E}{\gamma_0 T_0} \quad (83)$$

Il est bien évident que dans ce cas, la loi d'évolution de la vitesse en fonction de la distance ne suis plus une loi parabolique puisque les repères sont implantés sans tenir compte de cette limitation.

La figure.34. donne le schéma de principe proposé pour obtenir la vitesse de consigne assurant la régulation de la vitesse des véhicules.



Elaboration de la vitesse de consigne assurant la régulation de vitesse

figure 34



III.3. CONSIGNES ASSURANT LA REGULATION DU TRAFIC

III.3.1. Principe général

Chaque véhicule détermine son retard par rapport à son horaire en faisant la différence entre le nombre "N" d'impulsions de période T_0 émises par le P.C.C. et le nombre "n" de repères rencontrés depuis son injection sur la ligne.

Si les repères sont distribués le long de la ligne de façon qu'un véhicule qui suit correctement son horaire rencontre un repère toutes les T_0 secondes, la différence $(N-n)$ entre ces deux nombres reste constante en moyenne. Pendant le temps d'arrêt prévu pour chaque station, les impulsions périodiques T_0 ne sont pas comptabilisées. En fait un seul compteur-décompteur de capacité réduite fait directement la différence $(N-n)$ (figure.35.).

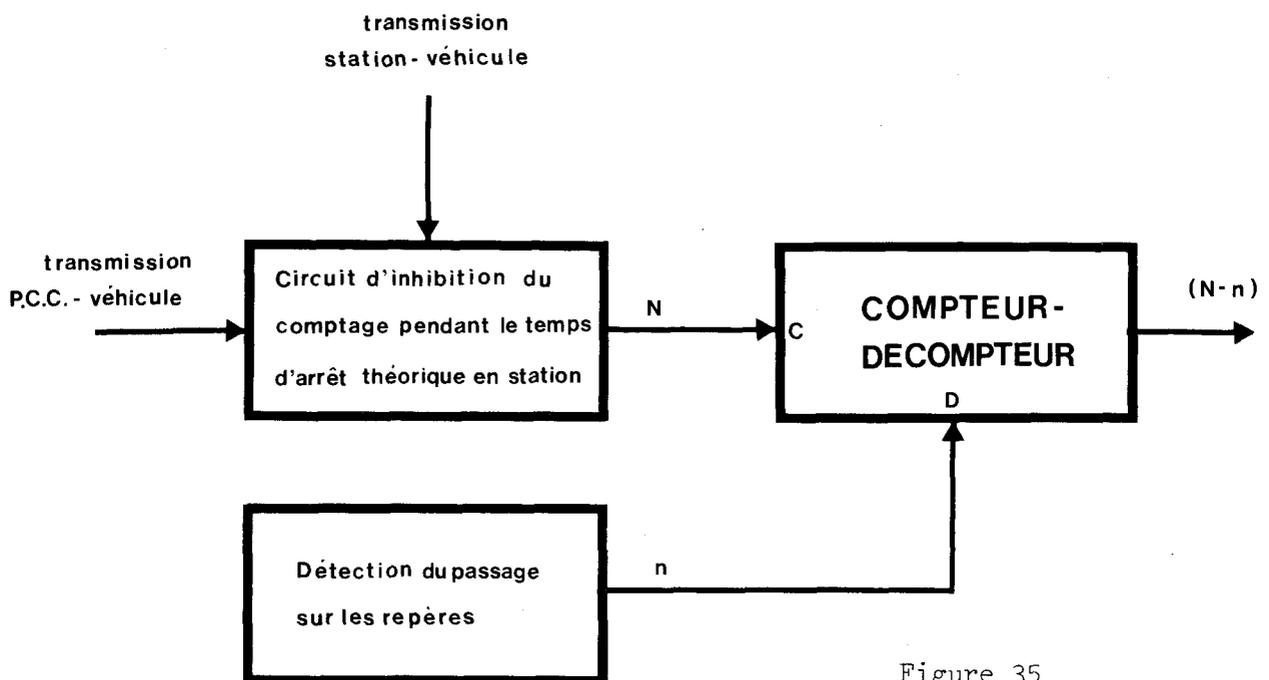


Figure 35

III.3.2. Disposition des repères le long de la ligne

Il est judicieux de placer les repères pour qu'ils soient lus toutes les T_0 secondes par un véhicule roulant à la vitesse maximale. En effet cette disposition déjà utilisée pour la phase d'approche de station permet de réaliser simplement le dispositif de sécurité anti-survitesse.

Un arrêt d'urgence est déclenché lorsqu'un véhicule passe d'un repère au suivant en un temps inférieur à αT_0 ($\alpha = \text{coefficient} < 1$).

Cette disposition complique très légèrement le dispositif de régulation d'horaire.

En effet, dans les alignements droits, dans le cas du VAL, la vitesse de programme est de 60km/h pour un véhicule qui suit son horaire théorique mais la vitesse maximum est de 80km/h pour permettre à un véhicule en retard de se recalibrer sur son horaire.

Par suite un véhicule qui n'est pas en retard et qui roule à 60km/h, rencontre durant le parcours de l'alignement droit, davantage d'impulsions T_0 qu'il n'aura compté de repères. Le rapport entre les deux nombre est exactement de 4/3.

Pour remédier à cet effet il suffit d'incrémenter de 4/3 le contenu n du compteur de repères.

Ceci peut être fait très facilement en ajoutant une unité au contenu du compteur à chaque fois qu'il a compté 3 repères.

Ceci implique qu'il n'y ait pas de vitesse limite comprise entre 60 et 80 km/h ce qu'on peut réaliser facilement en imposant une vitesse limite de 60km/h pour toutes les courbes de rayons de courbure compris entre $R(80\text{km/h}) = 220\text{m}$ et $R(60\text{km/h}) = 125\text{m}$.

Les courbes de rayon de courbure supérieur à 220m sont considérées comme des alignements droits.

Toutefois pendant les phases d'accélération ou de freinage, le rapport entre la vitesse de régime accéléré et la vitesse de régime normal ne reste pas constant. Nous étudierons ces cas particuliers en annexe.IV. et nous montrerons qu'il n'en résulte que des effets négligeables.

Le dispositif donnant le retard d'un véhicule sur son horaire est donc donné par la figure.36.

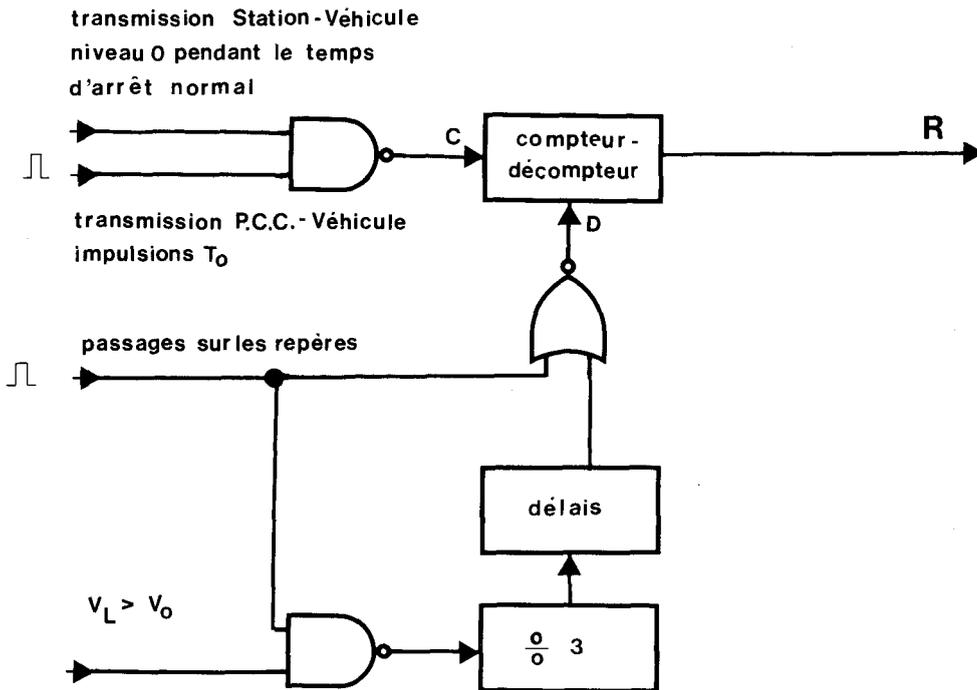


Figure. 36.

III.3.3. Vitesse de consigne appliquée à l'asservissement de vitesse en fonction du retard $R = (N-n)$

III.3.3.1. Régulation d'horaire

Afin de limiter le nombre de commutation traction - freinage, la marche accélérée n'est commandée que lorsque le retard est supérieur à une valeur R_1 égale à quelques secondes (4 secondes).

Le cycle des variations de la vitesse de consigne d'un véhicule prenant du retard, puis le rattrapant est donné par la figure.37.

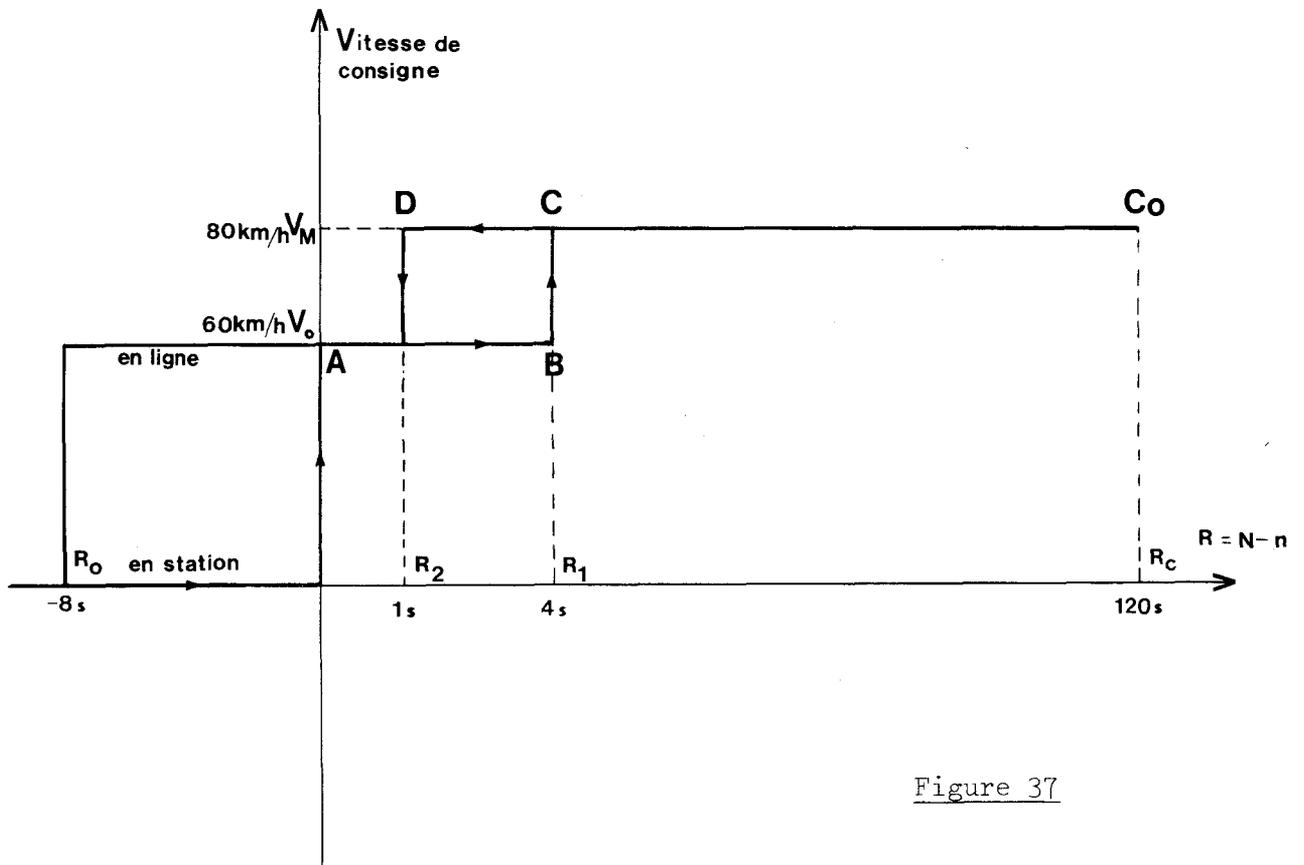


Figure 37

Initialement la vitesse de consigne est $V_0 = 60\text{km/h}$ et le point de fonctionnement dans le plan (vitesse de consigne, retard ($N-n$)) est le point A.

. On suppose que pour une raison quelconque le véhicule prend du retard. Le point de fonctionnement se déplace alors le long de A B.

. Lorsque le retard atteint la valeur R_1 , le dispositif de la figure.38. commute la vitesse de consigne sur la valeur $V_M=80\text{km/h}$.

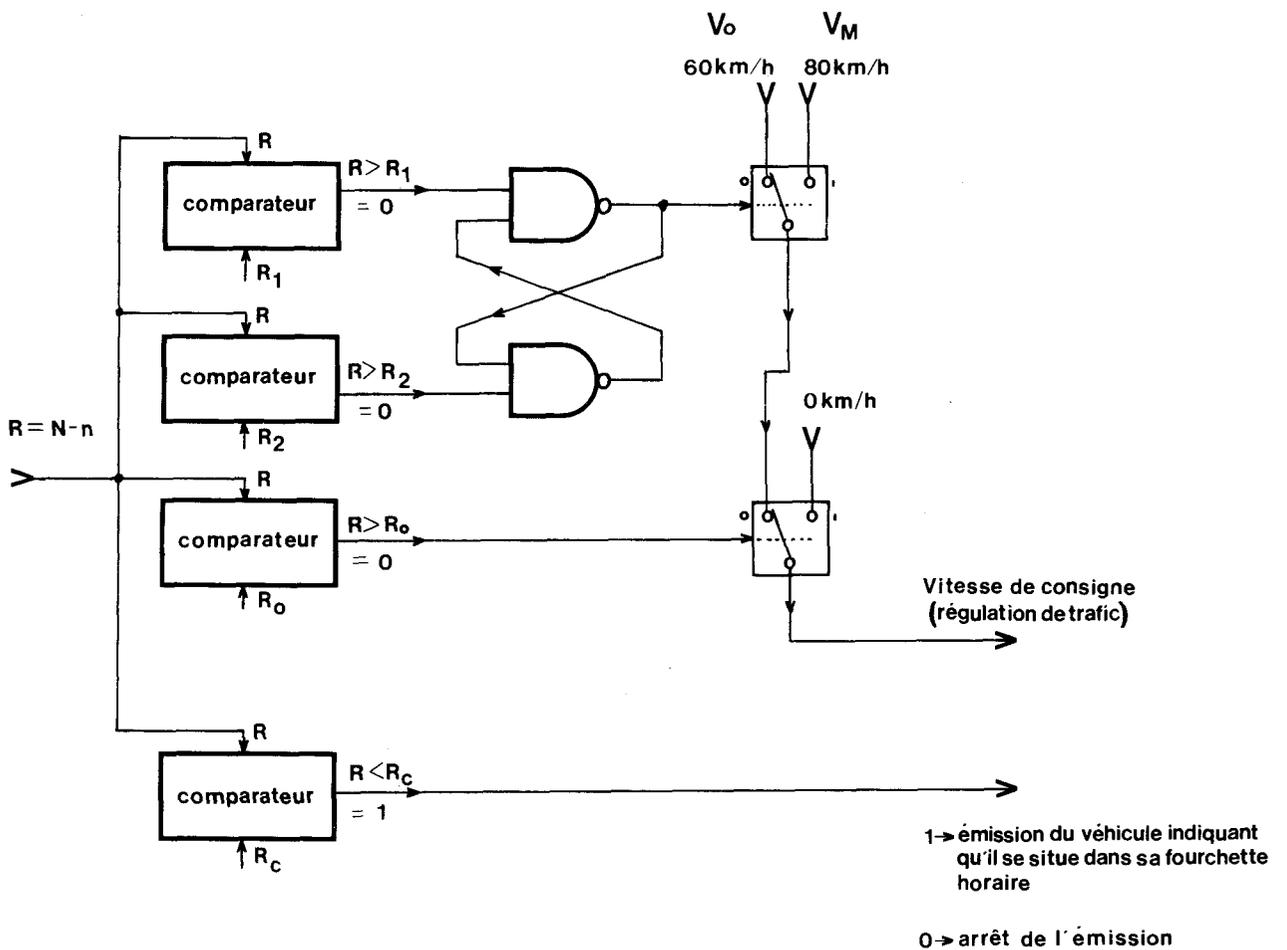


Figure 38

Il en résulte que le véhicule se met à rouler plus vite et à rattraper son retard.

Il est bien évident qu'il ne pourrait jamais rattraper son retard si la vitesse de consigne redevenait égale à V_0 dès que R serait devenu inférieur à R_1 . Un *hystérésis de la trajectoire du point de fonctionnement dans le plan $(V_C ; R)$* est donc nécessaire.

On ne commute donc la vitesse de consigne sur la valeur V_0 que lorsque le retard est redevenu inférieur à la valeur R_2 .

Choix des seuils R_2 et R_1 . Caractéristiques du cycle.

. Détermination de R_2 .

Lorsque le retard devient inférieur au seuil R_2 , la vitesse de consigne revient à la valeur nominale V_0 . A cet instant commence le processus de ralentissement : remise à zéro de l'accélération, commutation traction - freinage, puis freinage, en limitant la décélération et sa dérivée. Pendant cette phase, le véhicule rattrape encore un retard d'environ 1,5 secondes ce qui ramène le point de fonctionnement en A sur la figure.37. si l'on prenait cette valeur pour R_2 . Mais comme le retard $R = (N-n)$ n'est défini qu'à une unité près, nous avons fixé R_2 à 1 seconde. De cette façon lorsque le véhicule est de nouveau asservit à la vitesse nominale 60km/h, il a une légère avance sur son horaire d'environ 0,5 seconde. Ceci n'est absolument pas gênant et l'on maintient ensuite la vitesse de consigne du véhicule à la valeur nominale V_0 (sauf évidemment en cas d'un nouveau retard supérieur à R_1 auquel cas le cycle recommence).

. Détermination de R_1 .

On n'a jamais intérêt à laisser le retard s'accumuler et R_1 doit être choisi le plus petit possible. Toutefois il faut choisir R_1 supérieur à la valeur 3. Il existe en effet une fluctuation d'une unité de $(N-n)$ du fait du comptage. Il s'y ajoute une fluctuation supplémentaire d'une nouvelle unité du fait que l'on rajoute une unité supplémentaire tous les 3 repères. Enfin R_1 doit être supérieur à R_2 dont la valeur a été choisie à 1. Nous avons pris $R_1 = 4$.

III.3.2.2. Régulation d'intervalle (1)

Il ne suffit pas d'appliquer une vitesse de consigne de 80km/h pour que le véhicule rattrape son retard. Si celui-ci est bloqué en station pour une raison quelconque ou s'il a une panne de traction, son retard va continuer à croître et R va continuer à augmenter.

Au-delà d'une valeur R_c de 120secondes de R, il est nécessaire pour éviter l'augmentation de R d'arrêter l'horloge T_0 . Il en résulte un arrêt général de la ligne qui va assurer la régulation d'intervalle en empêchant la formation de bouchons.

Le processus permettant l'arrêt de l'horloge est le suivant :

En fonctionnement normal, lorsque le retard est inférieur à 120s, chaque véhicule émet séquentiellement vers le PCC un signal confirmant qu'il se situe dans sa fourchette horaire. Si tous les véhicules en circulation sur la ligne ont bien réémis ce signal, le PCC délivre une impulsion d'horloge T_0 qui sera reçue par tous les véhicules.

Dans le cas contraire, le PCC arrête la transmission des impulsions T_0 (figure.39.).

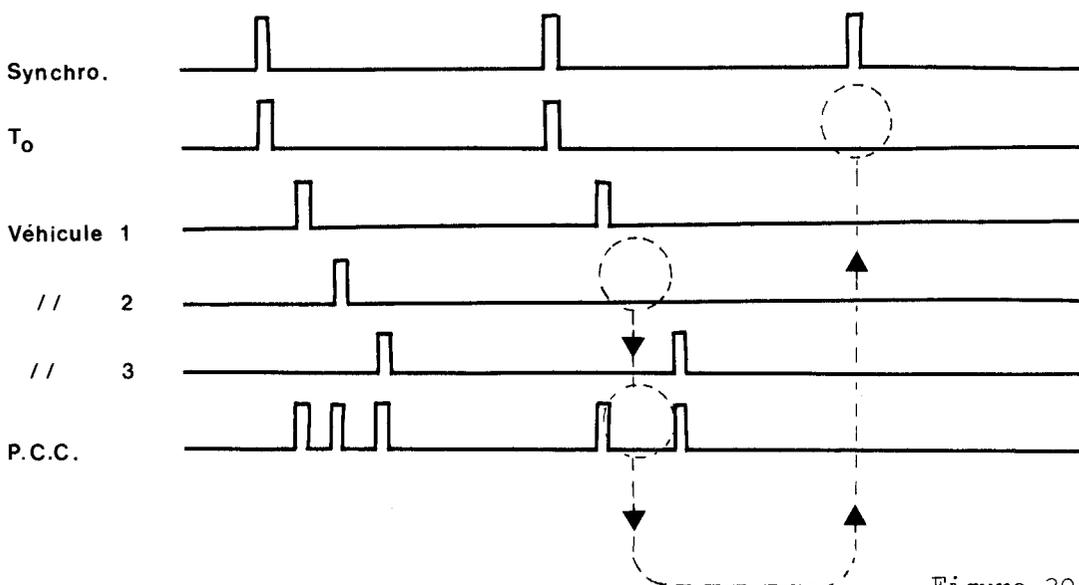


Figure 39

On peut profiter des périodes d'arrêt de l'horloge pour faire rattraper leur retard aux véhicules dont le point de fonctionnement se situe entre C et Co.

Pour cela, la vitesse de consigne $V_C=0$ n'est effectivement envoyée à l'entrée de l'asservissement de vitesse que lorsque la valeur du retard "R" atteint une valeur fixée R_0 .

La valeur R_0 est établie de façon qu'après un arrêt en ligne droite, chaque véhicule, après redémarrage, atteint à nouveau la vitesse de régime avec un retard nul.

Le programme de simulation numérique que nous avons mis au point permet de déterminer le temps nécessaire et la distance parcourue pour passer d'une vitesse nulle à 60km/h. Ces résultats sont obtenus pour le moteur C.E.M. de type GLM 332, une masse nominale de 14 tonnes et une pente de la voie nulle.

On trouve :

Distance parcourue : 158 mètres
Temps : 17 secondes.

En ligne droite, si l'on passe d'un repère au suivant en 1 seconde, le nombre de repères rencontrés pour la montée en vitesse est donc égal à 9.

La consigne $V_C=0$ doit donc être appliquée à l'asservissement lorsque :

$$R = R_0 = -8$$

Au moment de l'arrêt de l'horloge T_0 , la vitesse des véhicules qui sont en retard peut être supérieure à la vitesse nominale $V_0=60\text{km/h}$. Dans ce cas, en annulant la vitesse de consigne lorsque $R < -8$, la valeur de R à l'arrêt sera comprise entre -15 et -19.

Pour remédier à cela, lorsque le véhicule reçoit à nouveau les impulsions T_0 , la vitesse de consigne reste nulle tant que $R < -8$, elle devient ensuite égale à 60km/h. De cette façon, lorsque le véhicule atteint la vitesse de régime, le retard R est nul.

Cas d'un arrêt de l'horloge à l'approche d'un virage ou d'une station

La vitesse $V_C=0$ n'est pas envoyée à l'entrée de l'asservissement tant que le véhicule se trouve dans une phase de ralentissement à l'approche d'une station. Il est en effet plus intéressant dans cette situation d'amener le véhicule jusqu'en station.

Ainsi, en cours de ralentissement, lorsque la vitesse réelle est supérieure à la vitesse V_Z de remise à zéro de l'accélération, la vitesse $V_C=0$ n'est pas envoyée à l'entrée de l'asservissement.

Pour éviter que les véhicules arrêtés en station pendant le décalage d'horaire ne prennent de l'avance, il suffit d'empêcher leur départ de station tant que $R < 0$.

Dans tous les cas, après un arrêt de l'horloge T_0 suffisamment prolongé, le réseau se trouve exactement synchronisé sur le nouvel horaire au plus tard lorsque tous les véhicules se sont arrêtés une fois en station après le décalage d'horaire.

Résumé de la première partie

Associé à l'asservissement de vitesse, le dispositif d'élaboration des consignes que nous venons de décrire assure toutes les fonctions de pilotage et de régulation du trafic d'un véhicule automatique circulant sur une ligne de transport en site propre.

Après avoir rappelé les différentes phases du mouvement d'un véhicule s'arrêtant en station, nous avons établi les consignes assurant un arrêt précis à partir des seules informations de passage sur des repères passifs. Nous avons déterminé le temps de passage T_0 entre 2 repères consécutifs, l'incrément maximum de la consigne d'accélération ainsi que l'influence des différentes grandeurs intervenant sur la précision d'arrêt.

Le deuxième chapitre montre qu'à partir de 3 types de balises passives en plus des repères, il est possible de limiter très simplement la vitesse du véhicule en utilisant un processus similaire à celui utilisé pour obtenir l'arrêt en station.

Le comptage des repères ainsi que les impulsions périodiques T_0 émises par le PCC permet à chaque véhicule de déterminer son retard sur l'horaire qui lui est associé. En cas de retard inférieur à 120 secondes, nous avons déterminé les consignes de vitesse permettant de rattraper le plus rapidement possible ce retard en effectuant un minimum de commutation traction - freinage.

Lorsque le retard d'un véhicule est supérieur à 120 secondes, on procède à un décalage d'horaire par arrêt de l'horloge T_0 . Chaque véhicule profite de l'arrêt de l'horloge pour rattraper un retard éventuel. La vitesse de consigne envoyée à l'asservissement pour assurer cette fonction permet aux véhicules, après un arrêt de l'horloge suffisamment prolongé (120 secondes maximum), d'être exactement synchronisés sur le nouvel horaire dès le départ de la première station rencontrée.

2^{ème} PARTIE

REALISATION ET PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS AVEC LE SYSTEME DE PILOTAGE PROPOSE

1. Réalisation
2. Présentation des résultats pour chaque fonction de pilotage
3. Etude du parcours des différentes interstations du V.A.L.
4. Intervalles minimum en station et temps de stationnement maximum

CHAPITRE.1.

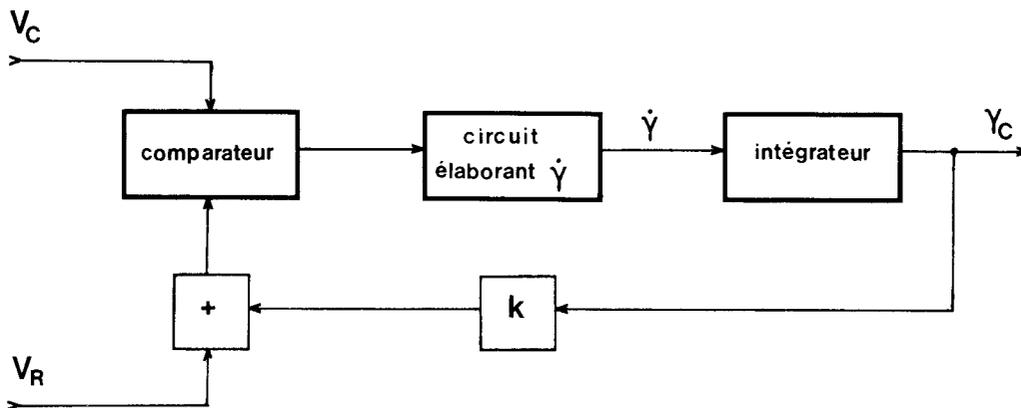
R E A L I S A T I O N

I.1. CHOIX DE L'OPTION TECHNOLOGIQUE

L'étude précédente fait apparaître que les informations servant au pilotage sont essentiellement obtenues à partir de comptages de repères placés le long de la voie. Aussi l'électronique d'élaboration des consignes utilise nécessairement des circuits intégrés digitaux.



Nous avons également retenu cette option technologique en ce qui concerne la partie de l'asservissement de vitesse générant la consigne d'accélération. Rappelons que ce dispositif comprend principalement un comparateur et un intégrateur (figure.41.).



Le changement de signe de la consigne d'accélération assure les commutations traction - freinage et freinage - traction.

Un intégrateur numérique permet de s'affranchir des problèmes de dérives des circuits analogiques. Ainsi, il permet d'éviter des commutations traction - freinage intempestives en cas de dérive de l'intégrateur au voisinage de zéro.

Cependant, le réglage du coefficient d'avance de phase "k" est plus complexe dans le cas d'une réalisation numérique. Toutefois comme l'a montré l'étude précédente (chapitre.II.3.1.), compte tenu du type de matériel utilisé pour le système V.A.L., ce paramètre peut sans inconvénient être fixé à la valeur $k = 2s$. Le facteur de multiplication est alors facilement obtenu dans le code binaire naturel par décalage de 1 bit au niveau de la sommation : $V_R + k\gamma_C$.

Le pilote automatique que nous avons réalisé utilise des circuits intégrés numériques T.T.L. Il serait intéressant, pour une réalisation définitive, d'intégrer dans un même boîtier, tous les circuits nécessaires à l'élaboration de la consigne d'accélération. Cette intégration permettrait de supprimer une grande partie des connections et ainsi augmenter la fiabilité du pilote automatique.

1.2. REMARQUE

Le banc d'essais, décrit en annexe.1, et le pilote automatique doivent fonctionner en temps réel.

Le temps de calcul élémentaire est limité par la rapidité de la calculatrice simulant le véhicule avec ses moteurs et ses freins.

Pratiquement, avec le matériel de calcul numérique utilisé, le temps élémentaire T_1 ne peut être inférieur à 250 ms.

Les résultats de mesure effectués sur le banc d'essais sont donnés pour $T_1 = 250ms$. Cette valeur ne permet pas d'obtenir la précision d'arrêt en station de $-30cm$ (III.1.4.2.). Cependant les autres résultats (temps parcours et intervalles minimum en station) ne sont pratiquement pas modifiés.

CHAPITRE.2.

PRESENTATION DES RESULTATS POUR CHAQUE FONCTION DE PILOTAGE

Les planches 15 à 24 illustrent le fonctionnement du dispositif de pilotage proposé. Ces résultats sont obtenus pour une masse du véhicule de 14 tonnes, une pente de voie nulle. Les caractéristiques du moteur et du couple résistant correspondent à celles définies dans le chapitre.II.3.2. de la première partie.

II.1. DEPART DE STATION ET CONDUITE EN ALIGNEMENT DROIT

La planche.15. représente la vitesse du véhicule V_R et la vitesse de consigne en fonction du temps et de la distance parcourue en marche normale (V_0) et en marche accélérée (V_M).

Nous remarquons sur le diagramme $V = f(t)$ que la vitesse de consigne augmente d'une valeur constante ($\gamma_0 T_0 = 1,3m/s$) à chaque repère rencontré), soit toutes les secondes pour $V_C < V_0$ et toutes les 1,5 secondes pour $V_C > V_0$.

L'annexe.3. donne la distance entre les repères.

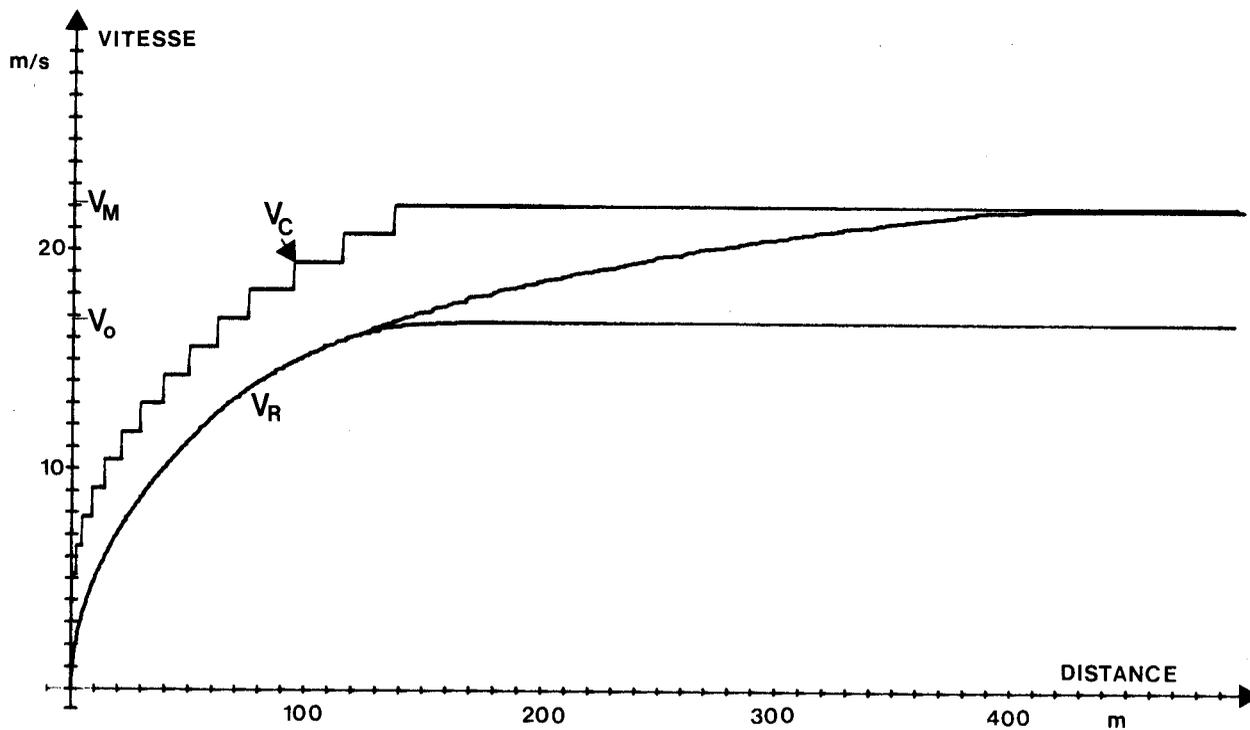
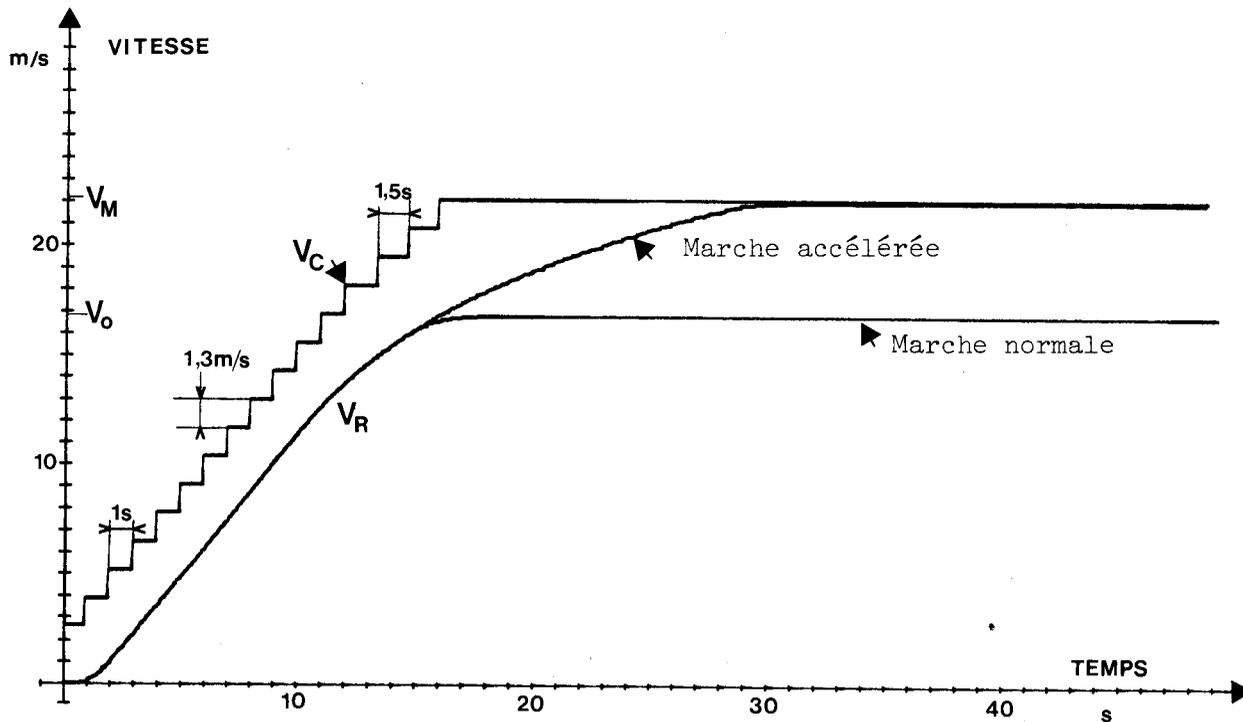


PLANCHE 15



II.2. ARRETS EN STATION

Les planches 16 à 20 illustrent différents arrêts en station. Elles représentent les variations des grandeurs suivantes :

- . V_R : vitesse du véhicule
- . V_C : vitesse de consigne
- . V_Z : vitesse de remise à zéro de la consigne d'accélération
- . γ_R : accélération du véhicule
- . γ_C : consigne d'accélération.

a) approche de station à la vitesse nominale $V_0 = 16,9\text{m/s}$

La planche.16. représente les variations des différentes grandeurs en fonction du temps.

La planche.17. représente ces mêmes variations en fonction de la distance parcourue.

Nous remarquons sur ces graphiques :

- 1) le lissage de la vitesse de consigne
- 2) la limitation de la dérivée d'accélération
- 3) le contrôle de l'accélération du véhicule pendant la phase de freinage.

b) approche de station à la vitesse maximale $V_M=22,1\text{m/s}$

Planches 18 et 19

Nous constatons sur ces deux planches, que le lissage de la vitesse de consigne est parfait même au début de la phase de freinage. En effet les repères sont implantés de façon à ce qu'un véhicule roulant en régime accéléré passe d'un repère au suivant en 1 seconde (III.3.2.).

c) approche de station à une vitesse quelconque

La planche.20. représente une approche de station avec une vitesse initiale de 5m/s .

Le véhicule accélère pour atteindre la station en un temps minimum.

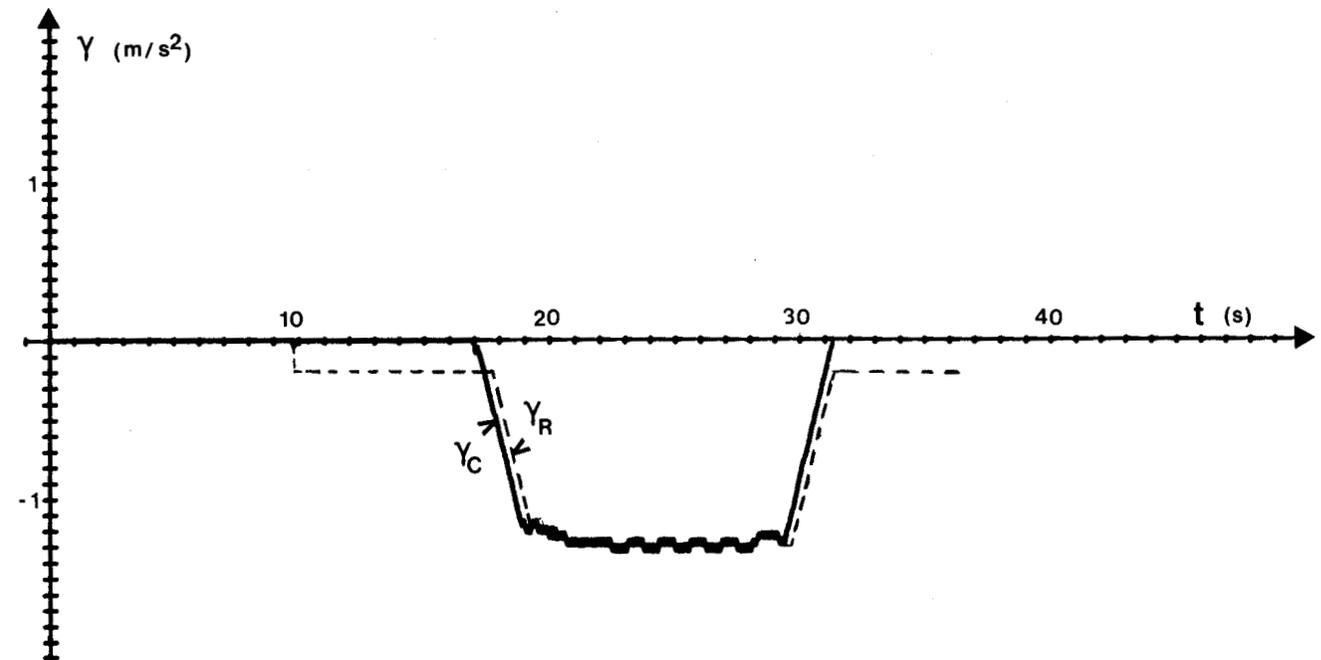
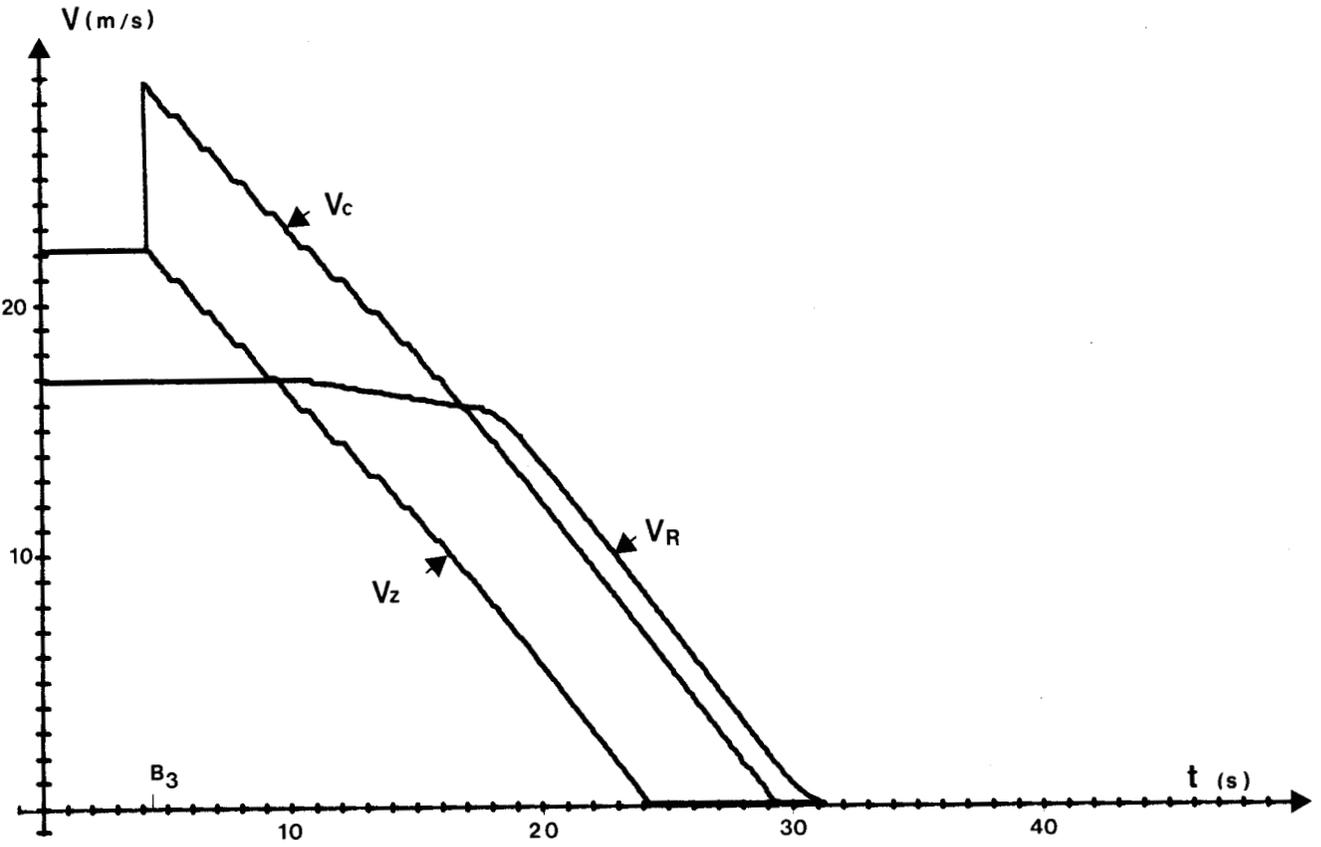


PLANCHE 16



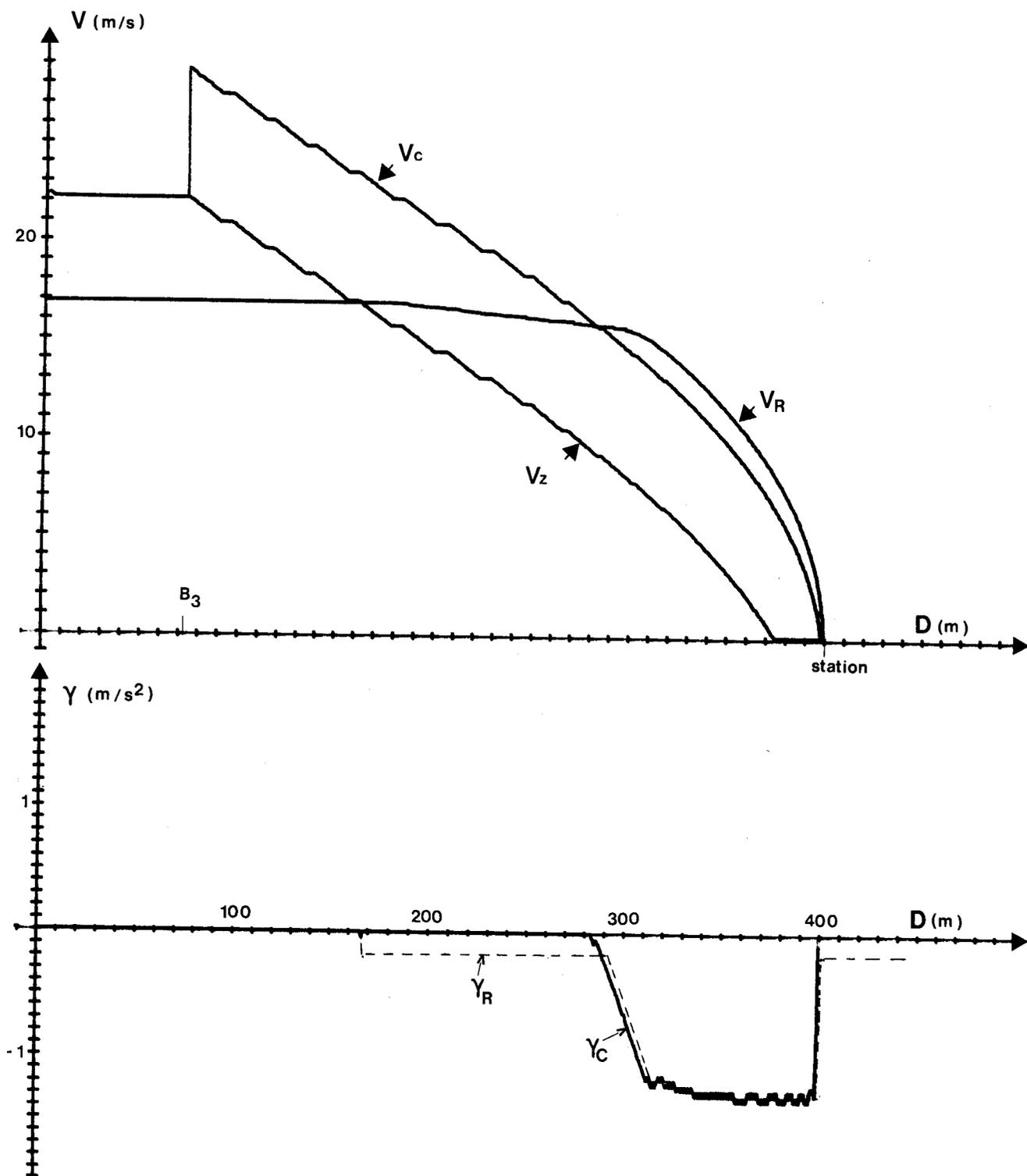


PLANCHE 17



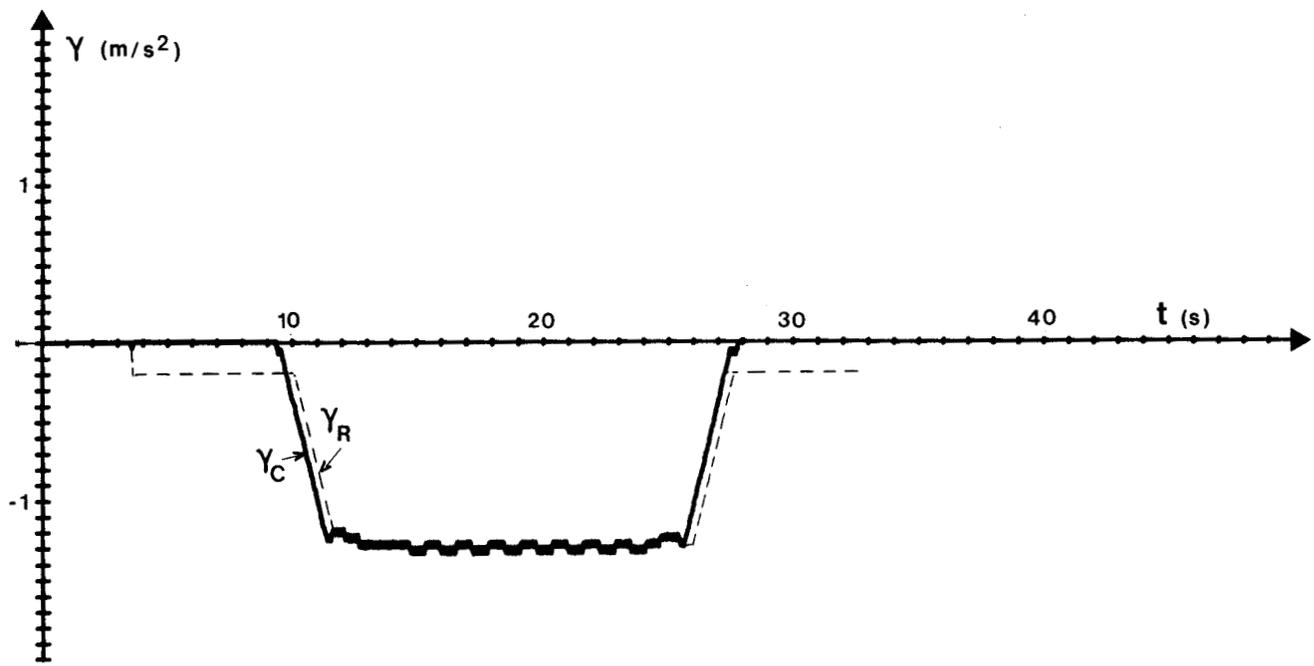
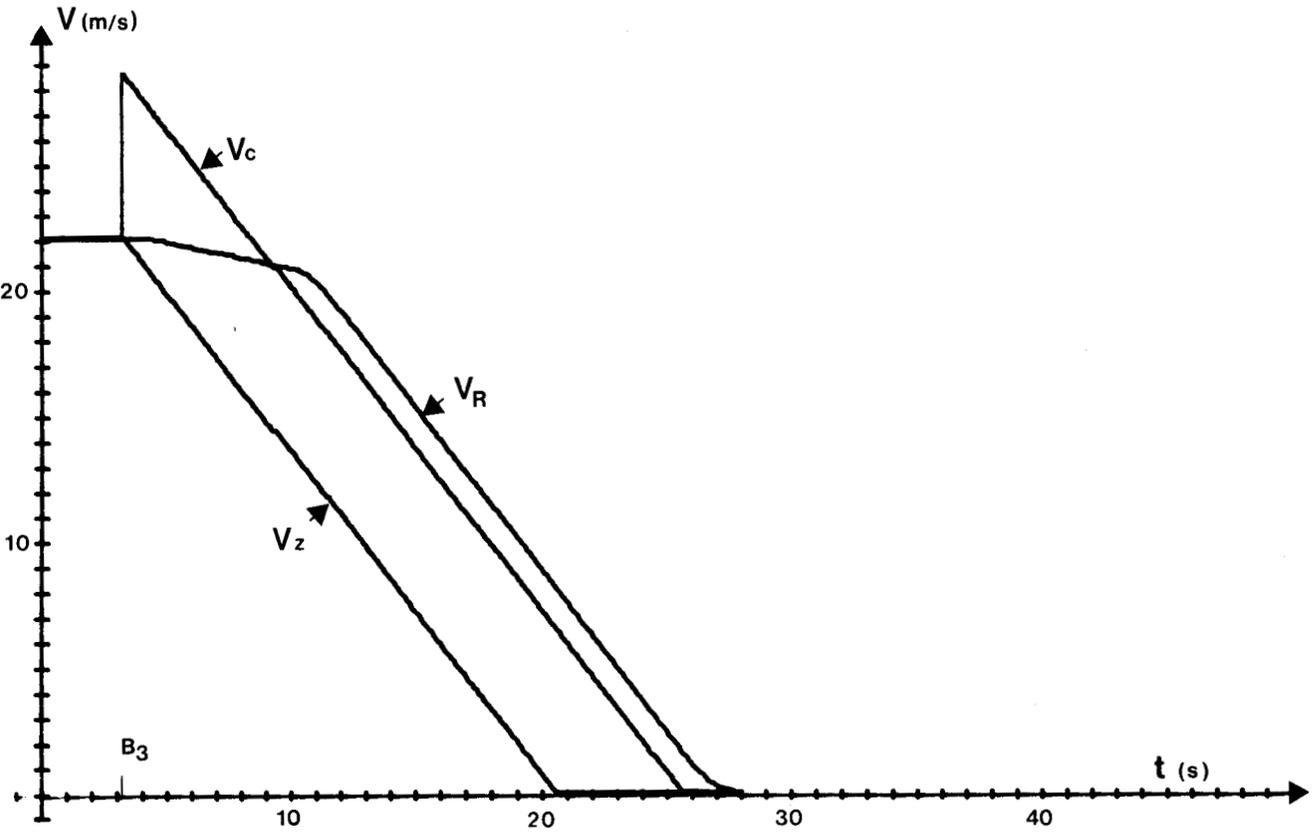


PLANCHE 18



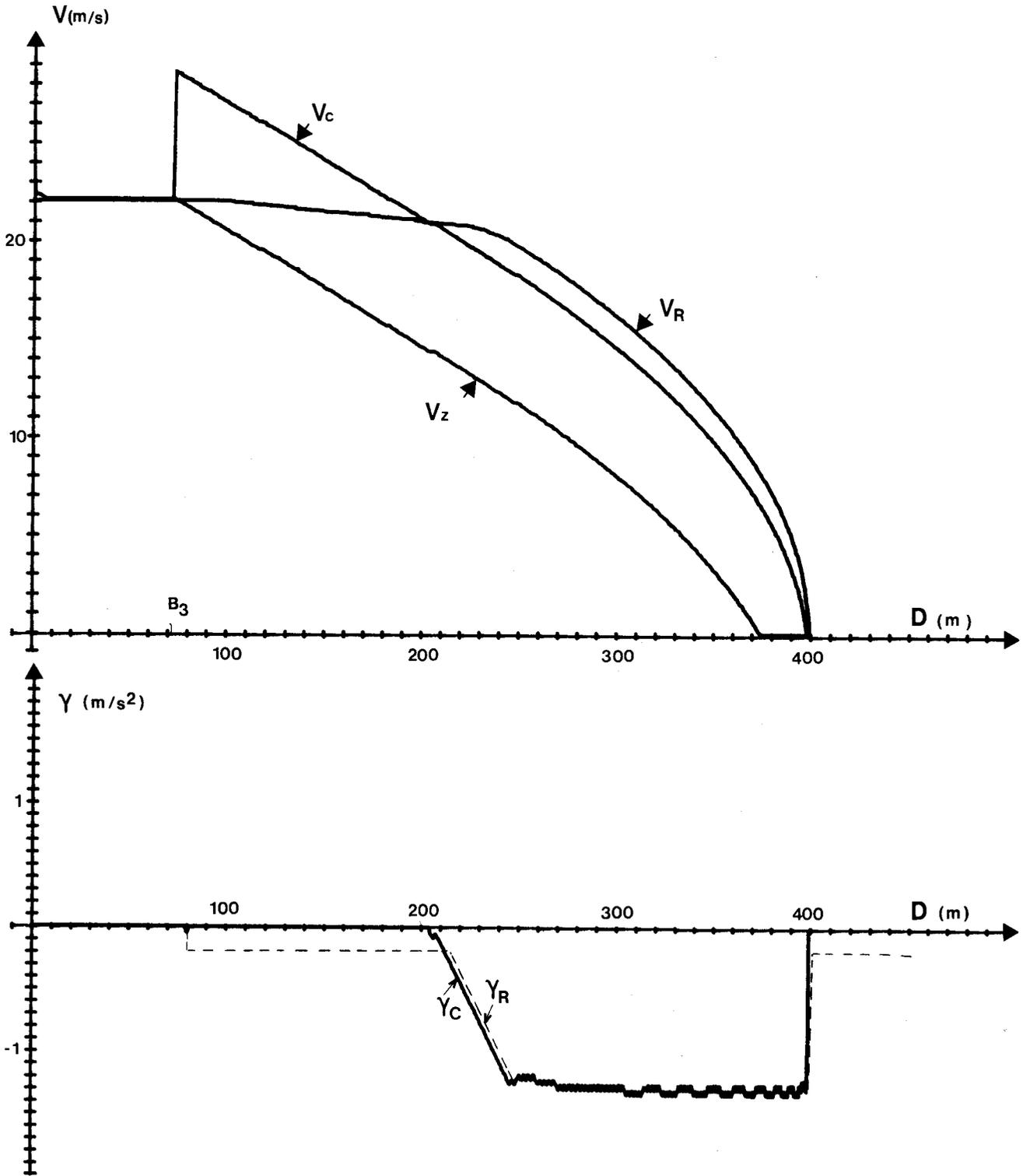


PLANCHE 19



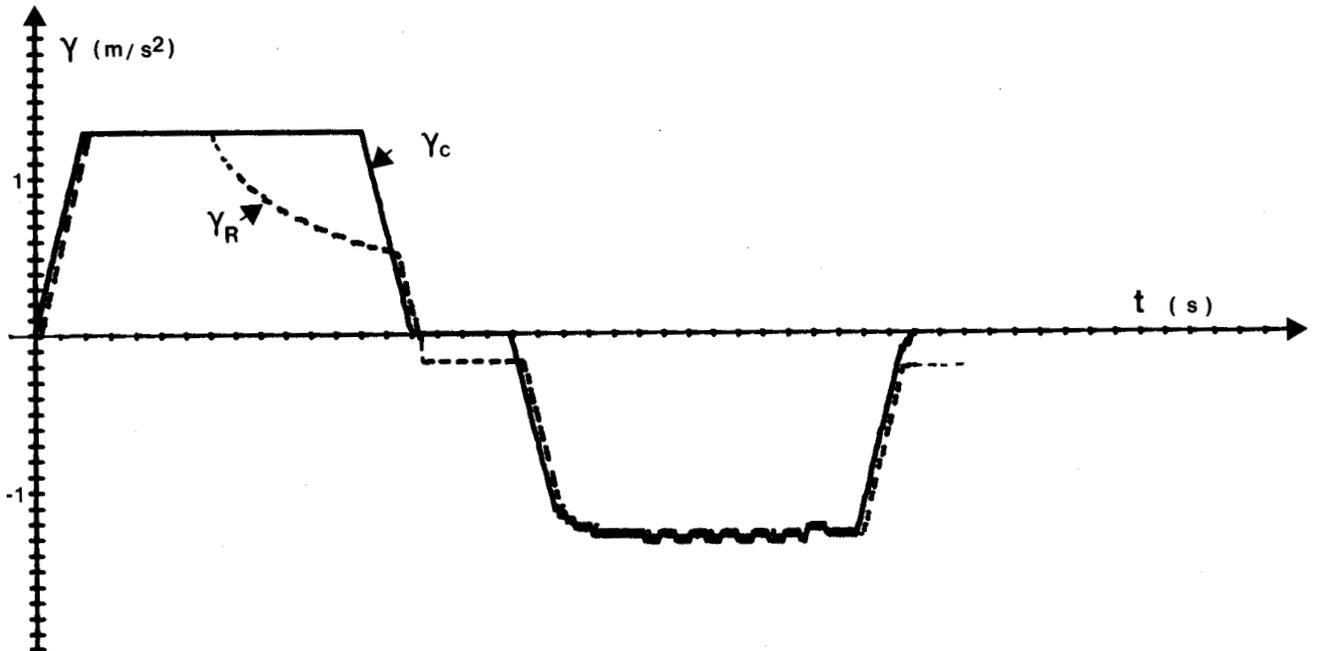
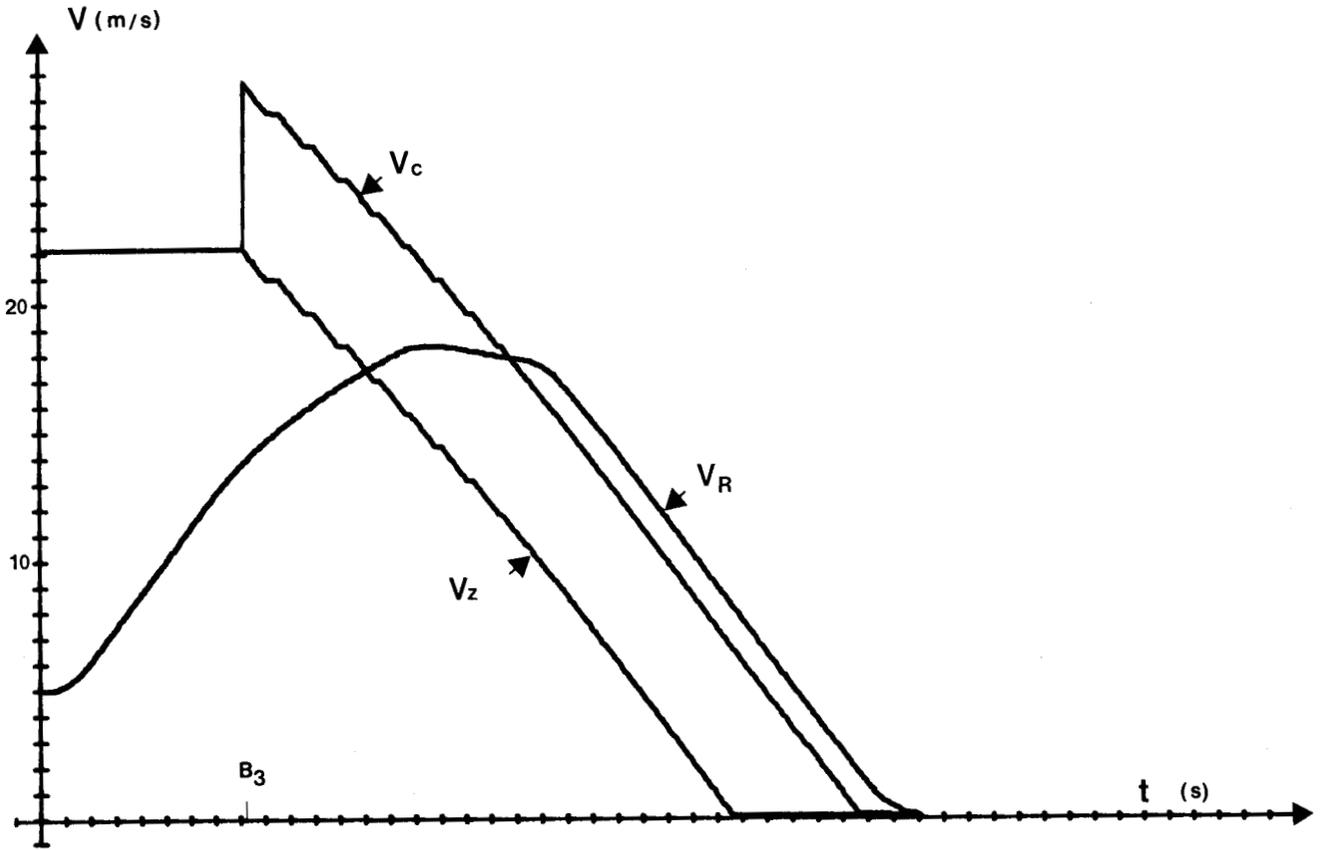


PLANCHE 20



II.3. LIMITATION DE VITESSE

Les planches 21 à 23 illustrent des limitations de vitesse dans les différentes configurations suivantes :

- Planche.21. : au départ de station
- Planche.22. : dans un alignement droit
- Planche.23. : en approche de station.

Nous constatons d'une manière générale :

- . Qu'un départ de station où une balise B_2 permet d'obtenir une vitesse de consigne croissant par bonds de 1,3m/s au passage sur chaque repère. L'incrément initial est de 2,6m/s et la valeur maximale de la vitesse de consigne de 22,1m/s.
- . Qu'une balise B_1 arrête l'évolution de la vitesse de consigne.
- . Qu'une balise B_3 fait décroître la vitesse de consigne avec un incrément initial positif de 6,5m/s.

La planche.24. illustre une limitation de vitesse exceptionnelle dans une ligne droite obtenue en plaçant des balises supplémentaires le long de la voie.

Si l'on compare ces diagrammes à ceux de la planche.22., nous remarquons que le ralentissement est moins régulier. En effet dans ce cas, les repères sont espacés régulièrement (tous les 22,1 mètres) au lieu d'être placés en progression arithmétique décroissante.

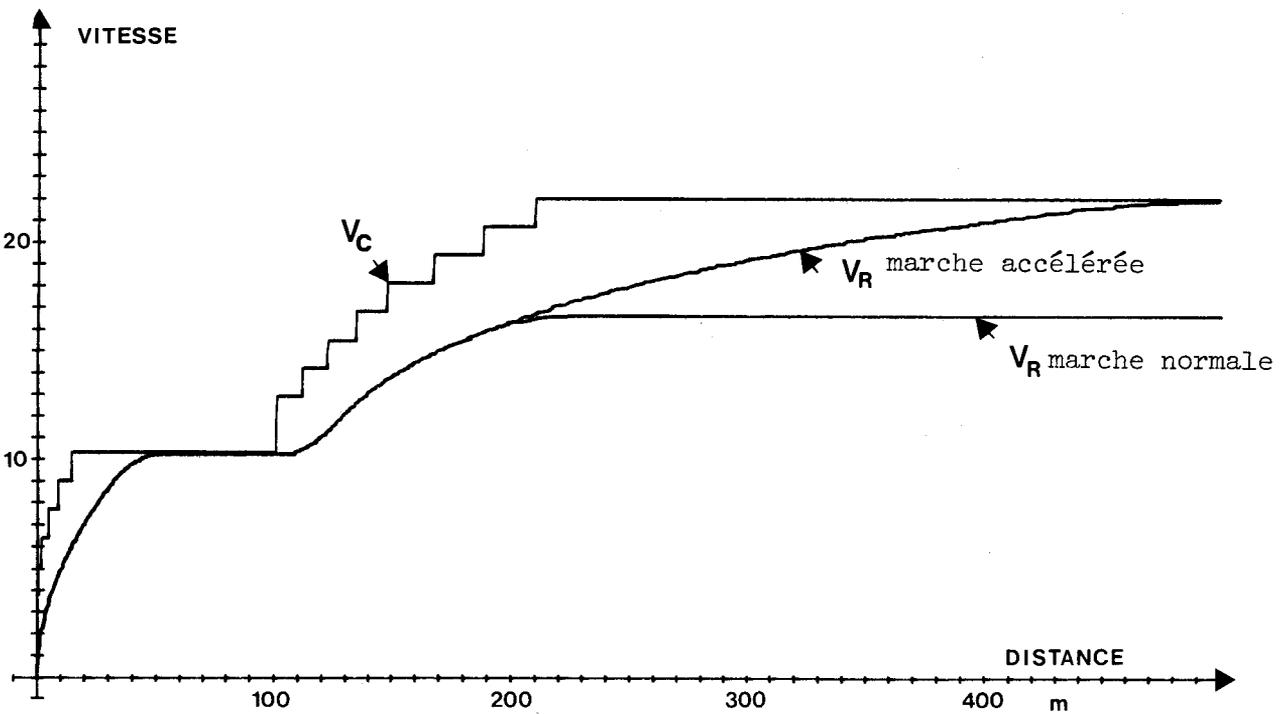
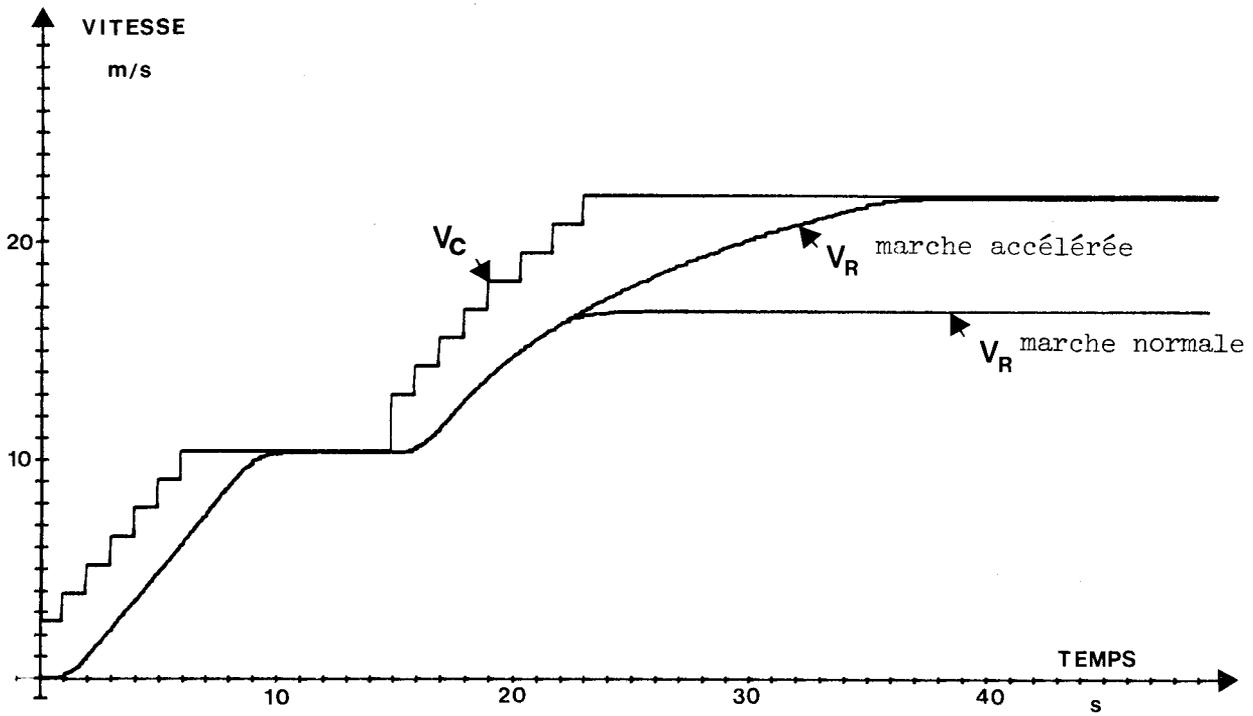


Planche.21.



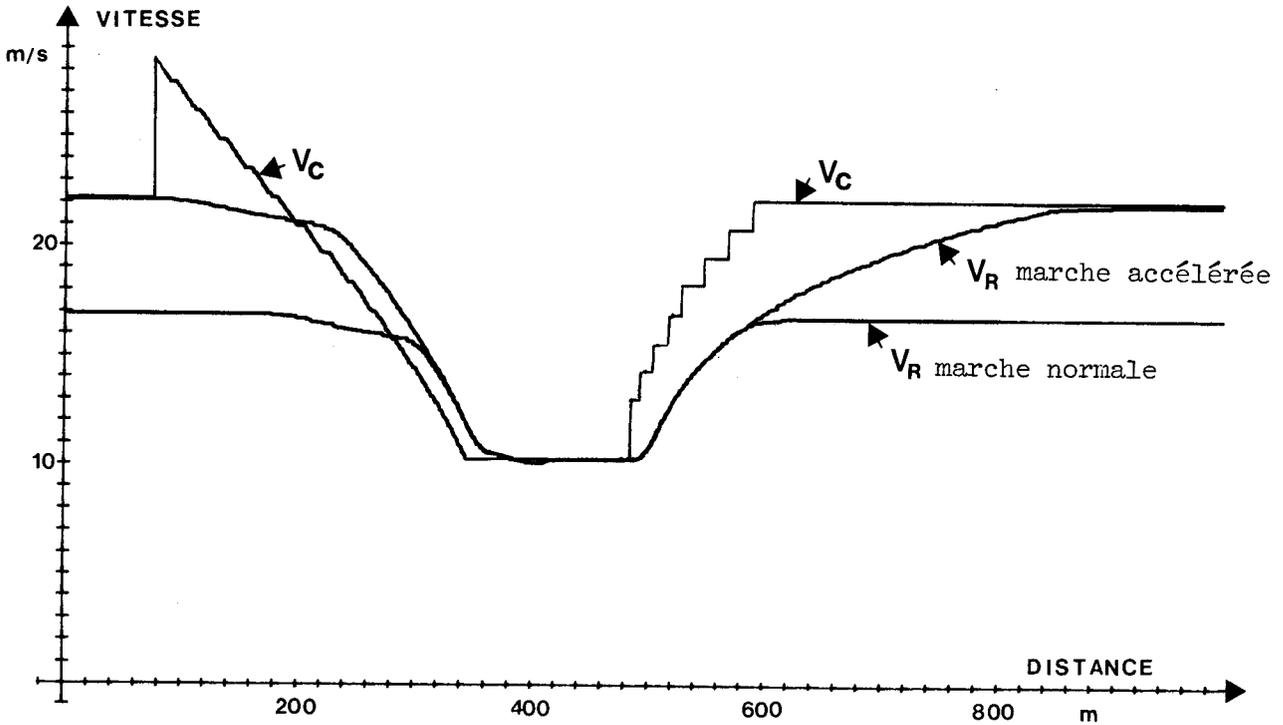
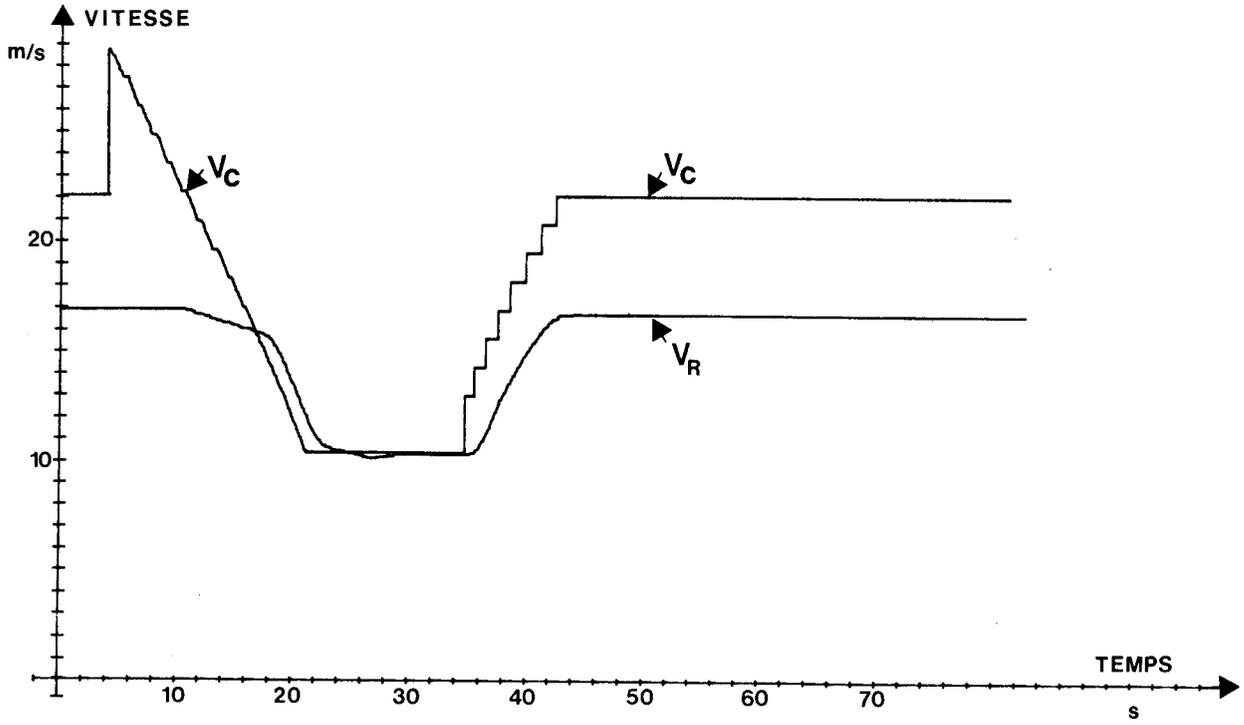


Planche.22.

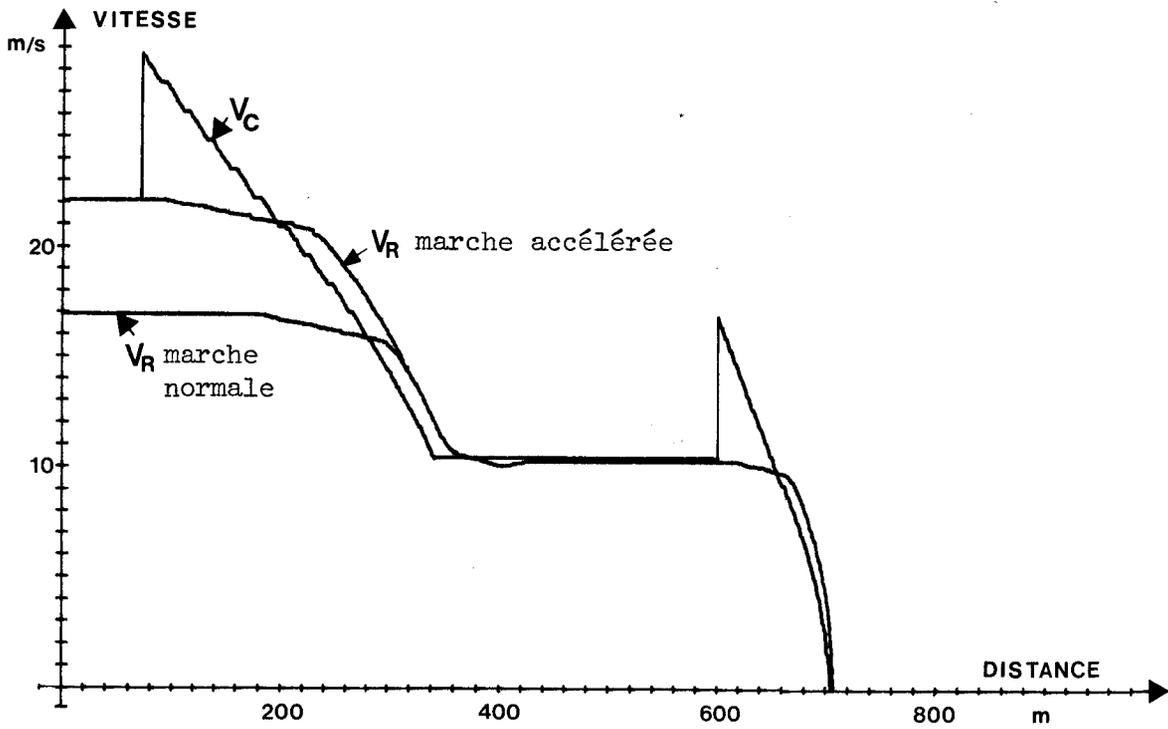
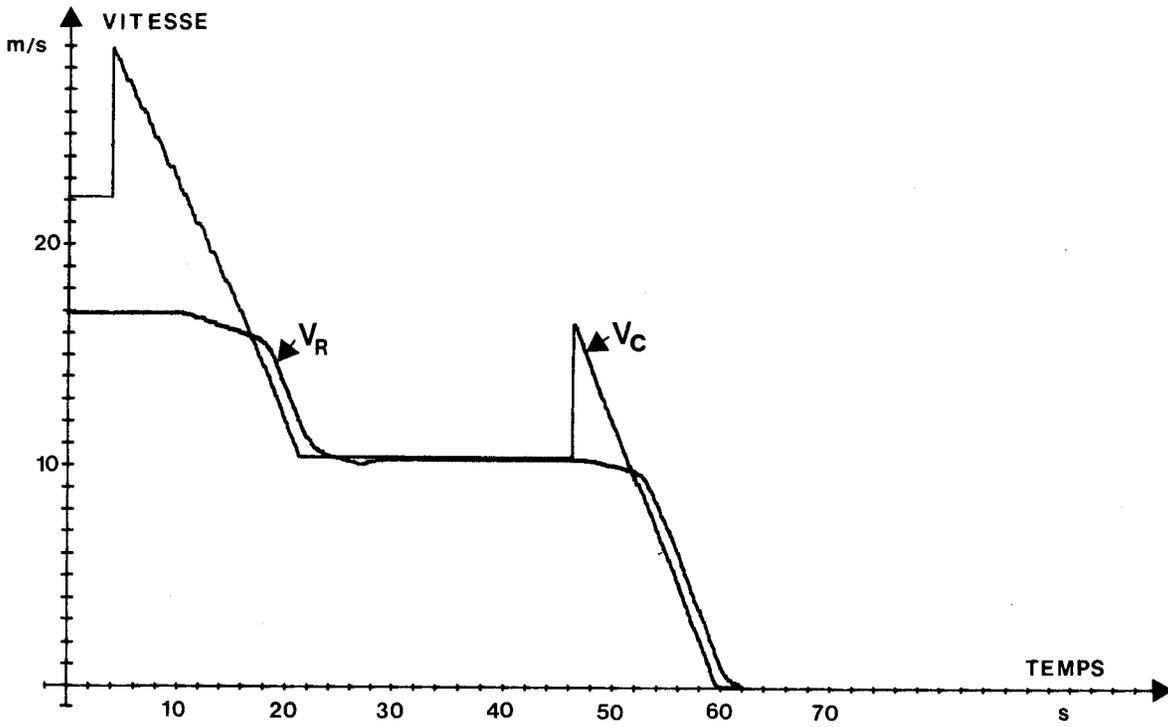


Planche.23.

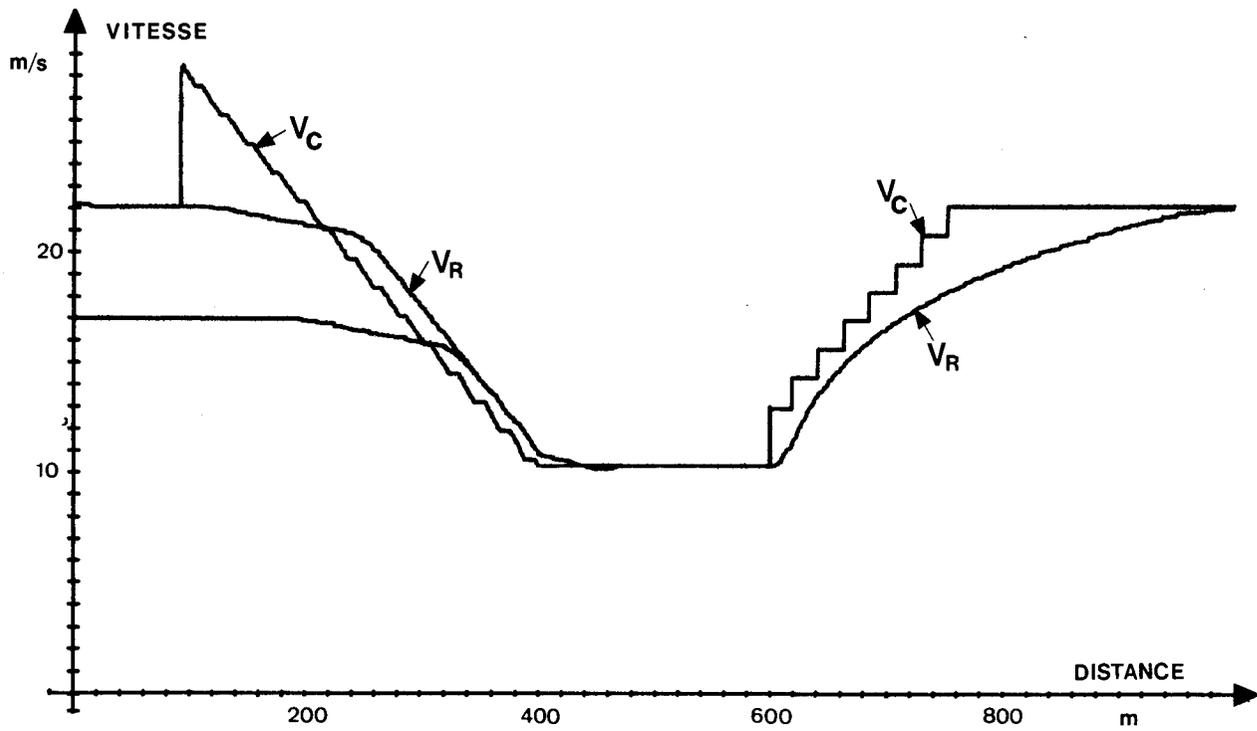
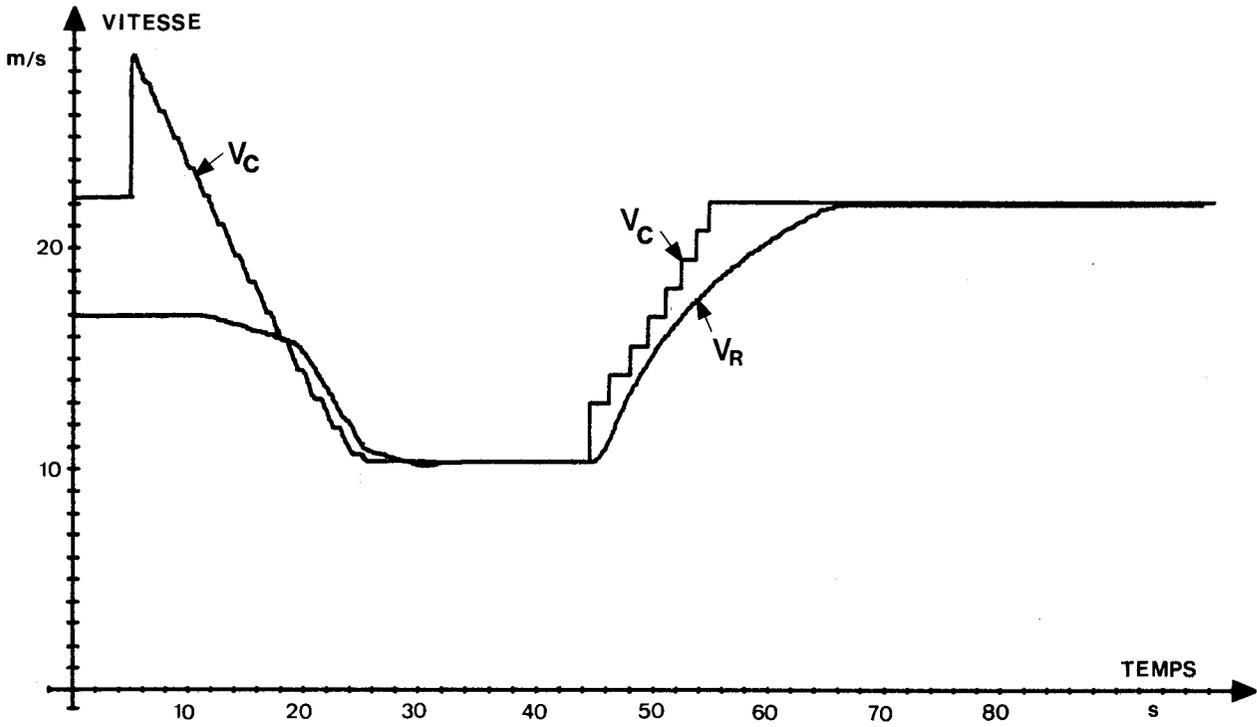


Planche.24.



CHAPITRE.III.

ETUDE DU PARCOURS DES DIFFERENTES INTERSTATIONS DU V.A.L.

Les diagrammes vitesse - espace $V = f(D)$ pour toutes les interstations de la ligne V.A.L. sont donnés en annexe.6. par les planches 25 à 29. Nous avons tracé ces diagrammes en marche normale et en marche accélérée, pour une masse du véhicule de 14 tonnes. Les caractéristiques du moteur et du couple résistant correspondent à celles définies dans le chapitre.II.3.2. Nous avons enregistré simultanément le temps de parcours de chaque interstation. Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus.

NOM DES INTERSTATIONS	Temps de parcours normal	Temps de parcours minimum
Centre directionnel - Fives	2mn13s	1mn52s
Fives - Mons	1mn11s	1mn03s
Mons - Flers	1mn36s	1mn27s
Flers - Pont de Bois	1mn22s	1mn11s
Pont de Bois - Centre Ville Est	51s	49s
Centre Ville Est - Triolo	1mn17s	1mn17s
Triolo - Cité Scientifique 1	1mn14s	1mn14s
Cité Scientifique 1 - Cité Scientifique 2	2mn17s	2mn08s
Cité Scientifique 2 - Triolo	1mn14s	1mn14s
Triolo - Centre Ville Est	1mn17s	1mn17s
Centre Ville Est - Pont de Bois	51s	47s
Pont de Bois - Flers	1mn22s	1mn11s
Flers - Mons	1mn35s	1mn27s
Mons - Fives	1mn11s	1mn03s
Fives - Centre directionnel	2mn20s	2mn04s
T O T A L	21mn51s 1311s	20mn04s 1204s

La marge de régulation d'horaire est de 107 secondes.

CHAPITRE. IV.

INTERVALLES MINIMUM EN STATION ET TEMPS DE STATIONNEMENT MAXIMUM

Le pilote associé au banc d'essais permet de déterminer très simplement l'intervalle minimum entre les véhicules.

La distance minimale "d" pouvant séparer deux véhicules sans déclenchement d'un freinage d'anti-collision est une fonction quadratique de la vitesse V_R du véhicule suiveur :

$$d = A V_R^2 + B V_R + C$$

La valeur des coefficients A, B et C sont déterminés⁽⁵⁾ en fonction des caractéristiques du système de freinage, et du dispositif anti-collision utilisé :

$$A = 0,325$$

$$B = 11$$

$$C = 116$$

Une électronique élabore au niveau du banc d'essais une information proportionnelle à d.

En plus du diagramme $V = f(D)$, nous avons tracé sur les mêmes planches (annexe.6.), les diagrammes $t = f(D)$ et $t = f(D+d)$.

Un dispositif de commutation électronique permet de tracer une zone hachurée dont les enveloppes à gauche et à droite représentent respectivement $t = f(D)$ et $t = f(D+d)$. Cette zone hachurée représente à tout instant la longueur du canton mobile nécessaire pour obtenir l'arrêt du véhicule dans le cas le plus défavorable.

L'intervalle de temps minimum entre deux véhicules se suivant au plus près sans déclenchement du dispositif anti-collision est déterminé pour la vitesse de régime normal (60km/h dans les alignements droits). Il est facilement obtenu à l'aide des diagrammes $t = f(D)$ et $t = f(D+d)$. Il suffit de faire coïncider au niveau de chaque station, le diagramme $t = f(D)$ d'un véhicule et le diagramme $t = f(D+d)$ du véhicule suivant comme l'indique la figure.42.

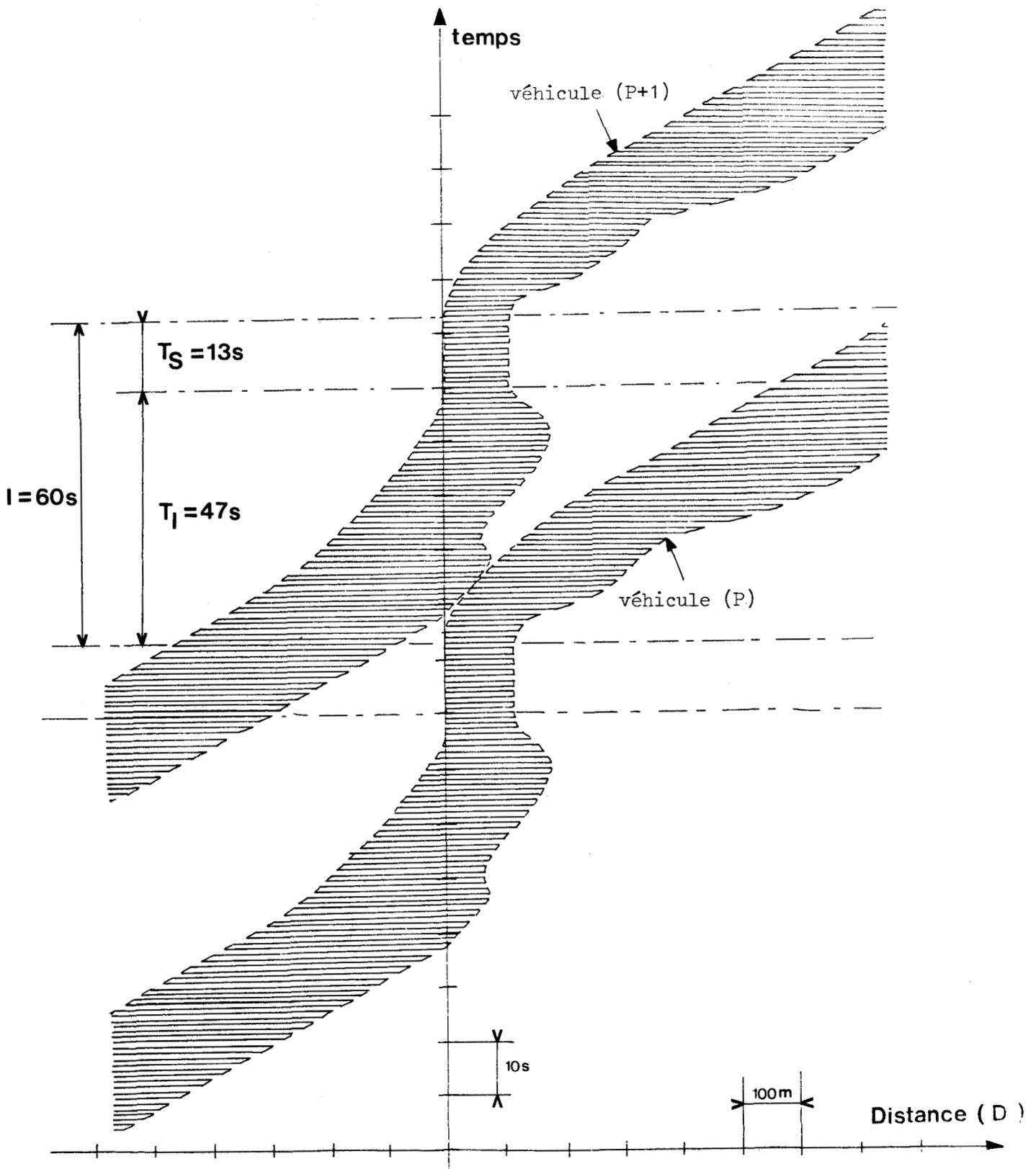
Pour un intervalle fixé (1 minute dans le cas du V.A.L.), il est facile de déduire de ces résultats, le temps de stationnement maximum de chaque station.

Le tableau suivant donne les valeurs obtenues pour la ligne V.A.L.

T_1 intervalle minimum sans déclenchement du dispositif anticollision

T_S temps de station maximum pour un intervalle de 1 minute

STATION	T_1	T_S
Centre Directionnel	47s	13s
Fives	41s	19s
Mons	40s	20s
Flers	40s	20s
Pont de Bois	40s	20s
Centre Ville-Est	40s	20s
Triolo	42,5s	17,5s
Cité Scientifique 1	40s	20s
Cité Scientifique 2	41s	19s
Triolo	40s	20s
Centre Ville Est	42,5s	17,5s
Pont de Bois	40s	20s
Flers	40s	20s
Mons	45s	15s
Fives	40s	20s



CENTRE DIRECTIONNEL

figure.42.



CONCLUSION

Le travail que nous venons d'exposer dans cette thèse constitue une contribution importante à l'automatisation du pilotage d'un véhicule d'une ligne de transport en site propre.

Le pilote automatique que nous avons réalisé est inspiré du schéma utilisé par les établissements MATRA pour les systèmes de transport Aramis et V.A.L. Mais nous avons considérablement modifié son principe de fonctionnement en montrant en particulier que l'emploi de la consigne d'accélération à la place de l'accélération réelle dans le terme d'avance de phase permettait d'obtenir un fonctionnement presque parfait et indépendant des imperfections du système de motorisation. Ceci constitue à notre sens un progrès décisif.

Pour chaque fonction de pilotage, les différentes consignes sont générées à partir des seules informations de passages sur des repères passifs. Ici aussi nous avons développé une solution plus simple et présentant des avantages par rapport à celle utilisée par MATRA sur le V.A.L.

L'arrêt, demandé par l'un des véhicules, d'une horloge placée dans un poste de contrôle assure la régulation du trafic et évite la formation de bouchons.

L'intérêt d'un tel dispositif laisse prévoir son utilisation à de nombreux systèmes de transport automatiques. Il constitue l'objet de l'invention effectuée à l'Université des Sciences et Techniques de LILLE et brevetée par l'E.P.A.L.E.

L'adaptation de ce pilote automatique à des moteurs de caractéristiques différentes ne présente aucune difficulté.

L'intégration dans un même boîtier des principaux circuits devrait permettre d'obtenir un dispositif de pilotage très fiable.

Associé au banc d'essais, le prototype que nous avons réalisé a permis de simuler le fonctionnement d'un véhicule sur un tronçon de la première ligne de métro reliant la ville nouvelle de Lille-Est à la gare de Lille.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) R. GABILLARD Procédé permettant l'exploitation d'un ensemble de mobiles circulant en ordre immuable sur une ligne propre en circuit fermé
Brevet E.P.A.L.E., n° 71 25 386, 2 Juillet 1971
- (2) J.P. VERVAEKE Mémoire C.N.A.M., LILLE, à paraître
- (3) C. MIRA Systèmes asservis non linéaires
DUNOD, 1969
- (4) M. ROBERT
A. MAIRE Asservissement de position en fin de freinage (phase arrêt - station)
Note MATRA, Q721, n° 516, 1972
- (5) R. LARDENNOIS
M. ROBERT Définition fonctionnelle des sécurités anti-collision et survitesse
Note MATRA, N721, n° 462, 1972
- (6) M. ROBERT
A. MAIRE Description du système de pilotage. Régulation de trafic et sécurité V.A.L.
Note MATRA, Q721, n° 480, 1972
- (7) J.P. VERVAEKE Rapport de dimulution V.A.L.
Note U.S.T.L., n° 5-73, 1973
- (8) R. GABILLARD Inventaire et analyse de solutions technologiques d'automatismes
Document E.P.A.L.E., annexe.1., 1971
- (9) V.A.L. Fascicule de synthèse.
Etude de système pour un moyen de transport en commun discontinu en site propre
Document E.P.A.L.E., 1971
- (10) M. BEAUSSIER Simulation numérique - V.A.L.
Etude du fonctionnement des fonctions de pilotage
Note MATRA, Q721, n° 582, 1972

- (11) M. BEAUSSIER Présentation générale de la simulation numérique du système V.A.L.
Note MATRA, Q240/810, 1973
- (12) J.P. PERRIN Pilotage automatique sur le réseau métropolitain de PARIS
Automatisme, Tome XV, n°5, Mai 1970, pp.210-214
- (13) L. GUIEYSSE L'automatisation du Métropolitain de PARIS. Buts et perspectives d'avenir
Revue Générale d'Electricité, Février 1969, Tome 8, n°2, pp.146-150
- (14) E. DACLIN
M. BLANCHARD Quelques aspects "théoriques" du pilotage automatique
Automatisme, tome XV, n°5, 1970, pp.6-10
- (15) L. GUIEYSSE Mise au point d'un système de conduite automatique des trains sur le réseau du métro de PARIS
Documents R.A.T.P., NTA4/1967, pp.229-238
- (16) R. LEHMANN Systèmes de commande automatique du mouvement des trains. Concepts généraux. Contrôle centralisé de véhicules guidés.
Documents CGA, Juin 1973, pp.5-7
- (17) Engins MATRA Système de transport ARAMIS. Description du pilotage des véhicules.
Conférence AFCET, Février 1973
- (18) P. BEAURENT Thèse Docteur-Ingénieur, LILLE, à paraître
- (19) P. OVIGNY Contribution à la réalisation d'un banc d'essais pour le pilote des rames du V.A.L.
D.E.A., LILLE, le 11 Juillet 1972
- (20) M. ROBERT
A. MAIRE Rapport de simulation V.A.L.
Note MATRA, Q721, n°510
Mise au point de l'asservissement de vitesse, 1972

ANNEXE.1.

BANC D'ESSAIS DU PILOTE AUTOMATIQUE

La mise au point du pilote automatique et la simulation d'un véhicule circulant le long d'une ligne de transport nécessite la construction d'un banc d'essais.

I. DESCRIPTION GENERALE

La figure.1. montre les différentes fonctions assurées par le banc d'essais. On distingue 3 parties principales :

- 1) la simulation de la voie
- 2) le pilote automatique
- 3) la simulation du véhicule.

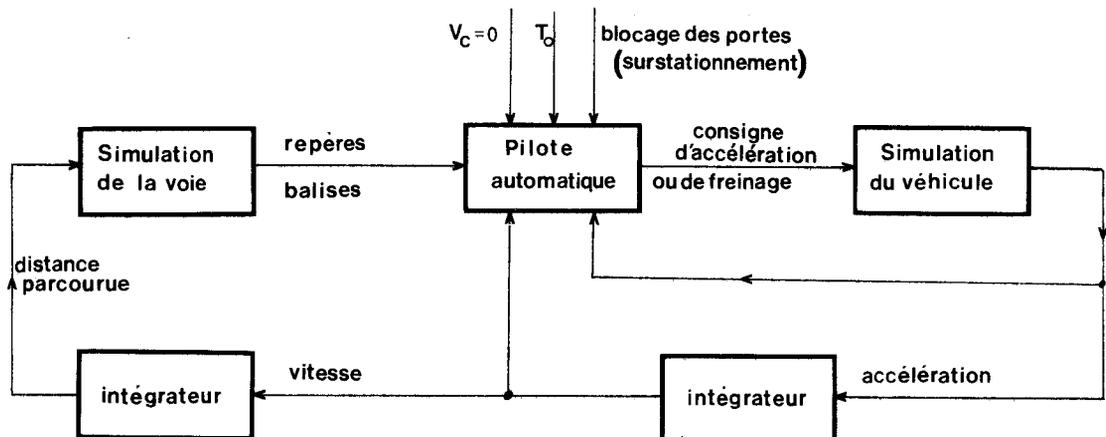


Figure 1

1.1. Simulation de la voie

Les différentes informations nécessaires au pilotage sont obtenues par lecture d'une bande perforée. Les informations sont codées sur la bande en un total de 16 bits. On distingue :

- . la longueur des interplots avec une précision de 2cm
- . le signe et la valeur de la pente
- . les balises de limitation de vitesse
- . les indications de position des stations et les temps de stationnement.

Chaque fois qu'un véhicule a parcouru un interplot, le lecteur de bande lit la perforation suivante. Les nouvelles informations sont envoyées vers le pilote et le dispositif de simulation du véhicule.

1.2. Simulation du véhicule

La cinématique du véhicule est obtenue grâce à une calculatrice numérique fonctionnant en temps réel.

Le programme de calcul permet d'obtenir toutes les 250ms la valeur de l'accélération du véhicule en fonction des caractéristiques des moteurs, de l'effort résistant, de la pente de la voie et de la masse du véhicule.

Parmi les grandeurs d'entrée, on distingue celles qui sont fournies par le pilote automatique :

- . la consigne d'accélération
 - . l'indication de commutation traction - freinage ou freinage - traction,
- et celles qui sont fournies par le lecteur de bande :
- . signe et valeur de la pente de la voie.

En traction, le programme de calcul détermine si les moteurs sont suffisamment puissants (compte tenu de la pente de la voie, des frottements et de la vitesse du véhicule) pour respecter la consigne d'accélération fournie par le pilote.

Si la réponse est affirmative, la calculatrice donne après un retard pur de 250 millisecondes, une accélération réelle prise par le véhicule égale à l'accélération de consigne.

Si la réponse est négative, la calculatrice donne toujours après un retard pur de 250ms, la valeur maximale et l'accélération prise par le véhicule dans les conditions considérées.

En freinage l'hypothèse d'un bon fonctionnement de la conjugaison des freins pneumatiques et électriques a été retenue. Quelles que soient les conditions de simulation, l'accélération du véhicule prendra systématiquement la valeur de l'accélération de consigne après un retard pur de 250ms.

L'effort de traction maximum fourni par les moteurs et l'effort résistant sont obtenus à partir des relations suivantes :

$$E_{ETmax} = \frac{364 \cdot 10^4}{(1,5+V)^2} \quad \text{limité à 25000 Newton}$$

$$E_R = \text{Partie positive } [1450 - 360V] + 1550 + 2,98V^2 \text{ Newton}$$

Ces valeurs correspondent aux prototypes du V.A.L. équipés des moteurs C.E.M. type GLM332 (shuntés à 78%).

L'accélération maximum du véhicule est alors donnée par la relation :

$$\gamma_{R(max)} = \left[E_{ETmax} - E_R \right] \frac{1}{M} + P_g$$

II. CIRCUITS ANNEXES

La calculatrice est suivie d'intégrateurs numériques permettant d'obtenir, à partir de l'accélération réelle du véhicule, la vitesse réelle et la distance parcourue.

D'autre part le banc d'essais comprend un tableau synoptique affichant simultanément en temps réel :

- . le nom de l'interstation de la ligne du V.A.L. où se trouve le véhicule
- . le temps de parcours de chaque interstation
- . le retard du véhicule au départ de station
- . le retard du véhicule à l'arrivée en station
- . l'heure d'arrivée
- . le type de commande (traction - marche sur l'erre - freinage).

Enfin une table traçante permet d'obtenir les différents diagrammes :

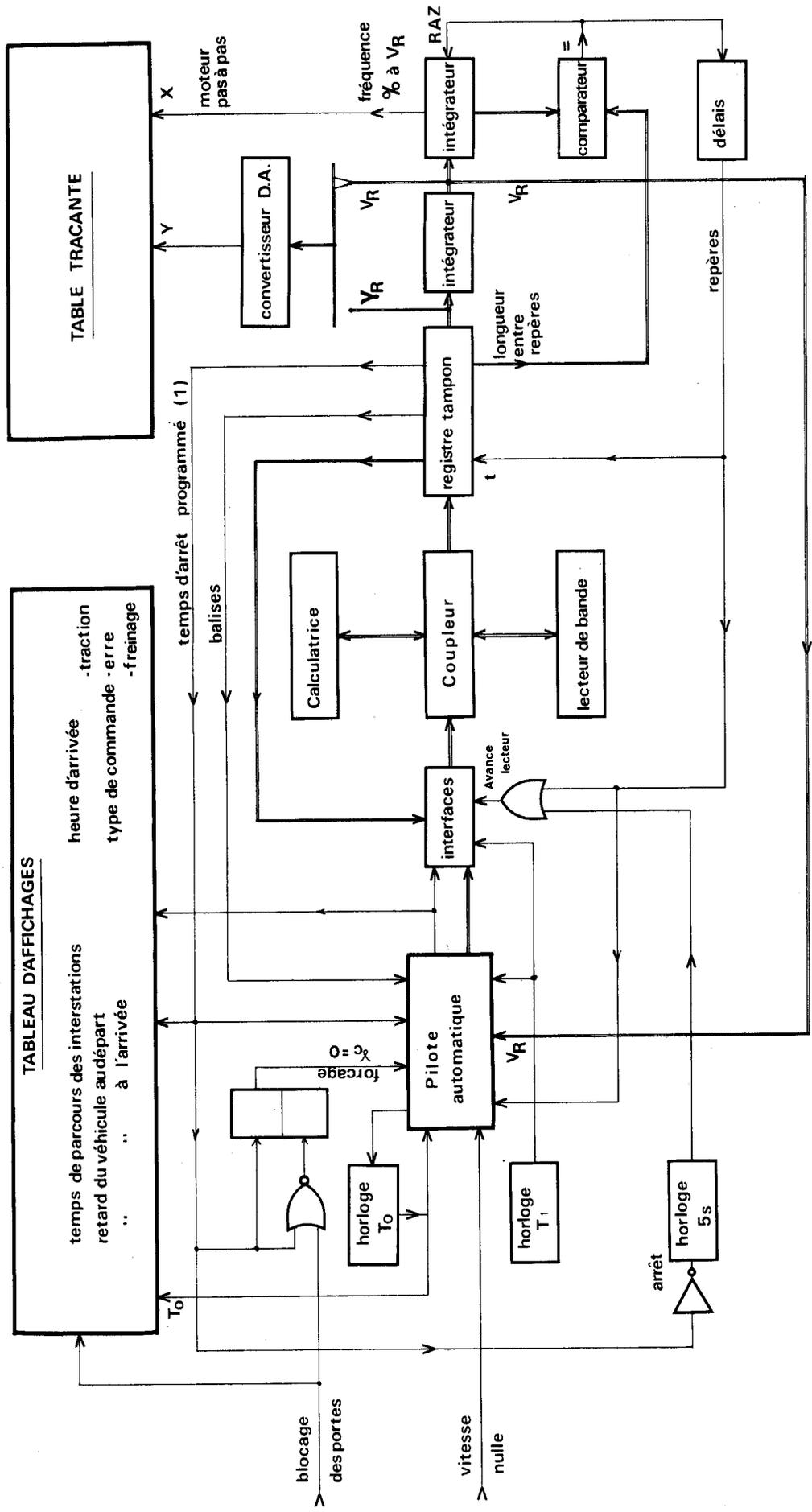
- . V_R ou $\gamma_R = f(D)$ ou $f(t)$
- . V_C ou $\gamma_C = f(D)$ ou $f(t)$
- . $t = f(D)$ et $t = f(D+d)$

D est la distance parcourue

d est la distance d'arrêt du véhicule donnée par la relation :

$$d = A V_R^2 + B V_R + C$$

La planche.40. donne le bloc diagramme général du banc d'essais.



ANNEXE.2.

PROGRAMME DE SIMULATION NUMERIQUE DU PILOTE AUTOMATIQUE

- I₁ Asservissement de vitesse (planche.41.)
- I₂ Dispositif d'arrêt en station (planche.42.)

Nous rappelons ci-dessous la signification des différents symboles utilisés dans le programme de calcul.

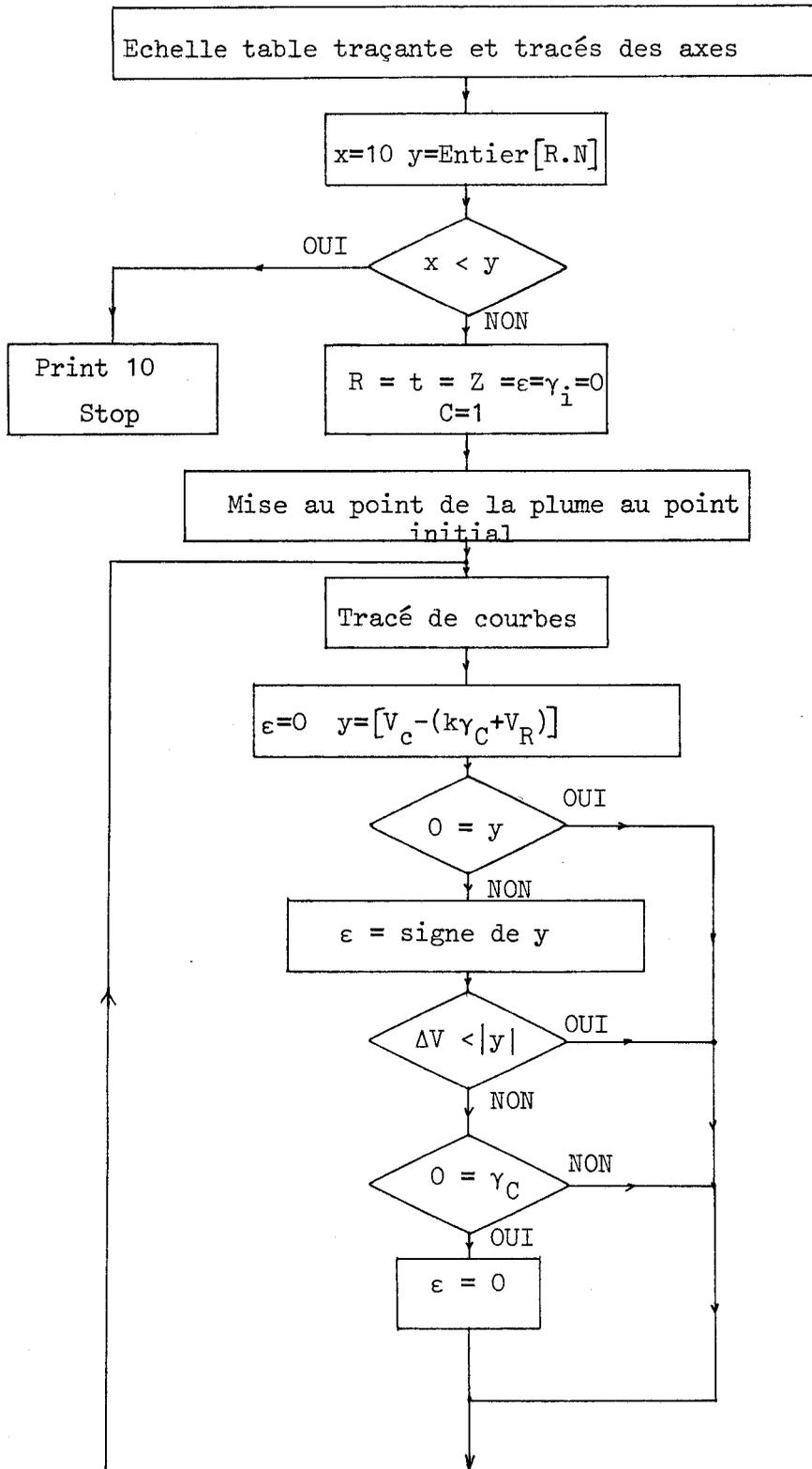
γ_C	consigne d'accélération
γ_R	accélération réelle du véhicule
γ_M	accélération maximale (en freinage)
γ_0	accélération nominale ($1,3m/s^2$)
γ_i	accélération réelle avant retard
γ_e	accélération due aux frottements et à la pente de la voie
γ_{RM}	accélération maximum du véhicule à la vitesse considérée
V_C	vitesse de consigne
V_R	vitesse réelle du véhicule
V_L	vitesse limite
ΔV	erreur de vitesse maximale n'entraînant pas de correction
ϵ	signe de $V_C - (V_R + k\gamma_C)$ signe + $\rightarrow \epsilon = 1$ signe - $\rightarrow \epsilon = -1$ $V_C - (V_R + k\gamma_C) = 0 \rightarrow \epsilon = 0$
D	distance parcourue
X_0	longueur de l'interstation
L(N')	distance du repère N' jusque la station
N	nombre de calculs par seconde
t	nombre de calculs effectués
k	coefficient d'avance de phase
d	compteur assurant le délai nécessaire pour annuler la commande du hâcheur

R	retard de l'asservissement d'accélération
τ	temps de commutation en traction - freinage
T_0	temps de passage théorique entre 2 repères
P	penne de la voie
M_1	masse du véhicule
M_2	masse tournante
C	type de commande
	traction $\rightarrow C=1$
	freinage $\rightarrow C=-1$
	marche sur l'erre $\rightarrow C=0$
Z	consigne de remise à zéro de la consigne d'accélération ($Z=1$)

Registres auxiliaires

R_y	(registres réservés pour élaborer le retard pur de l'asservissement d'accélération)
I	registre utilisé pour l'interpollation de la vitesse de consigne entre 2 repères
autres registres : r ; T ; A ; B ; x ; y	

1.1. ASSERVISSEMENT DE VITESSE



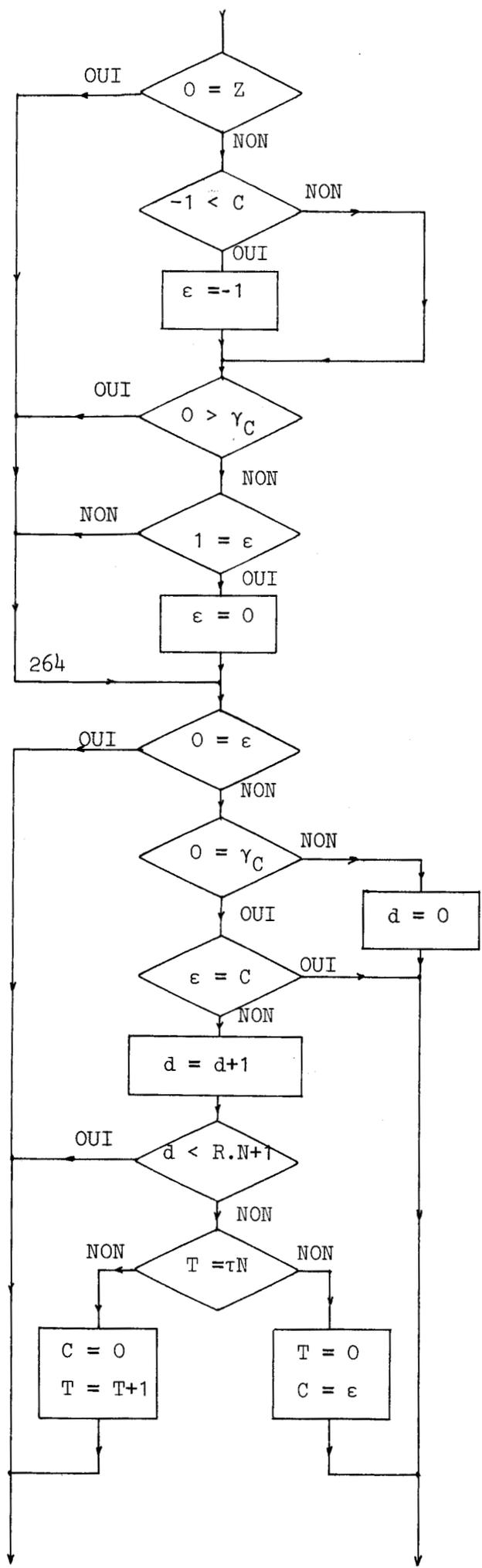
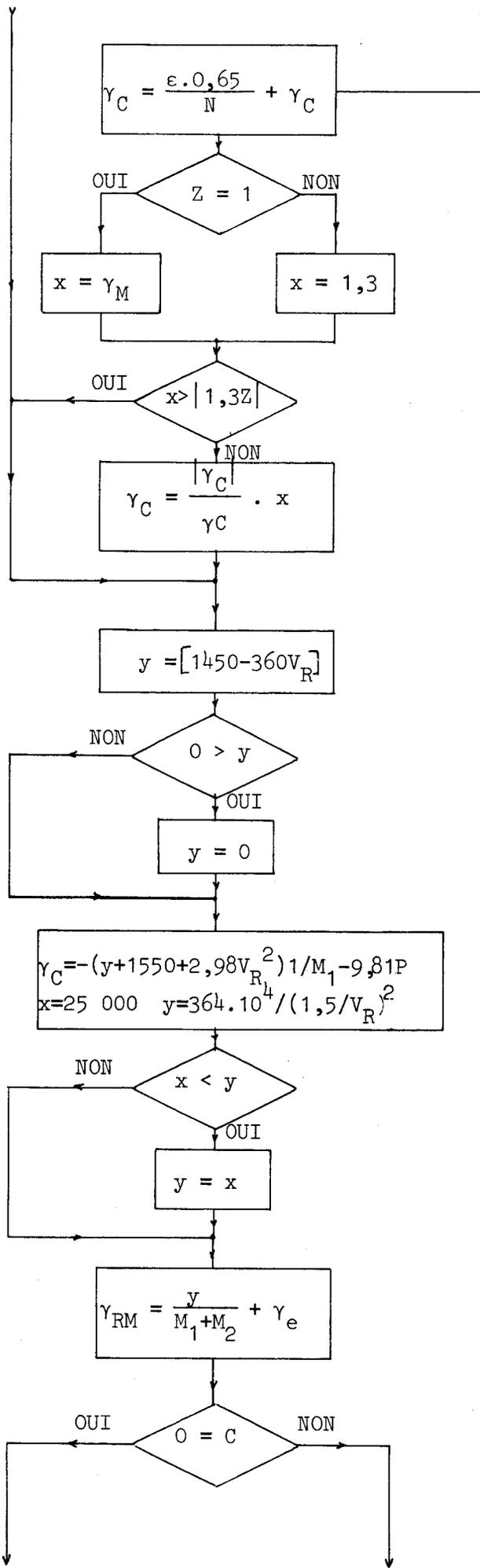
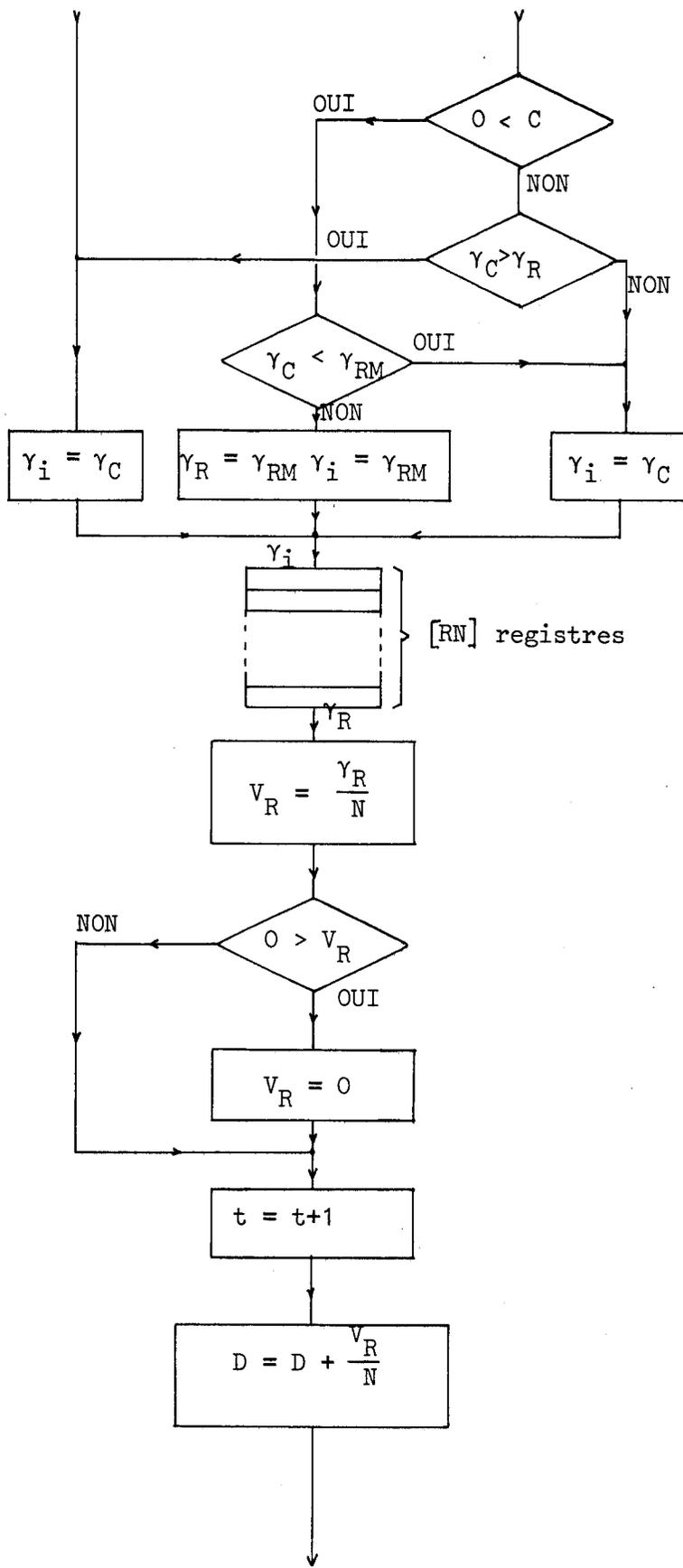


Planche.41.b.

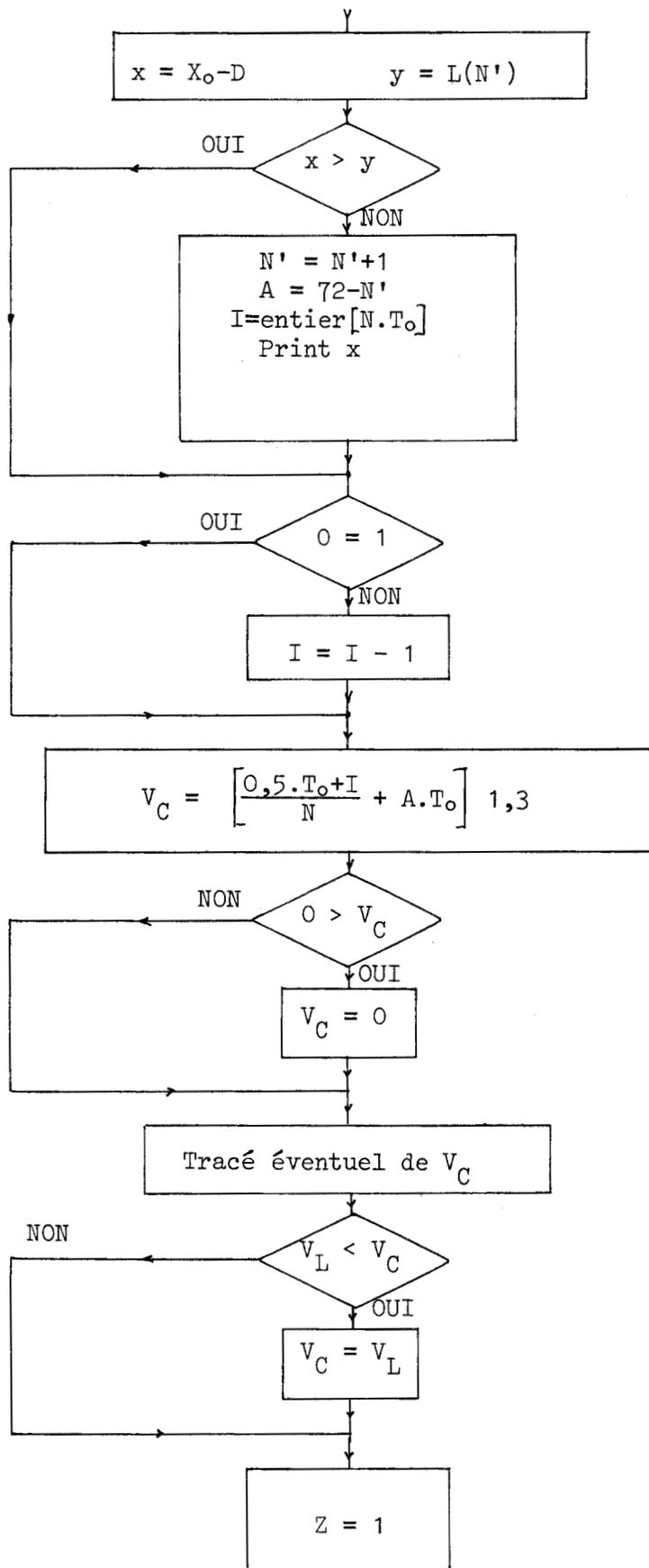




150 ou arrêt en station



1.2. DISPOSITIF D'ARRET EN STATION



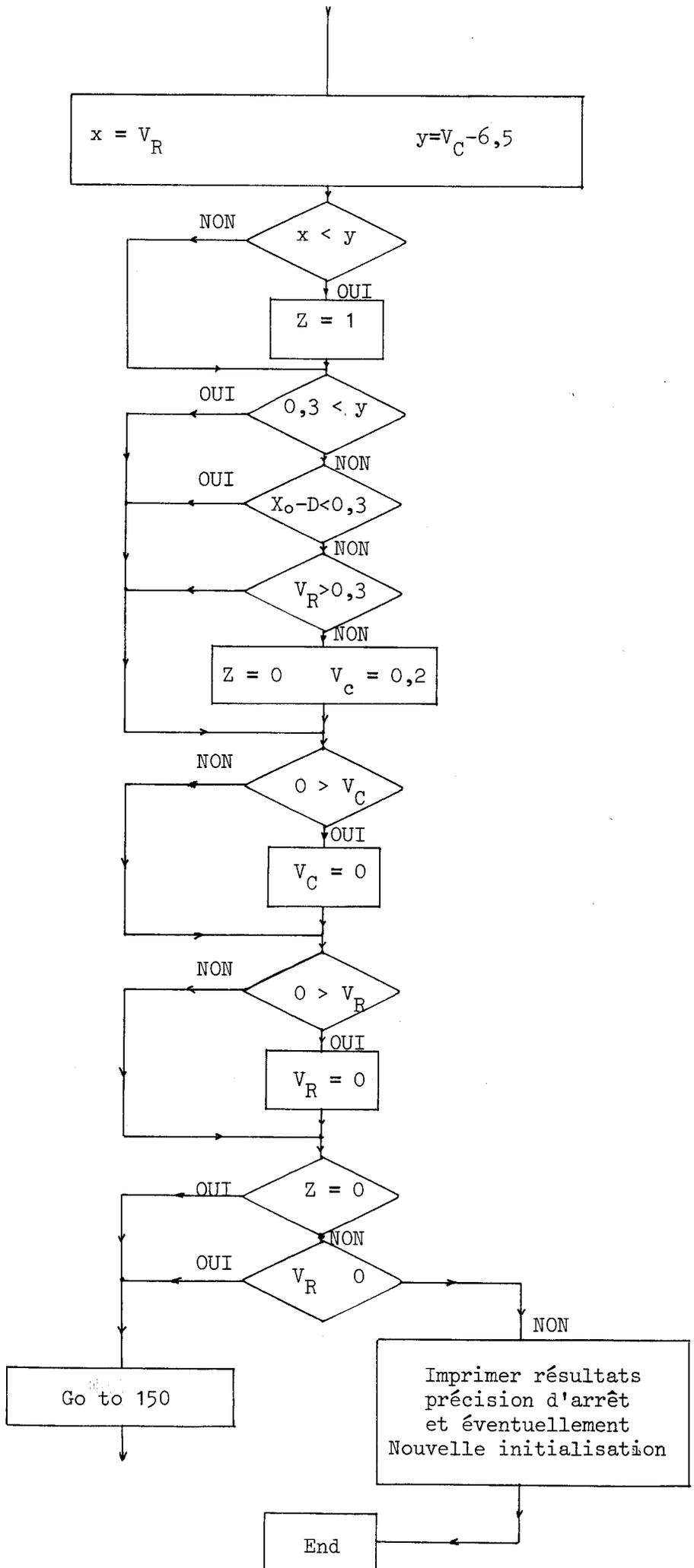


Planche.42.b.



ANNEXE.3.

DISPOSITION DES REPERES SUR LA VOIE

Nous donnons ci-dessous la méthode de calcul de la disposition des repères et balises dans quelques configurations typiques.

1) Départ de station dans un alignement droit ou dans une courbe

La disposition des repères est déterminée de façon qu'un véhicule qui suit son horaire en rencontre un toutes les secondes ($T_0=1s$) tant que V_C est inférieur à 16,9m/s et toutes les 1,5secondes au-delà de cette vitesse.

Il est donc nécessaire de calculer la valeur de la vitesse de consigne en même temps que la position des repères. Les résultats sont obtenus à l'aide du programme de simulation numérique du véhicule décrit en annexe.1. (asservissement de vitesse), celui-ci étant complété par le sous-programme décrit ci-dessous (planche.43.).

Dans le cas d'une limitation de vitesse au départ de station, il suffit d'initialiser le registre " V_M " à la valeur souhaitée et d'indiquer à quelle distance du départ de station se situe la fin de la limitation de vitesse. Lorsque la vitesse de consigne atteint la valeur V_M , on obtient la position de la balise B_1 . La balise B_2 correspond à la fin de la zone à vitesse limitée.

Les valeurs ci-dessous correspondent au départ de station dans un alignement droit et dans une courbe où la vitesse est limitée à 10,4m/s.

Alignement droit $V_0=16,4\text{m/s}$ $V_M=22,1\text{m/s}$	Courbe $V_p = 10,4\text{m/s}$ fin de limitation à 101,40m
0,06	0,06
0,59	0,59
1,71	1,71
3,01	3,01
4,31	4,31
5,61	5,61
6,91	6,91
8,21	8,21
9,51	9,45
15,19	10,22
16,75	10,40
18,58	10,40
21,06	10,40
21,35	10,40
21,97	10,47
23,18	11,04
22,1	12,18
22,1	13,37
"	19,98
	20,51
	21,61
	22,1
	22,1



2) Arrivée en station en alignement droit

Dans ce cas, comme le véhicule peut dans tous les cas décélérer à $1,3\text{m/s}^2$ depuis la vitesse maximale jusque l'arrêt, la position des repères et de la balise B_3 est obtenue à partir des relations (54) et (55) du chapitre (III.1.3.), soit :

$$V_C = \gamma_o T_o (N_o - N) \quad (54)$$

$$\sqrt{2\gamma_o(x_o-x)} - k\gamma_o = \gamma_o T_o (N_o - N) \quad (55)$$

La relation (55) n'est valable que jusque $V_C = 22,1\text{m/s}$ ($(N_o - N) = 17$).
La distance de ce repère au point d'arrêt est donc donnée par :

$$D_{17} = \frac{\gamma_o T_o (17) + k\gamma_o}{2\gamma_o}$$

Pour : $k = 1,25\text{s}$ $\gamma_o = 1,3\text{m/s}^2$ $T_o = 1\text{s}$ $D_{17} = \underline{216,49 \text{ mètres}}$

Comme la vitesse de consigne V_C doit être établie jusque :

$V_C = 22,1 + 6,5\text{m/s} = 28,6\text{m/s}$, la balise B_3 se situera à 5 repères plus loin (espacés de $22,1\text{m/s}$) d'où :

$$D_{B_3} = D_{17} + 5 \times 22,1 = 326,99 \text{ mètres}$$

D'autre part, lorsque la vitesse de consigne s'annule, la vitesse réelle du véhicule est encore égale à $(k\gamma_o)\text{m/s}$.

Il met alors environ 2 secondes pour s'arrêter, nous plaçons donc deux repères supplémentaires. Ces repères ne sont utilisés que pour le dispositif de régulation d'horaire. Leur position n'est pas critique et nous les plaçons respectivement à 30 et 60 cm du point d'arrêt théorique.

La distance des différents repères et de la balise B_3 jusqu'au point d'arrêt est donné sur le tableau suivant.

Distance repère au point d'arrêt		Valeur de la vitesse de consigne
B ₃	326,99 mètres	28,6m/s
	304,89	27,3
	282,79	26
	260,69	24,7
	238,59	23,4
	216,49	22,1
	193,42	20,8
	171,64	19,5
	151,17	18,2
	131,99	16,9
	114,12	15,6
	97,54	14,3
	82,27	13
	68,29	11,7
	55,62	10,4
	44,24	9,1
	34,17	7,8
	25,39	6,5
	17,92	5,2
	11,74	3,9
	6,87	2,6
	3,29	1,3
	1,02	0
	0,60	0
	0,30	0

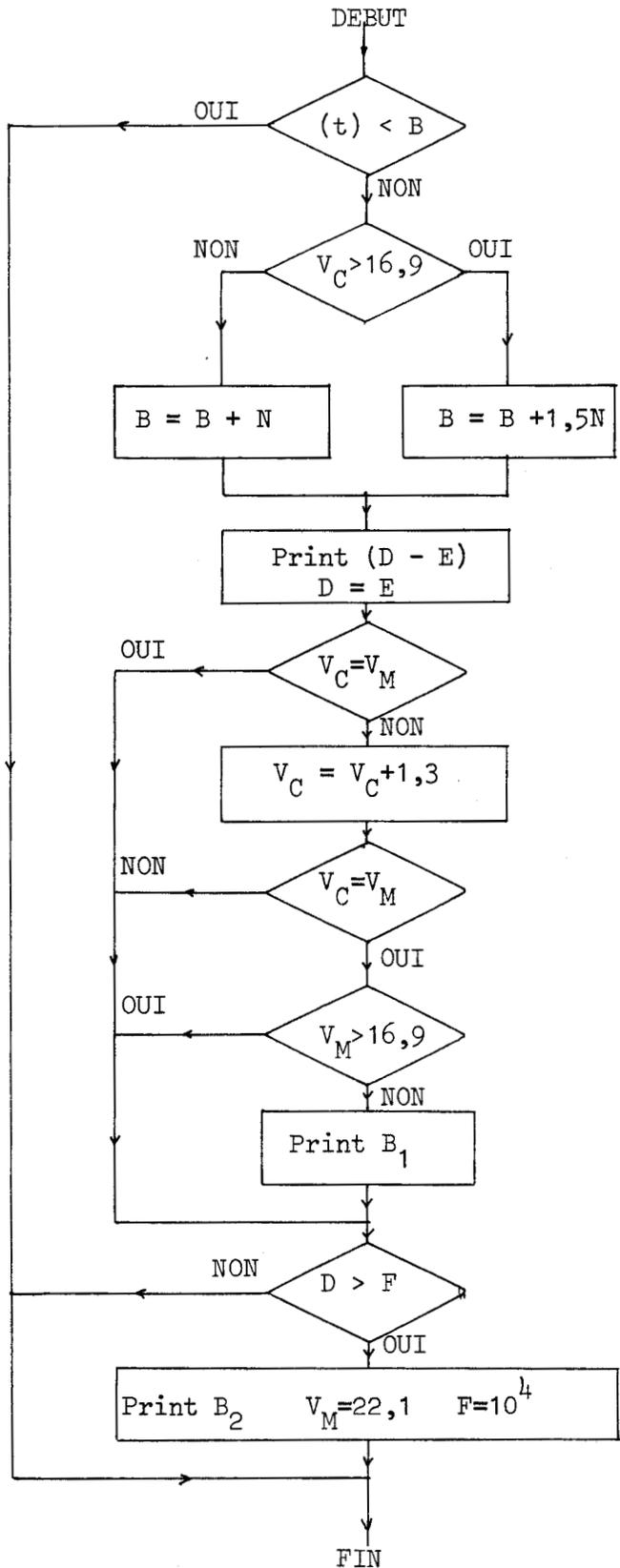
Pour chaque cas particulier de diminution de la vitesse de programme, on détermine d'une façon similaire la position des différentes balises et repères.



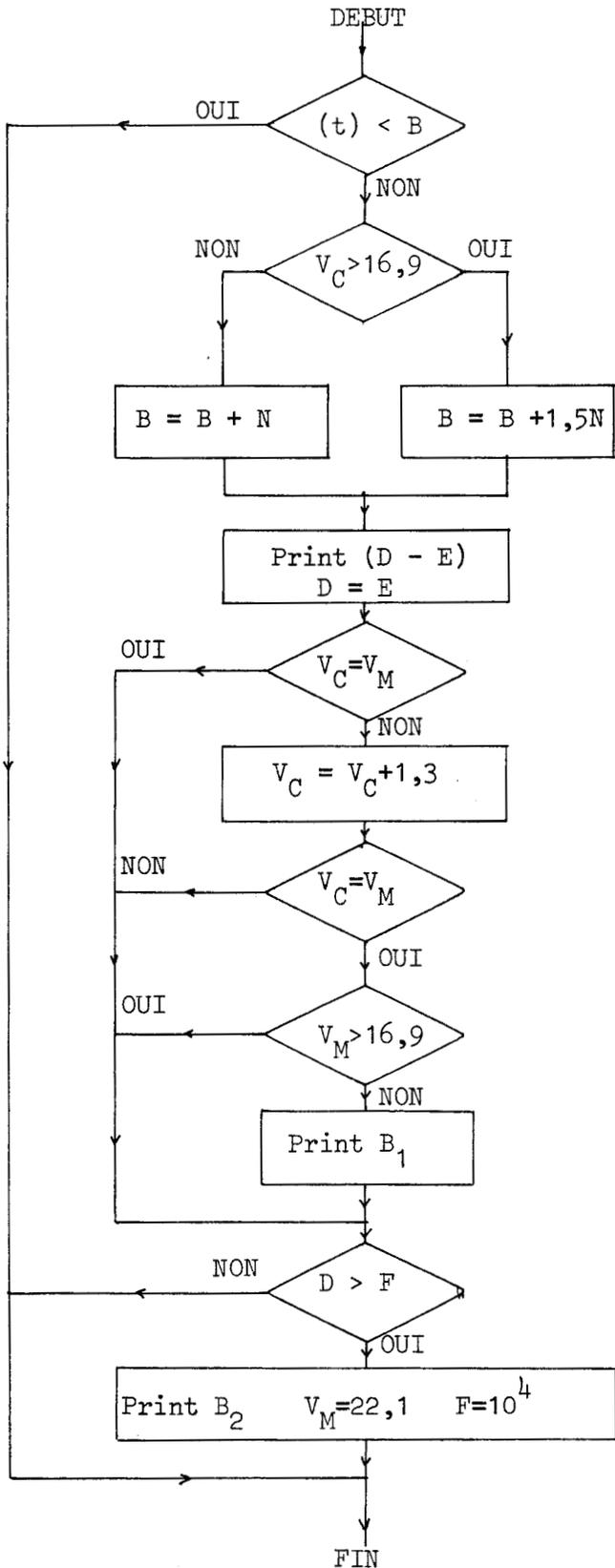
Initialisation

$V_C = 2,6\text{m/s}$ $V_L = 16,9\text{m/s}$
 $V_M = 22,1\text{m/s}$ en (alignement droit)
 $V_M = \dots \text{m/s}$ en (courbe) (multiple de 1,3)
 $F = (\text{distance} : \text{fin de limitation})$

Registres auxiliaires :
 $B = N$ $(t), E = 0$ $D = 0$



Initialisation
 $V_C = 2,6\text{m/s}$ $V_L = 16,9\text{m/s}$
 $V_M = 22,1\text{m/s}$ en (alignement droit)
 $V_M = \dots \text{m/s}$ en (courbe) (multiple de 1,3)
 $F = (\text{distance} : \text{fin de limitation})$
Registres auxiliaires :
 $B = N$ $(t), E = 0$ $D = 0$



ANNEXE.4.

DISPOSITION DES REPERES LE LONG DE LA LIGNE EN PHASE D'ACCELERATION
OU DE FREINAGE

I. PHASE D'ACCELERATION

Les repères ne peuvent pas être placés suivant une progression arithmétique de raison constante puisque les moteurs ne sont pas capables de fournir l'accélération nominale jusque la vitesse de régime 60km/h. D'autre part, quelle que soit l'implantation des repères, l'accélération et sa dérivée sont limitées par l'asservissement de vitesse. Pour ces différentes raisons, les repères seront placés pendant cette phase en tenant compte des possibilités de montée en vitesse d'un véhicule réel.

Tant que la vitesse de consigne obtenue par le comptage des repères (voir chapitre limitation de vitesse), est inférieure ou égale à 60km/h, les repères sont placés sur la voie pour être lus toutes les secondes (la valeur de T_0 a été fixée précédemment à 1 seconde). Lorsque la vitesse de consigne est supérieure à 60km/h, les repères sont alors placés de façon à être lus toutes les $\frac{4}{3}$ de secondes, cette disposition est également utilisée dans les lignes droites.

De cette manière, même pour les phases de transition, le temps de parcours d'un véhicule qui suit son horaire est obtenu par comptage des repères en ajoutant une unité tous les 3 repères rencontrés lorsque la vitesse limite est supérieure à 60km/h.

II. PHASE DE FREINAGE

Dans les phases de ralentissement, les repères sont placés en progression arithmétique pour un véhicule roulant à la vitesse maximale. Cette disposition est nécessaire pour obtenir un arrêt précis en station.

Montrons que l'on peut déterminer le temps de parcours d'un véhicule qui suit son horaire avec une erreur négligeable en utilisant le même processus que précédemment.

a) le ralentissement a lieu dans une zone à vitesse limitée inférieure à 60 km/h

Ce cas ne pose aucun problème puisque, dans une telle zone un véhicule suivant son horaire passe bien d'un repère au suivant en 1 seconde (la vitesse nominale correspond à la vitesse de programme).

b) le ralentissement a lieu en ligne droite

Dans ce cas, un véhicule à l'heure ne rencontre pas un repère toutes les secondes au début de la phase de freinage.

Si l'on détermine comme précédemment le temps de parcours du véhicule idéal qui suit son horaire, l'erreur obtenue est donnée par la relation suivante :

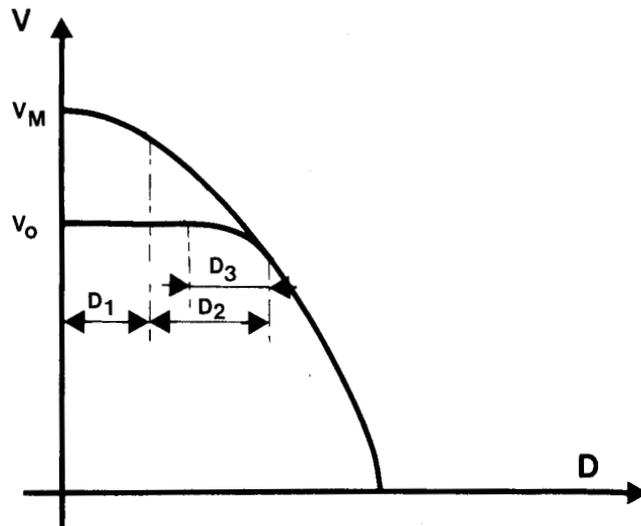
$$\Delta t = (t_2 - t_1) - \left[\frac{V_M - V_0}{3\gamma_0} \right]$$

t_1 est le temps de parcours de la distance $(D_1 + D_2)$ d'un véhicule roulant à la vitesse maximale

t_2 est le temps de parcours de cette même distance par un véhicule roulant à la vitesse nominale.

En effet, on a :

$$1) \quad t_1 = \frac{\gamma}{\dot{\gamma}_0} + \frac{(V_M - V_0)}{\gamma_0}$$
$$t_2 = \frac{(D_1 + D_2) - D_3}{V_0} + \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0}$$



$$2) \quad D_1 = V_M \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} - \frac{1}{6} \frac{\gamma_0^3}{\dot{\gamma}_0^2}$$

$$D_2 = \left(\frac{V_M^2}{2\gamma_0} - \frac{1}{2} V_M \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} \right) - \left(\frac{V_0^2}{2\gamma_0} - \frac{1}{2} V_0 \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} \right)$$

$$D_3 = V_0 \frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} - \frac{1}{6} \frac{\gamma_0^3}{\dot{\gamma}_0^2}$$

de 1) et 2), on obtient :

$$(t_2 - t_1) = \frac{(V_M - V_0)}{2V_0} \left[\frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} + \frac{(V_M - V_0)}{\gamma_0} \right]$$

soit :

$$\Delta t = \left(\frac{V_M - V_0}{2V_0} \right) \left[\frac{\gamma_0}{\dot{\gamma}_0} + \frac{V_M - V_0}{\gamma_0} \right] - \frac{V_M - V_0}{3\gamma_0}$$

application numérique

$$V_M = 22,1 \text{ m/s}$$

$$V_0 = 16,9 \text{ m/s}$$

$$\gamma_0 = 1,3 \text{ m/s}^2$$

$$\dot{\gamma}_0 = 0,65 \text{ m/s}^3$$

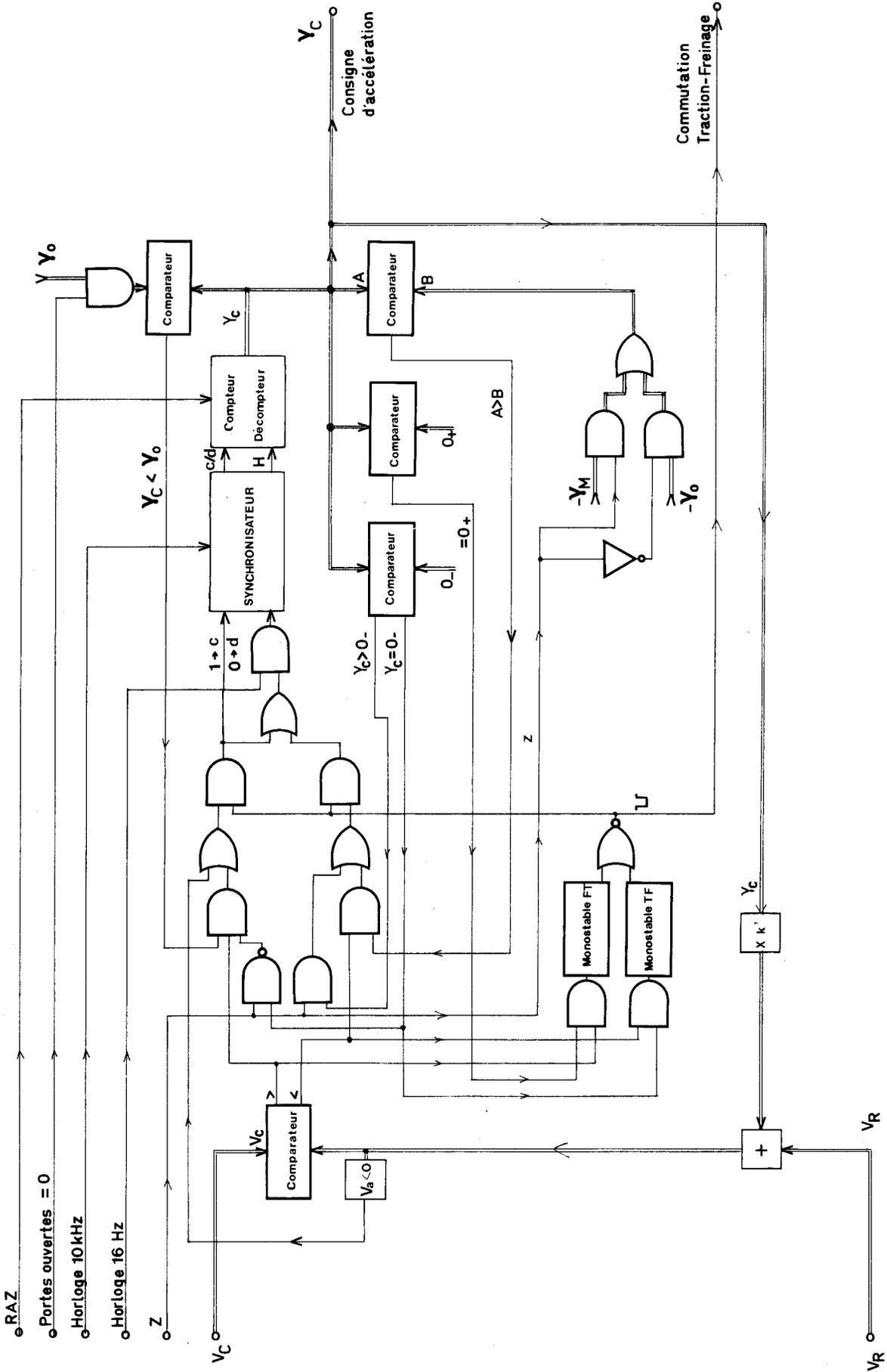
$$\Delta t \approx -0,4 \text{ s}$$

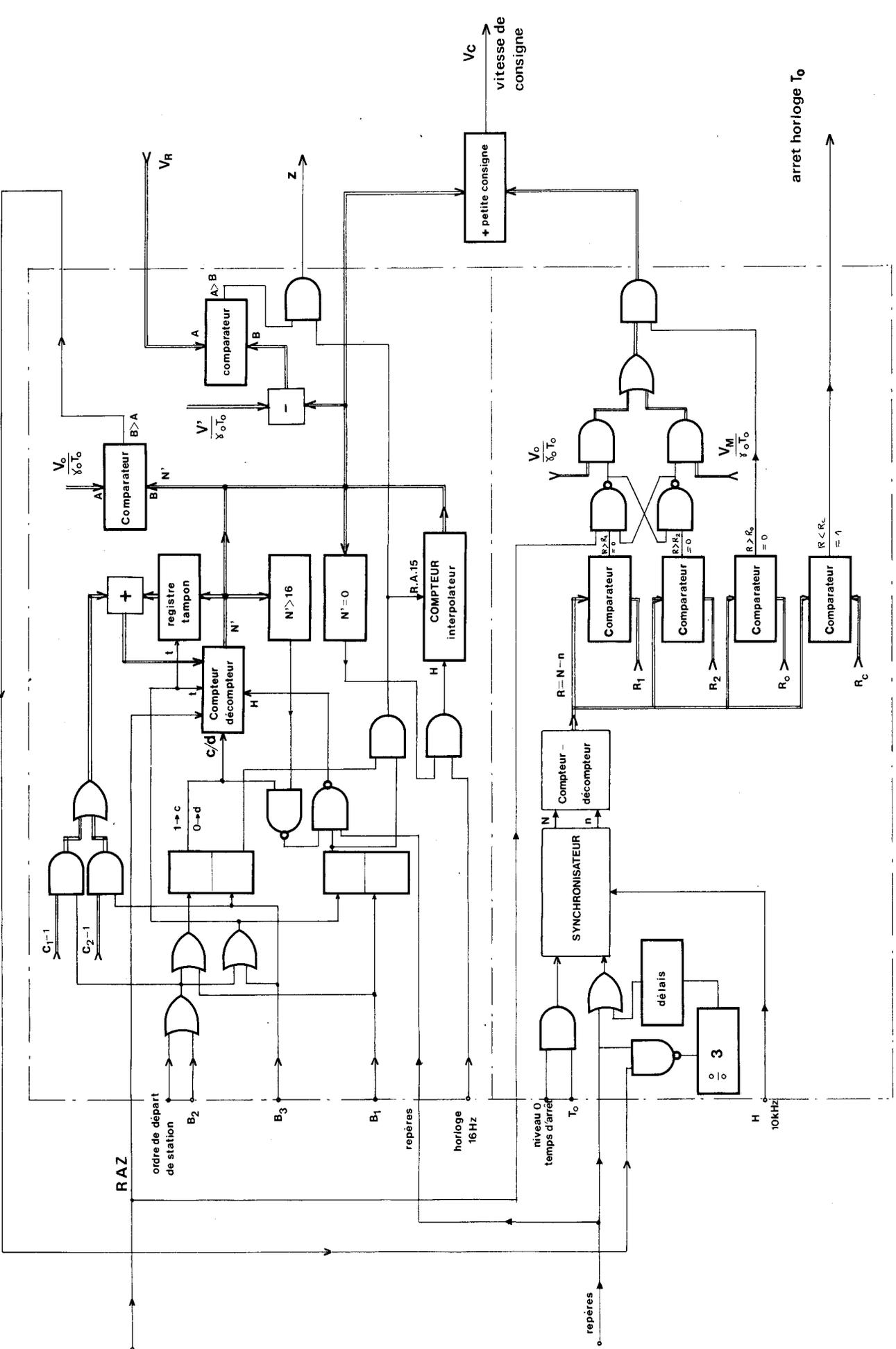
On constate que l'erreur obtenue est négligeable.

ANNEXE.5.

La planche.44. et .45. donnent respectivement les schémas-blocs de l'asservissement de vitesse et du dispositif d'élaboration des consignes.

Sur ces schémas, les connections doubles représentent en fait autant de liaisons que le nombre de bits utilisés pour transmettre l'information considérée.





ANNEXE.6.

Les planches 25 à 39 représentent les diagrammes :

$V = f(D)$ en marche normale et en marche accélérée

$t = f(D)$ et $t = f(D+d)$ en marche normale

V vitesse du véhicule

D distance parcourue

t temps

d distance minimale pouvant séparer deux véhicules sans intervention du dispositif anti-collision.

Nous rappelons ci-dessous les longueurs des différentes interstations :

Planches	Interstations	longueur
25	Centre directionnel - Fives	1888,578m.
26	Fives - Mons	914,087
27	Mons - Flers	1333,433
28	Flers - Pont de Bois	1100,102
29	Pont de Bois - Centre Ville Est	582,534
30	Centre Ville Est - Triolo	906,594
31	Triolo - Cité Scientifique 1	916,594
32	Cité Scientifique 1 - Cité Scientifique 2	1694,394
33	Cité Scientifique 2 - Triolo	916,594
34	Triolo - Centre Ville Est	906,279
35	Centre Ville Est - Pont de Bois	582,584
36	Pont de Bois - Flers	1100,102
37	Flers - Mons	1333,433
38	Mons - Fives	914,087
39	Fives - Centre directionnel	1871,529
		<hr/> 16960,559m.

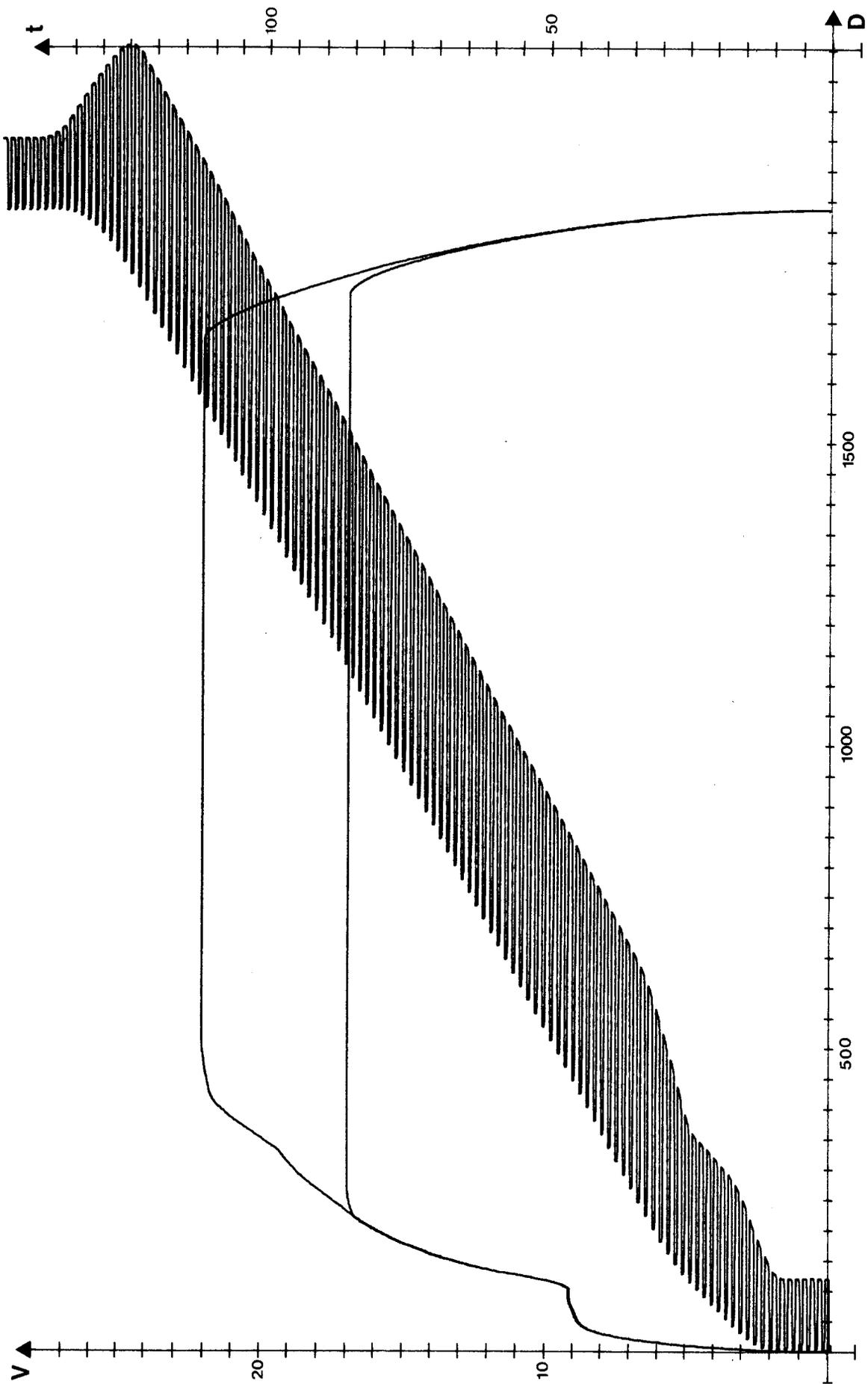


Planche. 25. CENTRE DIRECTIONNEL - FIVES



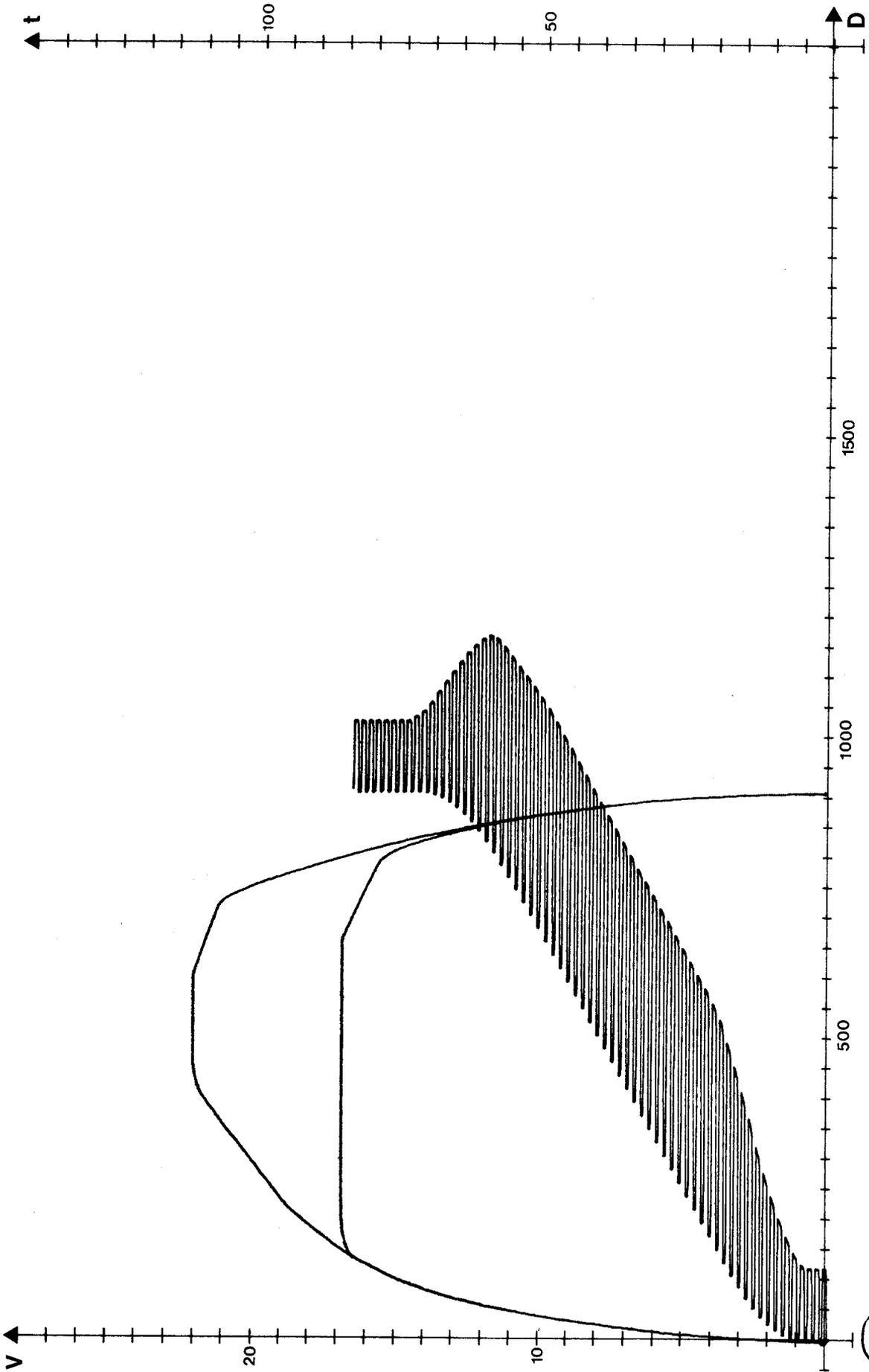


Planche. 26. FIVES - MONS



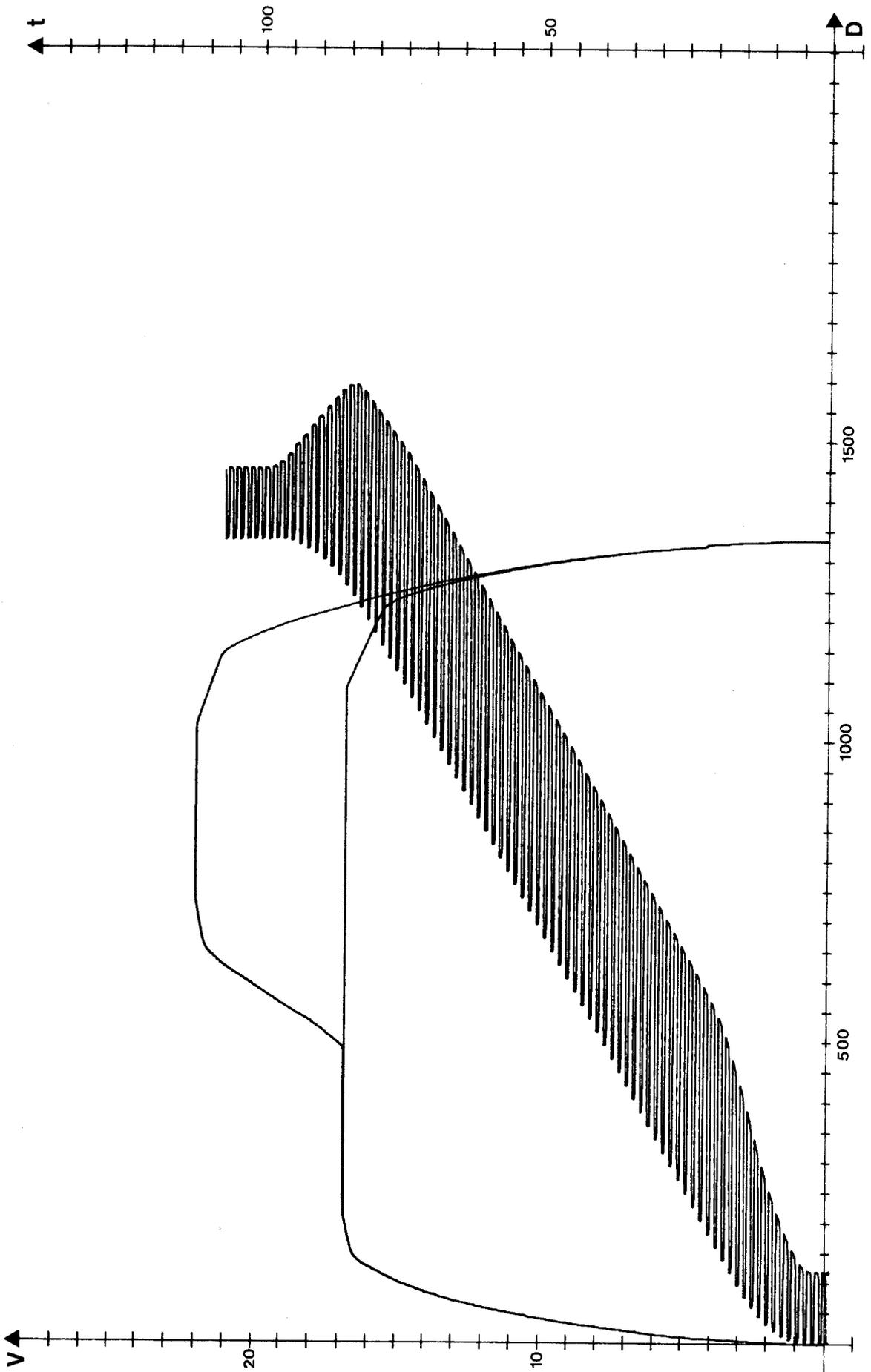


Planche. 27. MONS - FLERS



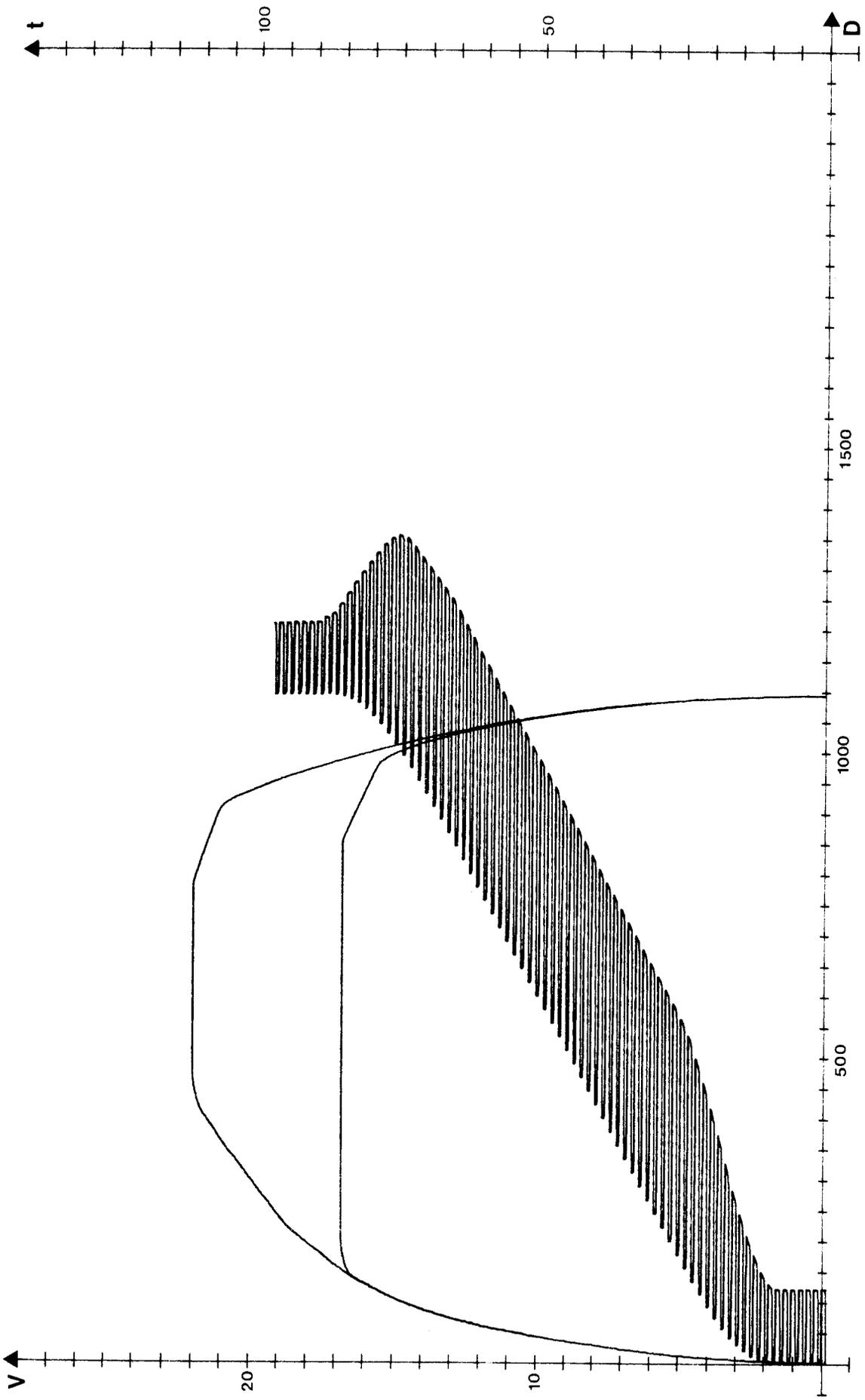


Planche. 28. FLERS - PONT DE BOIS



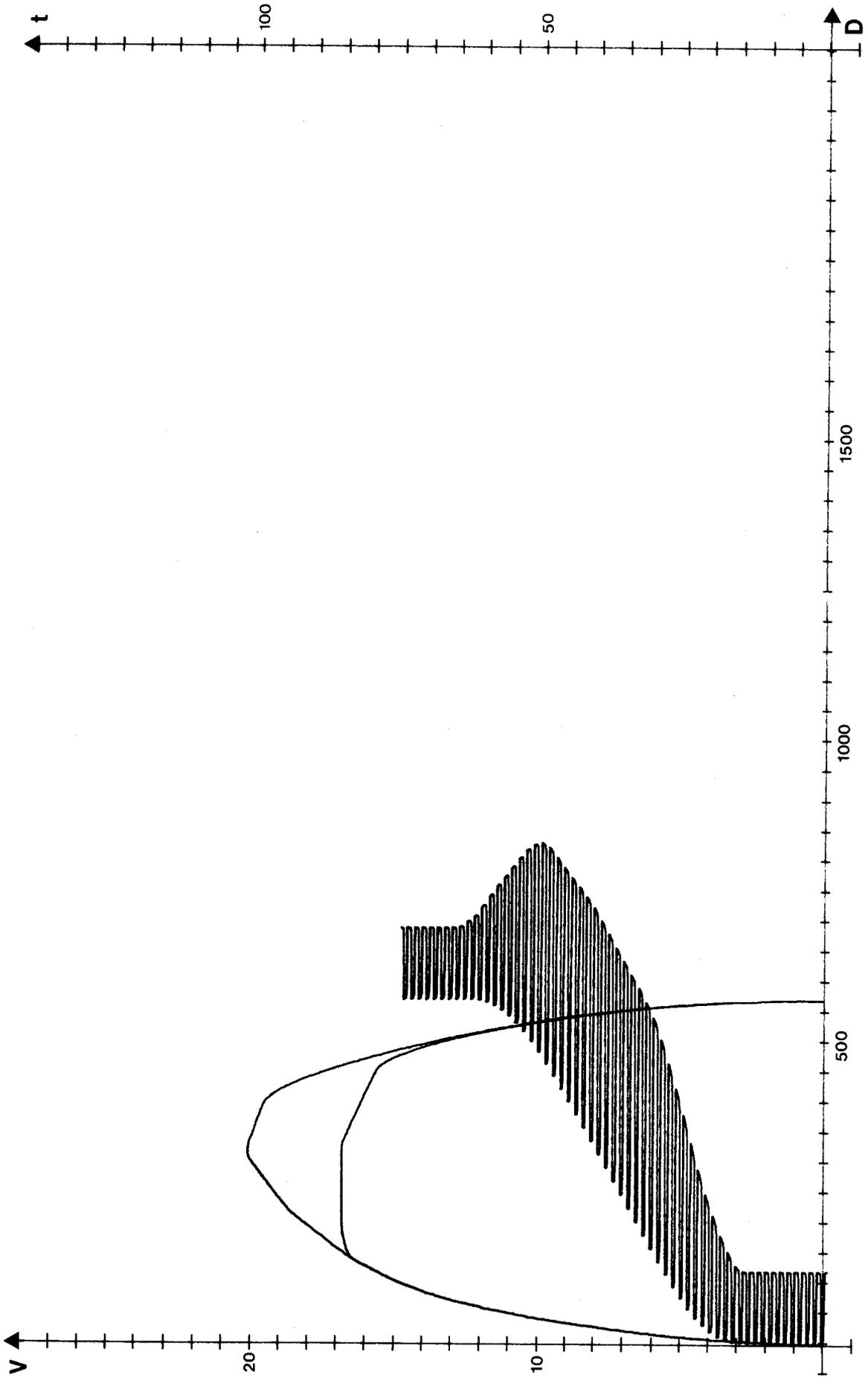


Planche. 29. PONT DE BOIS - CENTRE VILLE EST



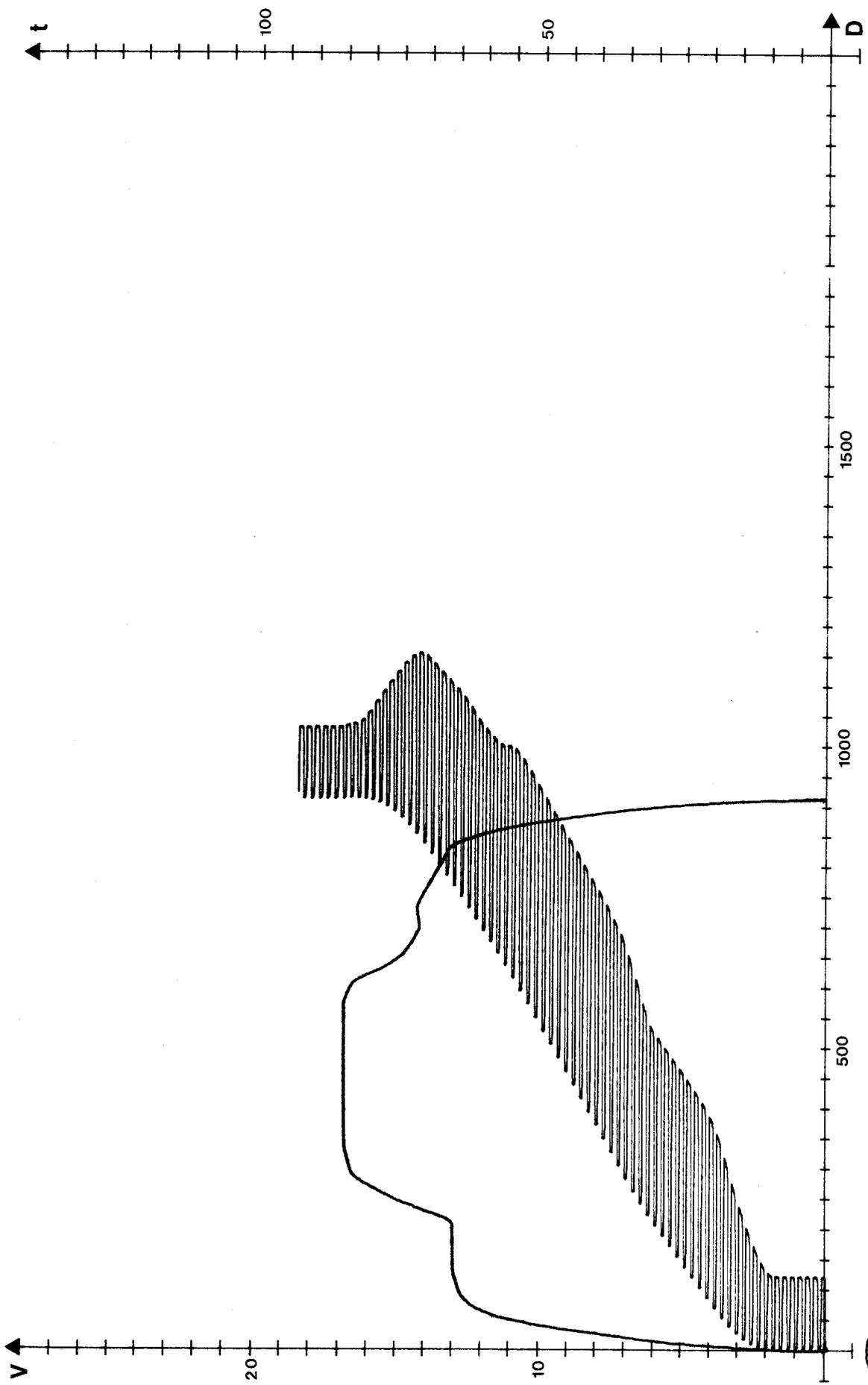
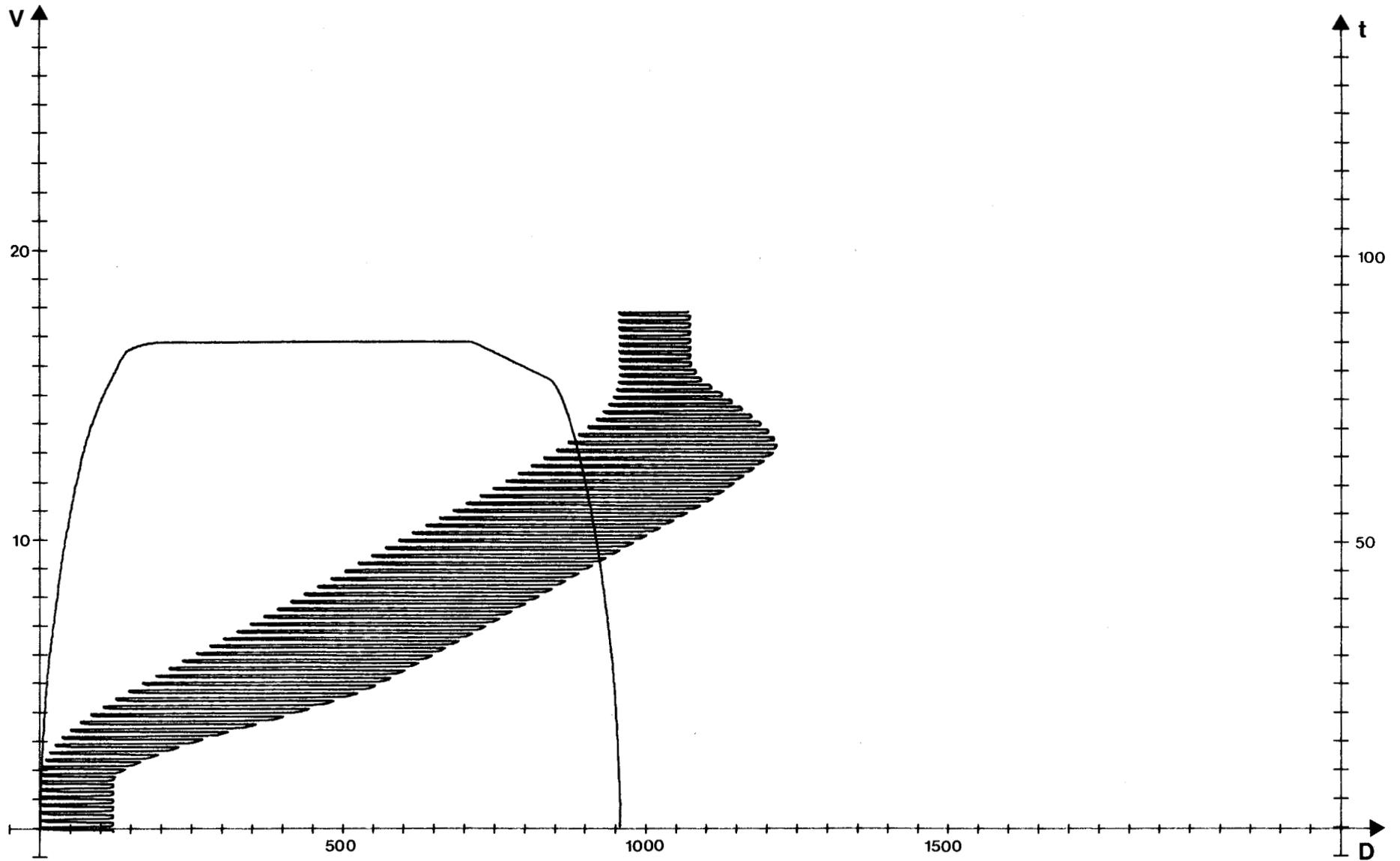


Planche. 30. CENTRE VILLE EST - TRIOLO

BUS
LILLE



BUS
LINE

Planche. 31. TRIOLO - CITE SCIENTIFIQUE 1

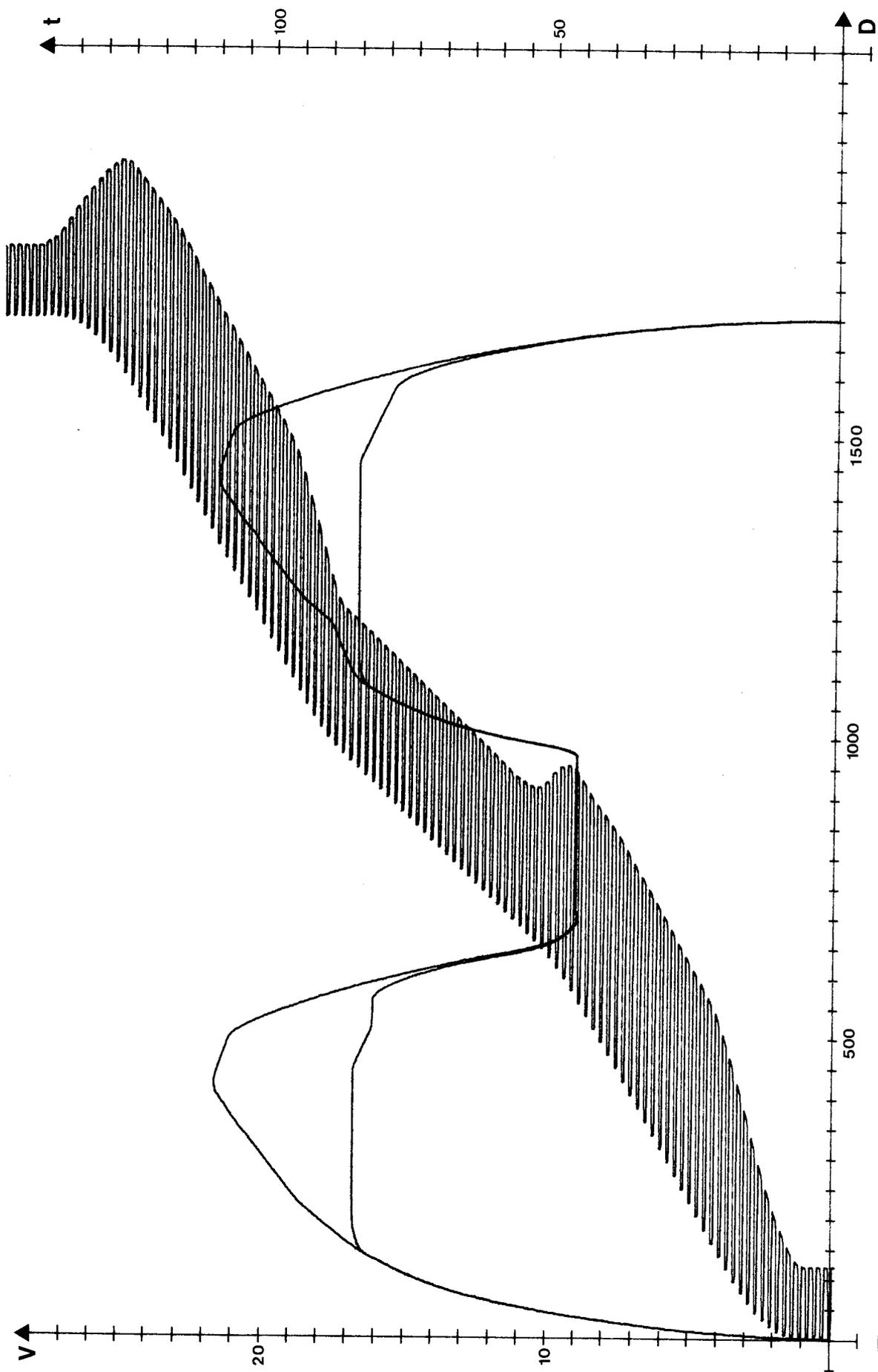


Planche. 32. CITE SCIENTIFIQUE 1 - CITE SCIENTIFIQUE 2



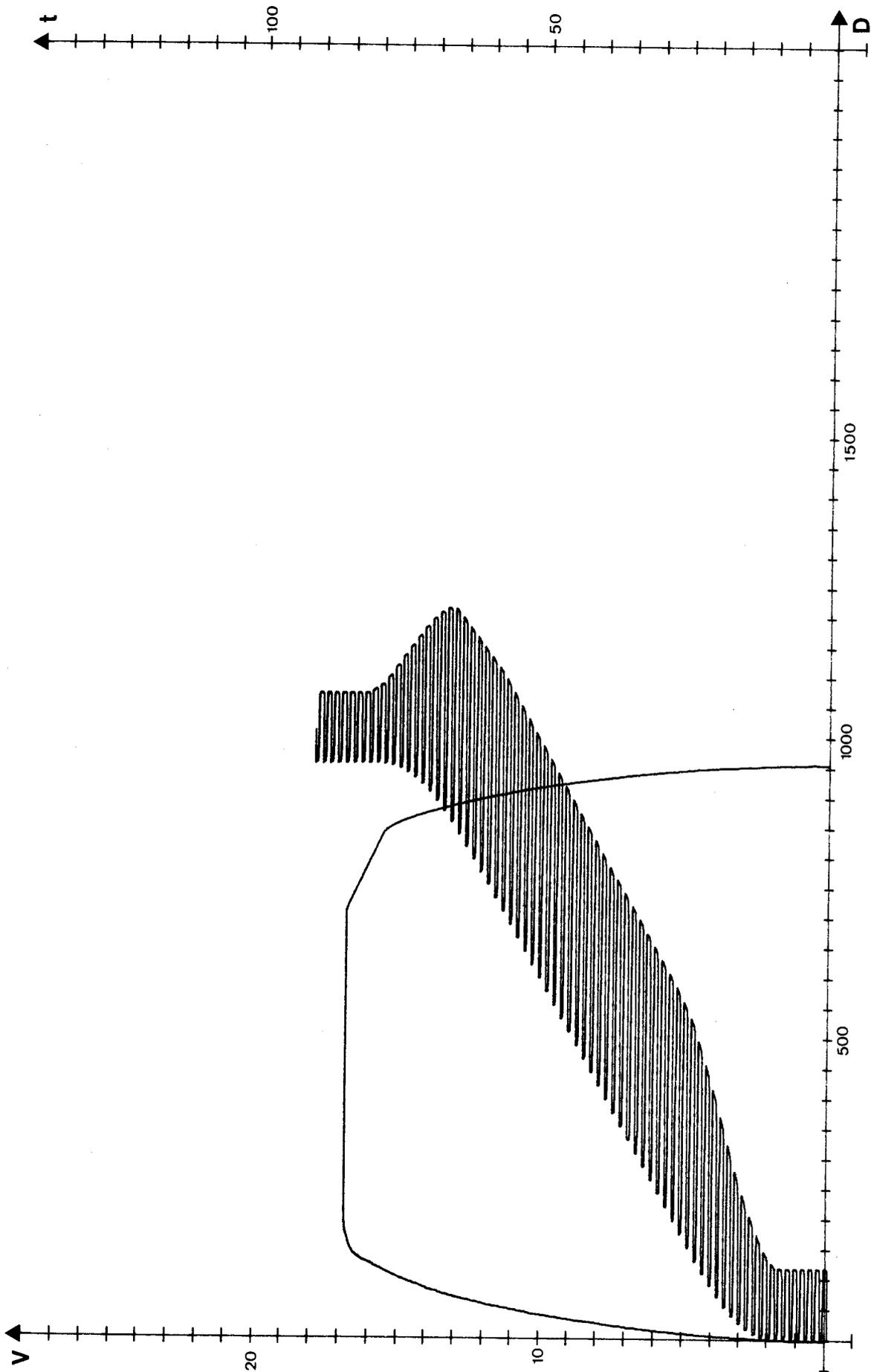


Planche. 33. CITE SCIENTIFIQUE 2 - TRIOLO

BUS
LILLE

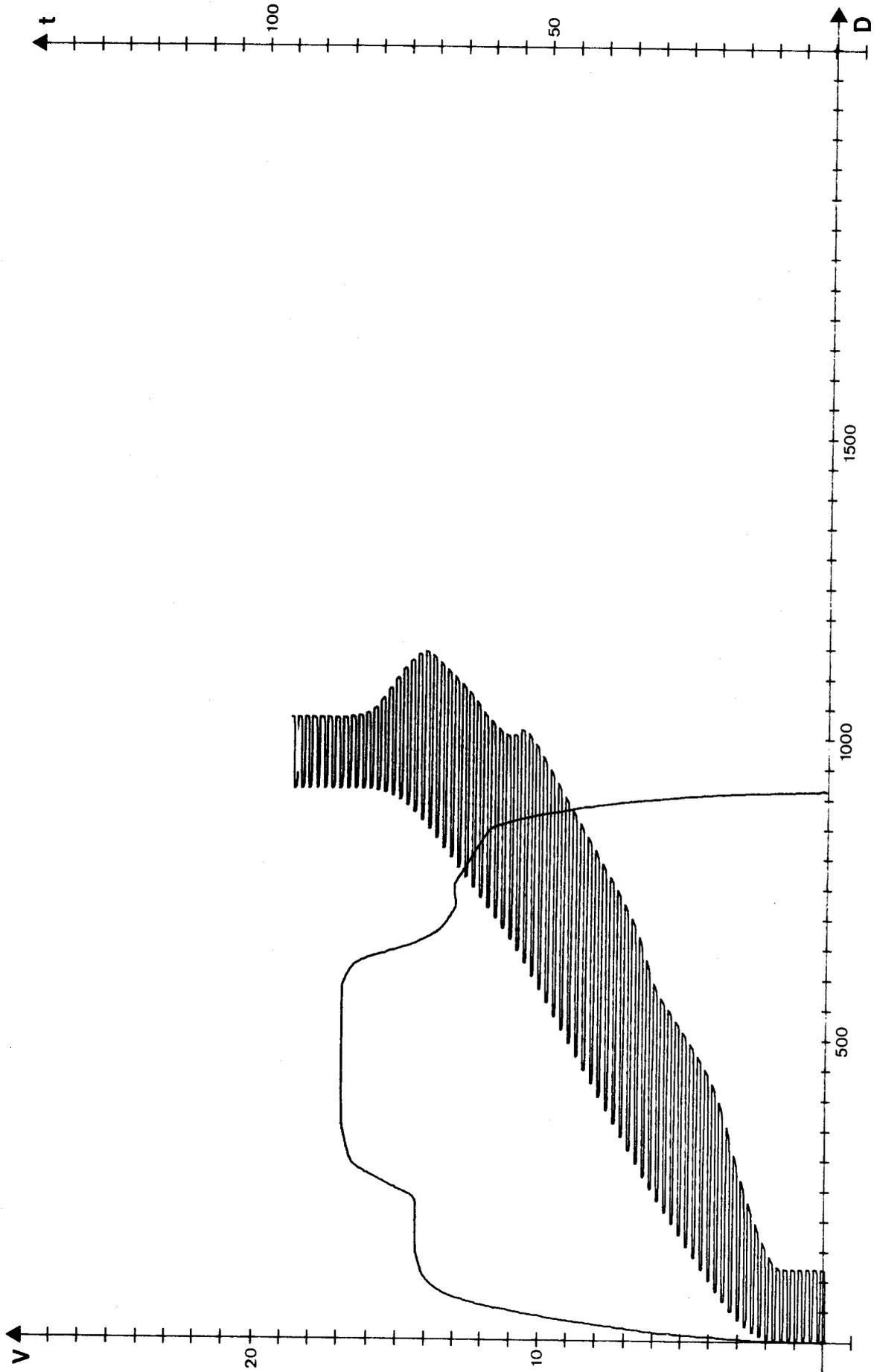


Planche. 34. TRIOLO - CENTRE VILLE EST



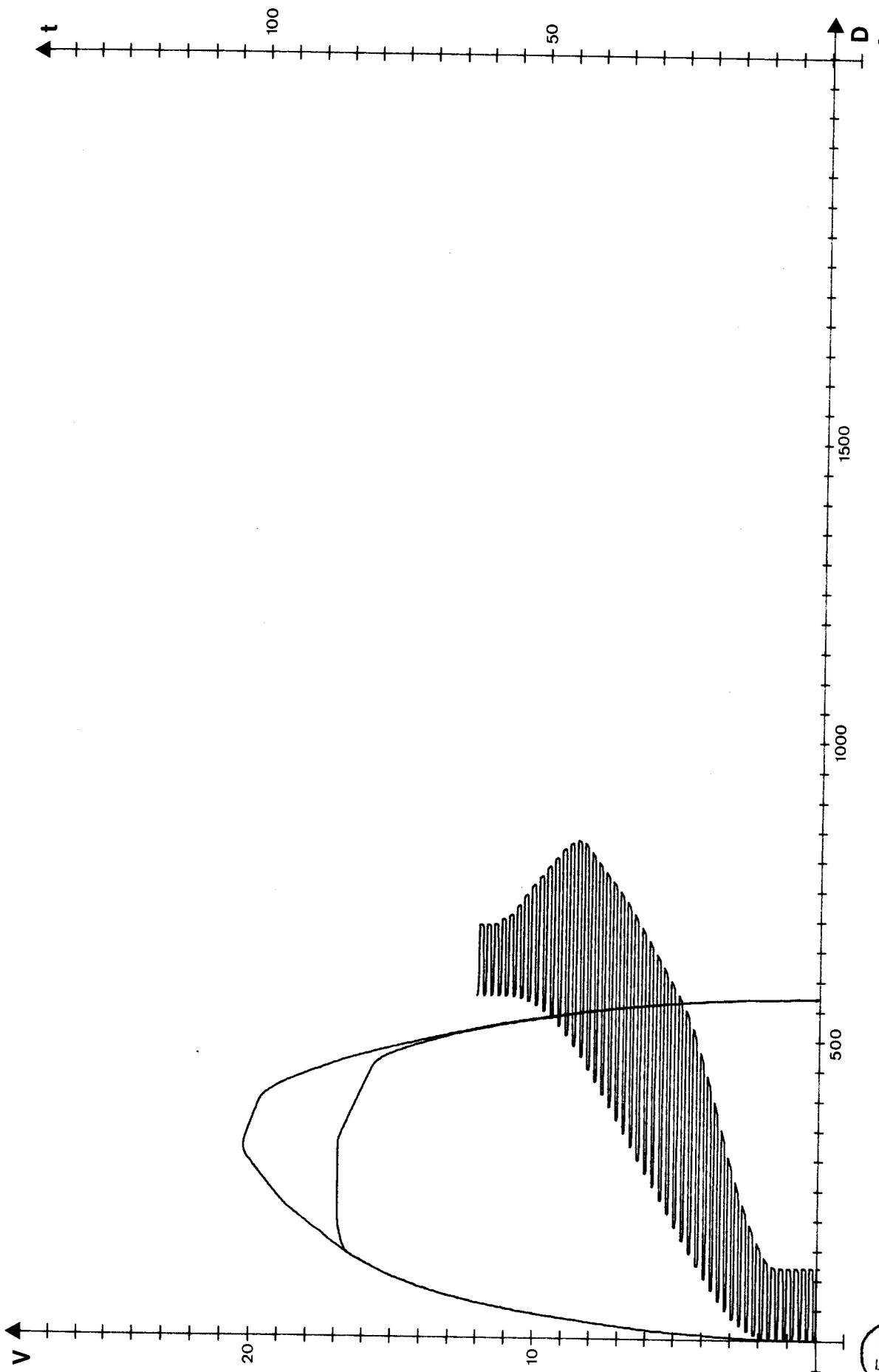


Planche. 35. CENTRE VILLE EST - PONT DE BOIS



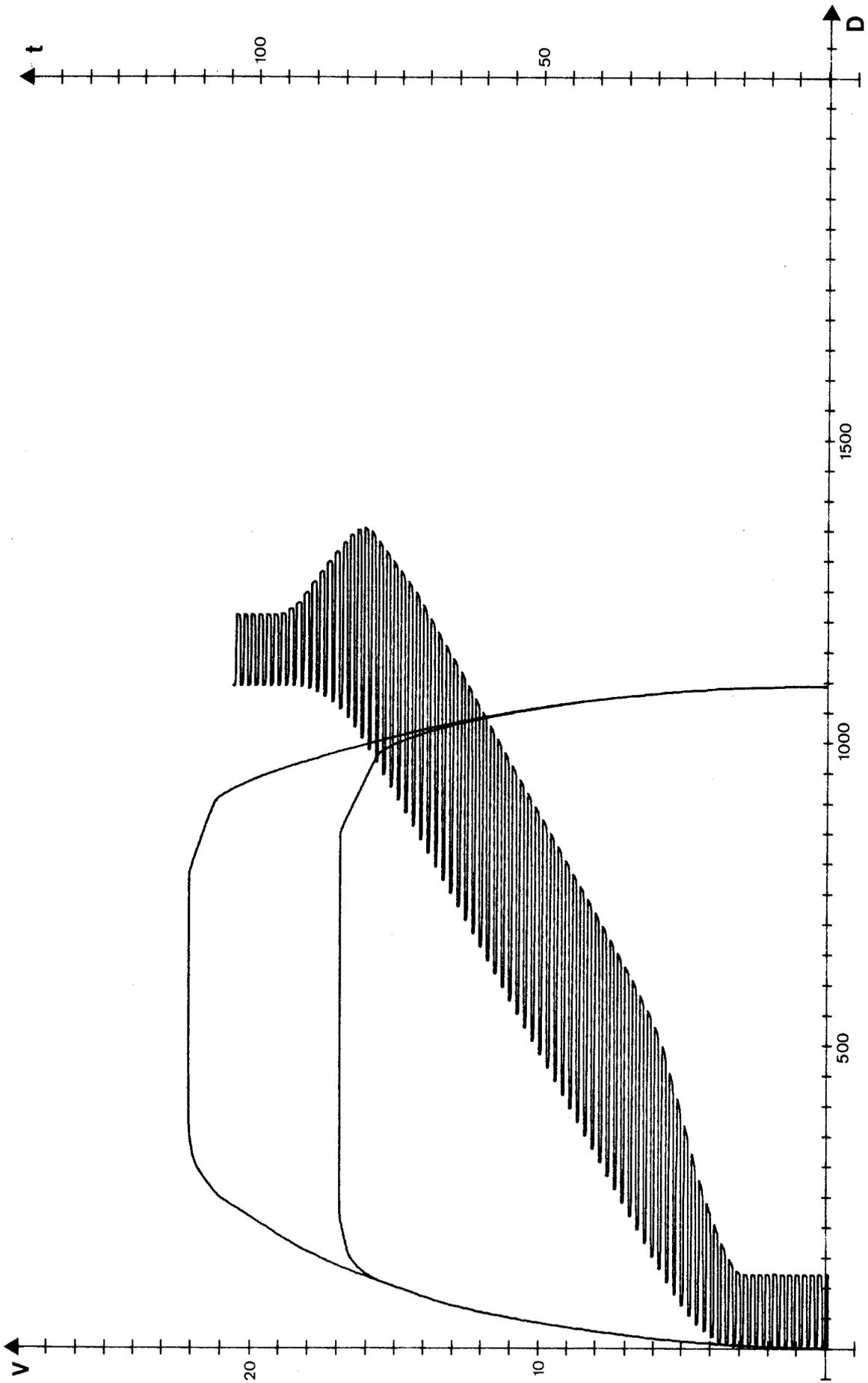


Planche. 36. PONT DE BOIS - FLERS



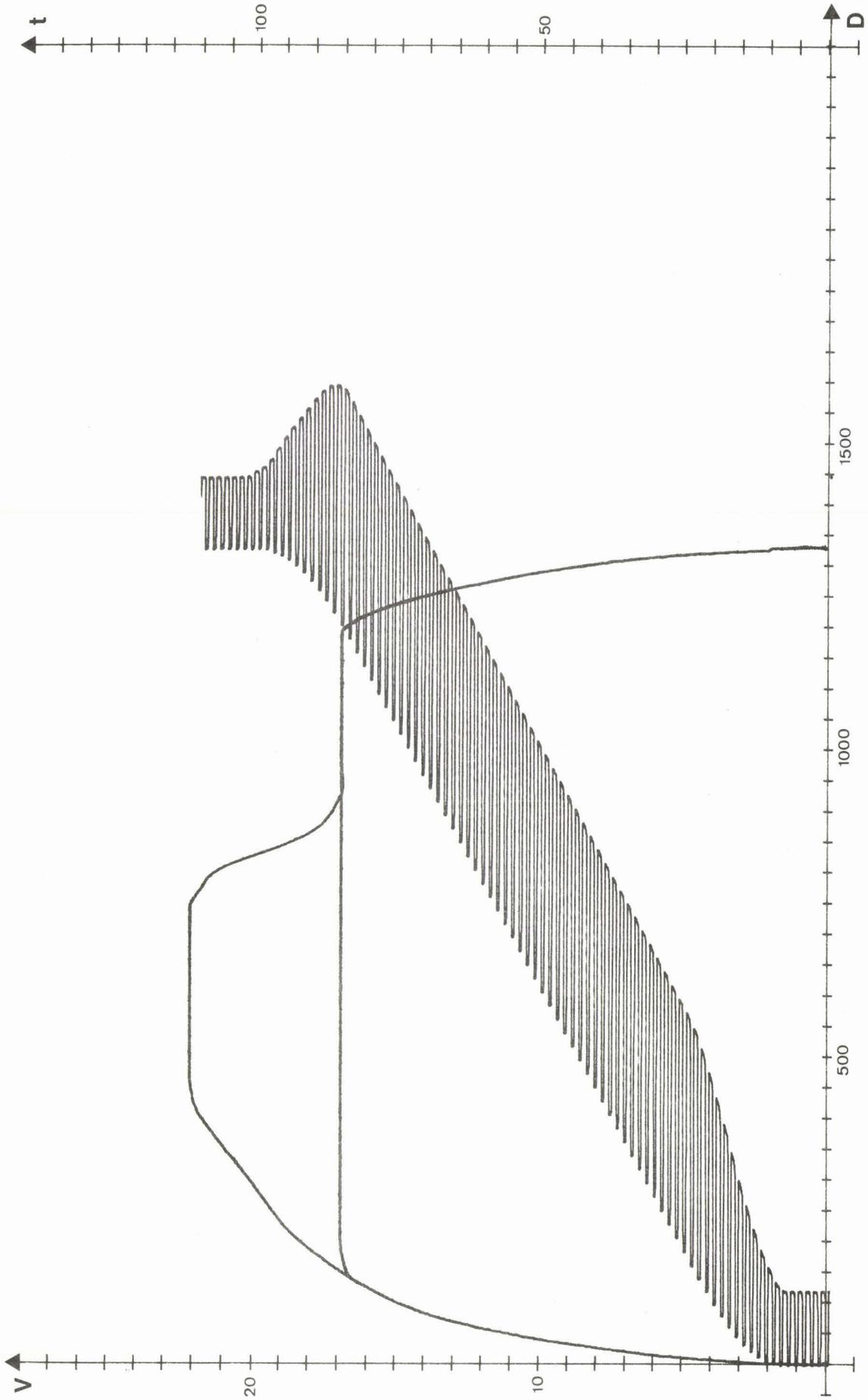


Planche. 37. FLERS - MONS



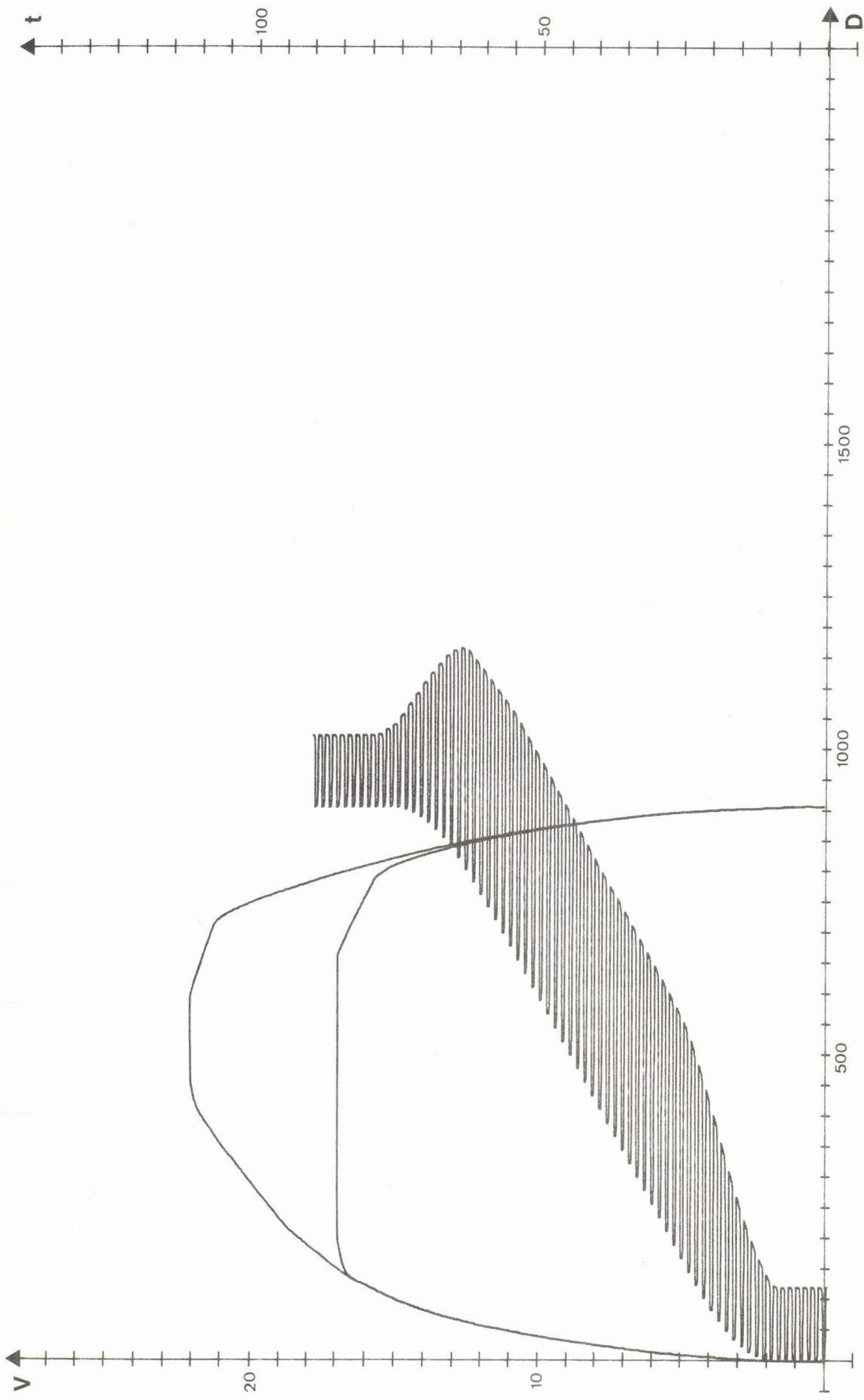


Planche. 38. MONS - FIVES



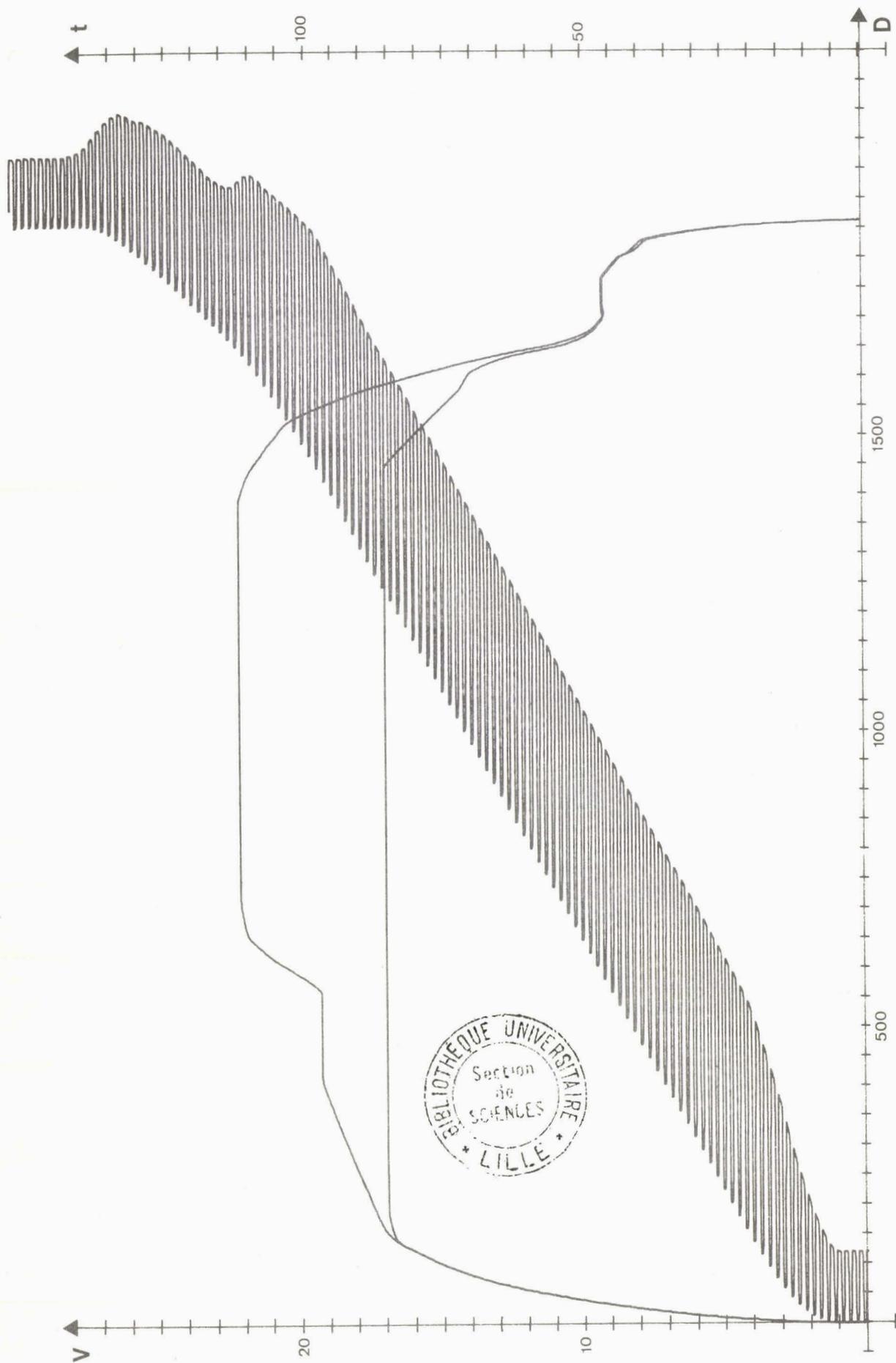


Planche. 39. FIVES - CENTRE DIRECTIONNEL