

SNCF

DIRECTION DES ÉTUDES GÉNÉRALES ET DE LA RECHERCHE

CALCUL DE MARCHES-TYPES ÉCONOMIQUES

LE PROGRAMME MARECO

DOCUMENT RECHERCHE

MAI 1979

S O M M A I R E

Calcul Marches types

La SNCF disposait jusqu'à une date récente de deux méthodes pour calculer les marches-types des trains et en déduire les horaires correspondants. La première, informatisée et permettant de ce fait une exploitation opérationnelle au niveau de la confection des horaires (elle est mise en œuvre par les bureaux des horaires), a pour inconvénient de fournir des marches-types uniformément détendues qui ne minimisent pas, pour un temps de parcours donné, la consommation d'énergie. L'autre, qui se prête bien à l'élaboration de marches-types minimisant la consommation d'énergie, est basée sur l'utilisation de la machine analogique AMSLER. Mais, de par sa conception, qui sous-entend une conduite "manuelle" du calcul, cette machine n'est guère utilisable en pratique dès lors qu'un grand nombre de marches-types sont à établir et de ce fait se présente surtout comme un outil d'étude et de recherche.

L'objet de l'algorithme MARECO et de sa traduction informatique est de réunir les avantages des deux solutions existantes en permettant le calcul aisément d'un grand nombre de marches-types déterminées avec le souci de minimiser l'énergie consommée.

Après un rappel des méthodes actuelles et de leur mode de mise en œuvre, le présent document expose les principes qui sont à la base de l'algorithme MARECO : la minimisation de l'énergie consommée (exprimée à la jante de l'engin de traction) est obtenue par une stratégie qui, pour un temps de parcours donné, prévoit :

- d'effectuer les montées en vitesse (démarrage ou reprise) en sollicitant au maximum la puissance de l'engin de traction ;
- de parcourir la majeure partie de la mission à une vitesse constante inférieure à la vitesse limite de la ligne ;
- de faire précéder les périodes de freinage (avant arrêt ou ralentissement) d'une marche sur l'erre qui permet de récupérer une partie de l'énergie cinétique emmagasinée lors de la montée en vitesse. Cette procédure de mise en marche sur l'erre est également appliquée dans les zones précédant les pentes motrices (celles qui permettent une accélération du train par le seul effet de la pesanteur).

Cette stratégie de conduite a bien évidemment dû être adaptée pour tenir compte des impératifs d'exploitation inhérents à la confection d'horaires réels.

Gain d'énergie
Dans une dernière partie, après avoir donné un aperçu sur la mise en oeuvre informatique de l'algorithme MARECO, quelques exemples d'application en sont donnés qui mettent en évidence des gains d'énergie par rapport aux marches traditionnelles des fascicules. Ce dernier gain, qui n'a pu être estimé que sur quelques cas particuliers, devra être vérifié par des campagnes d'essais effectuées avec des engins de traction munis de compteurs.

A la demande de la Direction du Transport, les Divisions RT2 des Réseaux utilisent le programme MARECO pour la préparation de certains de leurs horaires.

1 - INTRODUCTION

1.1 - Définitions

Il paraît opportun de rappeler les définitions de quelques expressions utilisées dans ce texte, définitions qui sont celles de l'Instruction Générale TR 1 B1 n° 1 sur la détermination des horaires, document de base définissant le travail de l'horairiste :

- la marche de base est la marche la plus tendue normalement réalisable,
- la marge de régularité est le temps complémentaire ajouté à la marche de base pour tenir compte de l'imprécision de la mesure de la vitesse, pour pallier les conséquences des incidents extérieurs venant perturber la marche théorique des trains, et pour maintenir la régularité de la circulation,
- la marche-type résulte de la somme des temps de la marche de base et de la marge de régularité.

1.2 - Les calculs des marches de base et des marches-types à la SNCF

Paramètres

Ces calculs doivent prendre en compte un grand nombre de paramètres, liés, les uns aux caractéristiques de l'infrastructure, les autres à celles du matériel roulant. Dans la première catégorie on peut citer le profil de la voie, ses vitesses limites et, le cas échéant, les caractéristiques de l'alimentation électrique. Pour ce qui est du matériel roulant, la puissance de l'engin de traction, la résistance à l'avancement du train et ses performances de freinage sont des caractéristiques influant directement sur la marche. Le principe de la détermination des marches de base de train est simple. Il consiste, en partant des données qui viennent d'être rappelées, à appliquer l'équation fondamentale de la dynamique⁽¹⁾ pour calculer à chaque instant l'accélération du train de laquelle on déduit, par intégrations successives, la vitesse et l'espace parcouru.

Les divers paramètres influant sur la dynamique des trains et qui ont été évoqués plus haut font que, partant d'un principe de calcul très simple, il y a en fait un nombre important de contraintes à prendre en compte pour calculer avec précision la marche de base d'un train. Ainsi, un certain nombre de processus ont été mis successivement en oeuvre depuis de très nombreuses années pour procéder à ce calcul.

(1) L'équation fondamentale de la dynamique que l'on exprime généralement sous la forme $F-R=M\gamma$ exprime que la différence des forces motrices (F) et résistantes (R) appliquées à un train est égale au produit de la masse du train par son accélération.

*Ancienne
méthode*

Les premières préoccupations en la matière datent de la fin du siècle dernier. A cette époque, les moyens de calcul analogiques ou numériques que nous connaissons aujourd'hui n'existant pas, on utilisait une méthode analytique d'intégration pas à pas dite "méthode des arcs successifs". Cette méthode, dont l'exposé détaillé⁽¹⁾ sortirait par trop du cadre du présent document, a reçu au fil des années des perfectionnements nombreux se matérialisant par la confection d'abaques apportant une réduction sensible des temps de calcul.

Elle a finalement été abandonnée pour une autre méthode graphique, beaucoup plus performante, la méthode UNREIN⁽²⁾ basée sur le concept de l'aptitude en côte des engins de traction. Il paraît inutile d'insister sur les limites pratiques de tels procédés qui exigeaient des temps de mise en œuvre relativement importants et qui donc ne pouvaient être envisagés que pour un nombre de marches limité.

*Calculs
analogiques*

Un nouveau progrès survint au début des années 50 avec l'apparition de calculateurs analogiques mécaniques dont la caractéristique essentielle est de permettre la double intégration automatique de l'accélération pour calculer la vitesse du train et l'espace qu'il parcourt.

Cette intégration automatique est obtenue au moyen d'intégrateurs à boule qui sont des dispositifs composés d'une sphère liée à plusieurs axes de rotation au moyen d'étriers et de contacts roulants. La grandeur à intégrer (accélération ou vitesse) et le temps sont représentés par la vitesse de rotation de deux de ces axes, le résultat étant matérialisé par la vitesse de rotation d'un troisième⁽³⁾. Ce type de calculateur analogique a été construit par les établissements AMSLER en partant des principes de conception mis au point à la SNCF. Il a reçu, par la suite, de nombreux perfectionnements visant notamment à permettre le calcul de l'énergie consommée et de l'échauffement des moteurs de traction⁽⁴⁾. Cette conception de machine analogique a été adoptée par de nombreux réseaux. Elle présente tous les avantages et inconvénients des machines analogiques (quel que soit le phénomène de base - électrique, mécanique, hydraulique - sur lequel est basée l'analogie). L'avantage principal réside dans le dialogue permanent entre l'opérateur et la machine qui permet de modifier certaines commandes en fonction du déroulement des opérations. Il est ainsi possible de surveiller l'échauffement des moteurs de traction et de réduire éventuellement la puissance développée par l'engin de traction si cet échauffement est très important. De même, et cela revêt ici une très grande importance, il est possible avec un tel calculateur de tracer des marches-types, l'opérateur décidant de répartir la marge de régularité en des points qu'il considère comme judicieux (au sens, par exemple, des économies d'énergie de traction). A l'inverse, les calculateurs analogiques ont deux limites importantes qui sont la difficulté de prise en compte d'un volume important de données (par exemple, pour le cas des calculs de marche, les données relatives au profil électrique⁽⁵⁾) et le temps de mise en œuvre important qui devient rapidement rédhibitoire lors de travaux à caractère répétitif.

(1) Cette méthode est largement développée dans l'ouvrage d'André Blondel et Paul Dutoit "La traction électrique sur voie ferrée" publié en 1918 par la Librairie Polytechnique Baudry et Cie.

(2) Pour des informations plus précises, il y aurait lieu de se reporter à l'article de MM. ARMAND et GARIN - RGCf n° 5 - 1941.

(3) La description détaillée de la simulatrice analogique AMSLER figure dans la RGCf (n° 4 - 1950) : "Appareil de la SNCF pour le tracé des horaires des trains" par M. G. BOILL.

(4) La question du calcul de l'énergie et de l'échauffement des moteurs de traction sur la machine AMSLER a fait l'objet également d'un article détaillé dans la RGCf (Article de M. P. FRUMAUX n° 3 - 1959).

(5) La notion de profil électrique sera explicitée dans la suite du texte, indiquons seulement ici que cette notion permet de prendre en compte de façon globale l'énergie absorbée à la sous-station électrique d'alimentation par les trains circulant sur la zone de cette sous-station et par suite la chute de tension en ligne que rencontre le train étudié.

Lors de l'apparition des calculatrices numériques de grande puissance, on s'est intéressé à la résolution par elles du problème des marches de train. Ces calculatrices numériques se prêtent évidemment très bien à la résolution de ce problème, les diverses équations différentielles étant aisées à résoudre par des méthodes d'intégration numérique performantes. Un programme de calcul, dénommé HORER, a été mis au point, qui permet d'établir les marches de base et les marches-types des trains en fonction des contraintes de l'infrastructure et des caractéristiques du train. S'agissant d'ordinateurs puissants, il a été aisément de prendre en compte un maximum de données sans aucune simplification⁽¹⁾. Par contre, la possibilité de dialogue permanent opérateur-ordinateur faisant défaut, il est impossible par ce procédé d'avoir des actions ponctuelles sur le déroulement de la marche et donc de répartir la marge de régularité de façon judicieuse. Ce problème a dû alors être résolu de façon grossière, relativement peu satisfaisante et, de toute façon, de manière fort éloignée du mode de travail habituel des agents de conduite. En effet, on a admis que la marge de régularité était uniformément répartie. Partant de ce principe, le mode opératoire retenu est simple : l'ordinateur élaborer la marche de base, en exploitant au mieux les performances de l'engin de traction et les possibilités des infrastructures, puis majore systématiquement toutes les durées de parcours élémentaires de 5, 7, 5 ou 10 % quelle que soit la phase de marche (traction, freinage, marche sur l'erre, etc.). Outre le fait que cette répartition de la marge de régularité est irréaliste, ce processus a l'inconvénient de ne pas permettre le calcul de la consommation d'énergie correspondante à la marche-type puisque celle-ci n'est pas issue de la prise en compte du comportement réel du train⁽²⁾. Par contre, cette méthode informatisée se prête particulièrement bien à l'étude d'un grand nombre de marches et c'est ainsi qu'elle est un outil de travail efficace à la disposition des divisions RT2 de chaque réseau. Il y a lieu de mentionner pour être complet, et sans toutefois rentrer dans le détail, que les marches-types délivrées par les ordinateurs sont modifiées manuellement par les horairistes des divisions RT2 de façon à prendre en compte diverses contraintes, dont la non-entrée en conflit des diverses circulations dans une grille serrée, le respect des correspondances ou les ralentissements pour travaux amenant des retards, ce qui débouche sur des horaires qui figureront aux fascicules horaires.

1.3 - Le problème des marches économiques

Ainsi qu'il résulte de ce qui vient d'être exposé la SNCF dispose de deux moyens de calcul de marche aux qualités complémentaires. Le premier, la machine AMSLER, est un outil d'étude et de recherche précieux, capable d'étudier les problèmes de traction en détail grâce au dialogue permanent entre l'homme et la machine, et qui permet l'élaboration de marches-types voisines de celles réalisées par le mécanicien sur sa locomotive. En particulier, il est possible d'imposer toute modification d'allure visant à répartir judicieusement la marge de régularité pour consommer un minimum d'énergie. La machine AMSLER présente par contre l'inconvénient d'être mal adaptée, à cause de son temps de calcul (pratiquement comparable au temps réel de la marche), à la détermination systématique des marches. A l'inverse, le second moyen de calcul, le programme informatique HORER, bien adapté aux calculs nombreux et systématiques, ne permet pas de calculer des marches-types de façon satisfaisante.

(1) A propos du calcul des marches sur ordinateur on pourra se reporter à l'article publié par M. CHAUVIN, Ingénieur à la Compagnie IBM, dans la RGCF.

(2) Dans le cas de la marche de base, il est aisément d'obtenir l'énergie consommée à la jante puisque, à chaque instant, la puissance développée est égale au produit de l'effort de traction par la vitesse de circulation.

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

$$(C.w)$$

Indépendamment des buts qui lui sont assignés par ailleurs, la marge de régularité allouée à toutes les marches de train est un facteur important d'économie d'énergie de traction. Il n'est, pour s'en convaincre, que de faire un calcul élémentaire sur un parcours à vitesse constante. On voit qu'une détente de $n\%$ du temps de parcours se traduit par un gain de $2n\%$ sur l'énergie de traction. Il ne s'agit bien sûr là que d'une relation extrêmement simplifiée mais qui montre l'importance des gains possibles.

En pratique, il est possible d'obtenir des gains d'énergie beaucoup plus substantiels que ceux découlant d'une réduction uniforme des vitesses maximales. L'expérience des mécaniciens montre bien à cet égard que l'usage des marches sur l'erre évite une perte importante d'énergie sous forme calorifique (sauf récupération) au moment du freinage.

Dans le cadre de la campagne sur les économies d'énergie, il a paru intéressant d'étudier le problème de la confection de marches-types de train conduisant, pour un temps de parcours donné, à une consommation d'énergie minimale en adoptant des principes analogues à celui venant d'être développé, mais débouchant sur une conception globale d'économie pour une marche complète. Les moyens de calcul existants ne répondant pas ou imparfaitement à cette question (notamment à cause du temps de calcul pour la machine AMSLER), on a abordé le problème du calcul des marches-types sur ordinateur de façon à allier les avantages de la machine analogique, dont le respect d'une stratégie de conduite optimum, et ceux du calculateur numérique, dont la rapidité de traitement, cette dernière caractéristique étant indispensable dès lors que l'on souhaite prédéterminer des marches-types pour un grand nombre de trains, seule possibilité réelle d'aboutir à une économie substantielle d'énergie de traction.

Dans la suite du présent document sera expliquée la stratégie de conduite qui a été retenue pour parvenir à minimiser, pour un temps de parcours donné, la consommation d'énergie de traction. On exposera ensuite comment cette stratégie a été automatisée et systématisée de manière à couvrir tous les problèmes pratiques de traction. L'exposé de la mise en oeuvre informatique et notamment de l'utilisation itérative du programme HORER pour arriver au résultat recherché formera, complété par quelques exemples d'application, la dernière partie du document.

2 - DETERMINATION d'une STRATEGIE de CONDUITE OPTIMALE

2.1 - Le critère de décision

C.V.

E

GO

La recherche de l'optimalité n'a de sens que si l'on définit, de façon précise, un critère. Dans le cadre du problème des économies de traction, la fonction de coût idéale serait bien évidemment le coût total facturé à la SNCF, c'est-à-dire la somme des redevances à l'EDF et aux compagnies fournissant le gas-oil. Il est clair que la diversité et le volume des circulations d'une part, la complexité de la facturation établie par l'EDF d'autre part, rendent illusoire une telle approche. Plus modestement et concernant la traction électrique, on aurait pu prendre comme critère l'énergie consommée au niveau des sous-stations par une circulation donnée. Ceci aurait permis de tenir compte du rendement de la locomotive mais aussi de l'alimentation. Malheureusement, cette prise en compte est imparfaite car il est difficile de cerner correctement les phénomènes électriques entre sous-station et pantographe d'une locomotive. Pour ce qui est de la traction diesel, la consommation de carburant est plus facile à déterminer avec précision, l'engin étant, par définition, autonome et indépendant des autres circulations. Par souci d'homogénéité, il a paru préférable de se fixer comme critère de décision l'énergie consommée à la jante.

On peut penser que toute stratégie de conduite optimale par rapport au critère de minimisation de l'énergie consommée à la jante ne saurait être que très voisine de l'optimum vis-à-vis d'un critère plus complexe tel que ceux définis plus haut.

2.2 - Les éléments de la stratégie de conduite

Le problème posé consiste à répartir au mieux, pour un temps de parcours donné, la marge de régularité de façon à minimiser la consommation d'énergie à la jante.

Une marche de train se compose de quatre périodes :

- YI*
- des périodes de traction (démarrages, reprises) où une accélération est demandée à la locomotive pour atteindre une vitesse supérieure et où l'énergie à fournir est supérieure à celle permettant de vaincre la résistance à l'avancement. Cette accélération peut être modulée par le taux d'utilisation de l'engin de traction,

42. - des périodes de marche à vitesse constante où l'engin de traction fournit juste la puissance nécessaire pour vaincre la résistance à l'avancement,

Bien entendu, dans ces deux phases, la résistance à l'avancement à prendre en compte inclut l'influence de la gravité.

43. - des temps de marche sur l'erre où la consommation d'énergie à la jante est nulle et où, en fait, il y a récupération d'une partie de l'énergie cinétique ou potentielle acquise dans les deux phases précédentes,

44. - des périodes de freinage où la consommation d'énergie à la jante est nulle également et pendant lesquelles il y a dilapidation de l'énergie cinétique du train (acquise pendant les périodes de traction) et, éventuellement, modification de l'énergie potentielle (dans le cas où la zone de freinage est en déclivité).

La stratégie visant, pour un temps de parcours donné, à réduire la consommation d'énergie à la jante, repose sur le choix d'une répartition judicieuse entre, d'une part, les deux phases de traction qui sont consommatrices d'énergie, et d'autre part, les phases de marche sur l'erre et de freinage qui ne consomment pas directement et permettent, tout au moins pour la première, une récupération indirecte de l'énergie cinétique acquise.

2.3 - Mode de répartition des gains d'énergie

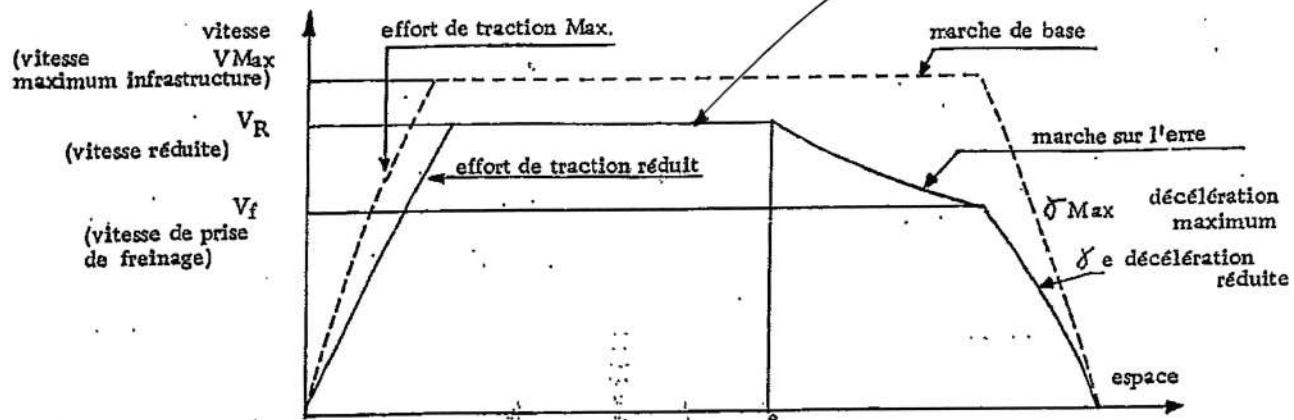
Cette répartition doit être faite en considérant le gain d'énergie apporté par une augmentation du temps de parcours dans chaque phase de la marche. La marche sera considérée comme optimale au plan de la consommation d'énergie dès lors que les économies, apportées par des augmentations de temps de parcours analogues pour chacune des phases, seront égales. En effet, si il n'en était pas ainsi, il est clair que l'on aurait intérêt à augmenter la marge de régularité dans les phases où le gain est plus élevé, c'est-à-dire celles où une très faible augmentation du temps de parcours est génératrice d'une économie d'énergie importante, quitte à la réduire dans les phases de faible sensibilité. Si on appelle E les consommations d'énergie et t les temps de parcours élémentaires, on devra donc chercher à rendre

constante tout au long du parcours la grandeur $\frac{dE}{dt}$ que l'on peut appeler gain d'énergie par unité de temps supplémentaire (la dérivée algébrique $\frac{dE}{dt}$ est toujours négative), ou, par simplification, gain d'énergie unitaire qui, dans ce qui suit, sera rapporté à la tonne remorquée et noté W_{le} .

2.4 - Relation entre le gain d'énergie unitaire et les paramètres fondamentaux de la marche

On a vu précédemment qu'une marche de train se caractérisait par quatre types de phases qui sont rappelés sur la figure ci-contre où l'on a considéré un parcours sans ralentissement ni reprise de vitesse. La marche du train est représentée dans le plan vitesse-espace tant en marche de base

Marche-type

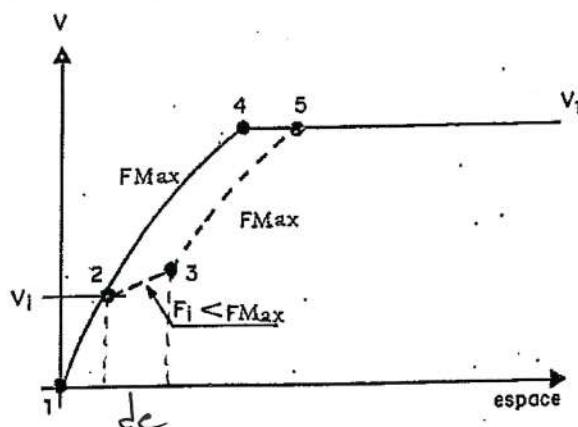


qu'en marche-type. Concernant cette dernière, on a alloué une marge de régularité au cours du démarrage (en ne sollicitant pas toute l'accélération permise par l'engin de traction), sur la marche à vitesse constante (en réduisant le taux de vitesse de V_{Max} à V_R), en pratiquant une marche sur l'erre (caractérisée par une coupure de traction au point kilométrique e), et enfin en appliquant un taux de freinage réduit (de γ_{Max} à γ_e) à partir d'une vitesse de prise de freinage V_f . Il est à noter que les paramètres descriptifs e et V_f sont liés entre eux dès lors que les autres paramètres sont fixés ; aussi, dans la suite de l'étude on caractérisera la marche sur l'erre par la vitesse V_f de cessation de la marche sur l'erre (ou de prise de freinage).

Le principe de répartition optimale des détentes conduit, comme il a été exposé en 2.3, à fixer les paramètres de définition de la marche-type (effort de traction au démarrage, vitesse d'équilibre, vitesse de prise de freinage et taux de décélération) de manière à ce que l'économie d'énergie unitaire soit la même tout au long du parcours. On va donc successivement mettre en évidence les relations existant entre ces quatre paramètres et la grandeur $Wle = - \frac{dE}{dt}$.

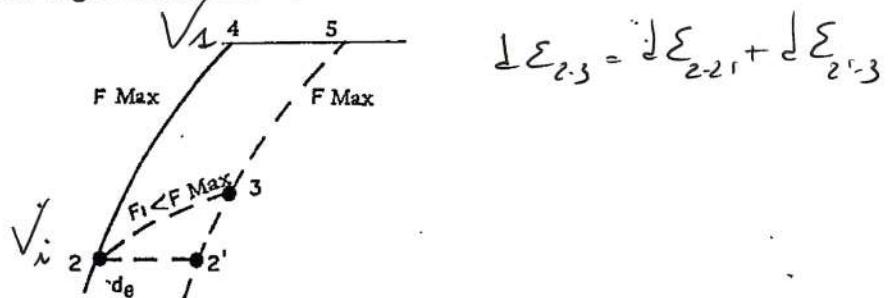
2.41 - Cas de la montée en vitesse

Considérons la mise en vitesse, représentée ci-dessous, dans laquelle on passe de la vitesse nulle à une vitesse but V_1 . On note V les vitesses et e les espaces.



Comparons le cas où la montée en vitesse s'effectue en sollicitant au maximum l'engin de traction à celui où, sur la même base, on suppose que sur une très petite distance, autour de la vitesse V_1 , on applique un effort F_i inférieur à l'effort maximum F_{Max} .

S'agissant de petites variations, on démontre que l'énergie consommée pendant la phase 2-3 est identique à la somme de celles consommées pendant les phases fictives 2-2' et 2'-3 (explicitées sur la figure ci-dessous), car on peut considérer que la résistance à l'avancement ne varie pas de façon significative.



Sur 2-2' 4-5

$$R = F$$

Dans ces conditions, il est clair que la comparaison est à effectuer entre les phases à vitesse constante 2-2' et 4-5 puisque, moyennant cette décomposition les phases 2-4 et 2'-5 sont équivalentes.

Appelons R la valeur, par tonne, de la résistance à l'avancement généralisée, c'est-à-dire incluant le profil :

$$R = A + BV + CV^2 + gp$$

où A, B, C sont les coefficients classiques de la formule de résistance à l'avancement, g l'accélération de la pesanteur et p la valeur du profil (comptée positivement dans les rampes).

Le gain d'énergie apporté par la traction momentanée avec un effort F_i s'exprime par la formule :

$$dE = R_i de - R_1 de \quad (1)$$

de étant l'espace parcouru pendant les phases 2-2' ou 4-5 et R_i et R_1 les résistances à l'avancement aux vitesses V_i et V_1 .

La perte de temps, toujours en comparant les phases 2-2' et 4-5, s'exprime par la formule :

$$dt = \frac{de}{V_i} - \frac{de}{V_1} \quad (2)$$

Le rapprochement des formules (1) et (2) permet de calculer la valeur du gain d'énergie unitaire par tonne remorquée :

$$Wle = - \frac{de}{dt} = \frac{R_1 - R_i}{V_1 - V_i} V_1 V_i \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 E' &= E(V + dV) = e R_1 (V + dV) \\
 &= e [R_1(V) + R'_1(V)dV] \\
 &= E + e R'_1 dV \\
 &= E + dE
 \end{aligned}$$

- 9 -

2.42 - Cas du parcours à vitesse constante

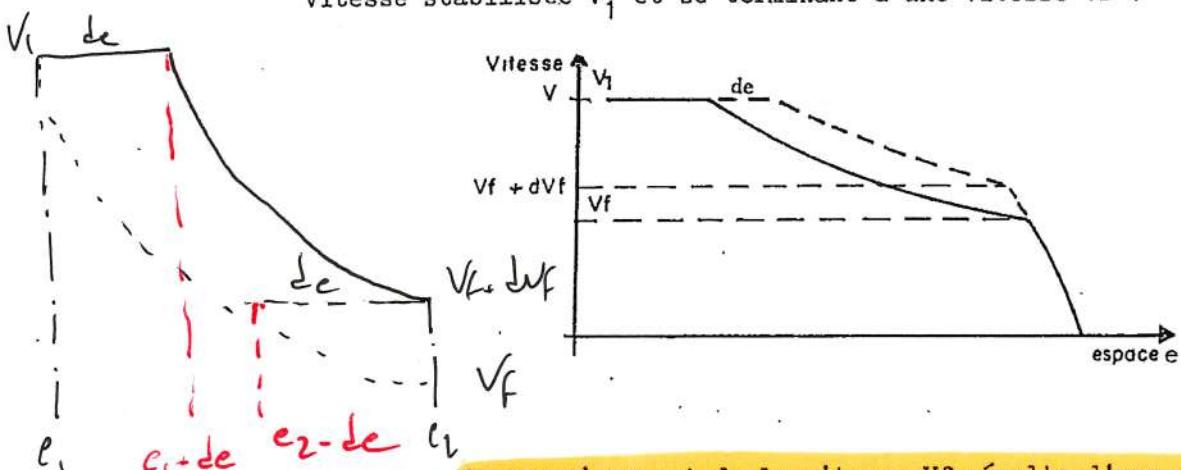
Considérons un parcours de longueur e parcouru à une vitesse V_1 , donc en un temps t_1 , la consommation d'énergie étant eR_1 avec les notations définies précédemment.

Une variation de vitesse dV sur ce même parcours se traduit par un temps de parcours et une énergie consommée valant respectivement :

$$\begin{aligned}
 t' &= t_1 + \Delta t \\
 \Delta t &= e \left[\frac{1}{V_1 + dV} - \frac{1}{V_1} \right] \quad t' = \frac{e}{V_1 + dV} \quad \text{et} \quad e(R_1 + R'_1 dV) = \frac{e}{V_1 + dV} dE \\
 \Delta t &\sim e \left[\left(1 - \frac{dV}{V_1} \right) \dots \right] \quad \left| \Delta t \sim -\frac{e}{V_1^2} dV \right| \quad \underline{dE = e R'_1 dV} \\
 \text{où } R'_1 &\text{ est la dérivée partielle de la résistance à l'avancement par rapport à la vitesse (formule des accroissements finis). Ces diverses relations conduisent à l'expression du gain d'énergie unitaire :} \\
 -\frac{dE}{dt} &= R'_1 V_1^2 \quad (4)
 \end{aligned}$$

2.43 - Cas des marches sur l'erre

On a vu précédemment que la marche sur l'erre pouvait être caractérisée par la vitesse de prise de freinage V_f . On va donc chercher à mettre en évidence la relation liant V_f au gain d'énergie unitaire. A cet effet on considère la séquence comprenant une marche sur l'erre abordée depuis une vitesse stabilisée V_1 et se terminant à une vitesse V_f :



Un accroissement de la vitesse V_f résulte d'une prolongation de la traction à vitesse V_1 sur un espace de de et donc par un surcroît de consommation.

$$dE = R_1 de \quad (\text{avec les mêmes notations que précédemment})$$

$$(5) \quad R_1 \underset{\curvearrowleft}{\sim} V_1$$

Le gain de temps correspond sensiblement à la différence de temps de parcours de l'espace de aux vitesses V_1 et V_f soit :

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= t_2 - t_1 \\
 \Delta t &= \frac{de}{V_1} - \frac{de}{V_f} \quad \Delta t = \frac{de}{V_1} - \frac{de}{V_f} < 0 \quad (6)
 \end{aligned}$$

Le rapprochement des formules (5) et (6) fournit le gain d'énergie unitaire :

$$Wle = - \frac{dE}{dt} = + R_1 V_1 \frac{V_f}{V_1 - V_f} \quad (7)$$

2.44 - Cas du freinage

Diminuer la décélération moyenne pendant la zone de freinage conduit à une perte de temps et à un gain d'énergie nul, soit :

$$\frac{dE}{dt} = 0$$

2.5 - Choix de la stratégie optimale

Les formules (3) et (4) permettent de connaître les gains d'énergie unitaires en fonction des paramètres de démarrage et de marche à vitesse constante. On peut montrer, en pratiquant quelques transformations élémentaires sur ces deux formules, que le gain unitaire correspondant à une réduction de vitesse est toujours supérieur au gain unitaire résultant d'une marge de régularité amenée par une sollicitation réduite de la puissance de l'équipement de traction (1).

On en déduit donc un premier élément de la stratégie à adopter : les montées en vitesse (démarriages ou reprises) doivent être effectuées en sollicitant au maximum les possibilités de l'engin de traction.

L'examen du cas du freinage conduit bien évidemment à adopter le taux maximal de freinage de manière à perdre un minimum de temps.

Ainsi, il ressort de ce premier examen que la marge de régularité doit être, dans la mesure du possible, attribuée d'une part aux zones de circulation à vitesse maximale et, d'autre part, aux zones de marche sur l'erre. Ces deux fonctionnements sont caractérisés par l'ensemble des deux formules rappelées ci-dessous :

$$- \text{marche à vitesse constante : } Wle = - \frac{dE}{dt} = R_1' V_1^2$$

$$- \text{marche sur l'erre : } Wle = - \frac{dE}{dt} = R_1 V_1 \frac{V_f}{V_1 - V_f}$$

(1) En effet, ces deux gains ont, en explicitant la valeur de la résistance à l'avancement, les expressions suivantes :

$$\text{Marche à vitesse constante : } Wle = - \frac{dE}{dt} = (B + 2CV_1) V_1^2$$

$$\text{Démarrage : } Wle = - \frac{dE}{dt} \frac{C(V_1^2 - V_i^2) + B(V_1 - V_i)}{V_1 - V_i} V_1 V_i = \left[C(V_1 + V_i) + B \right] V_1 V_i$$

(après simplification par les termes constants : gravité, A et B (pour la dérivée de R))

V_i étant inférieur à V_1 , on voit que le gain d'énergie unitaire est toujours plus grand pour la marche à vitesse constante que pour le démarrage.

Pour une valeur donnée du gain d'énergie unitaire W_{le} , il existe un seul couple de valeurs V_1 (vitesse constante de circulation) et V_f (vitesse de prise de freinage en fin de marche sur l'erre) permettant de satisfaire ces deux équations.

Ainsi, et en résumant, pour une valeur donnée du gain d'énergie unitaire, la stratégie de conduite est entièrement figée et comporte les différentes phases suivantes :

- traction en sollicitant au maximum les possibilités de l'engin de traction,
- marche à vitesse constante V_1 inférieure à la vitesse maximum de circulation de la ligne,
- marche sur l'erre se terminant à une vitesse V_f ,
- freinage avec le taux maximum des appareillages de freinage du train.

La marche-type ainsi obtenue est optimale au plan de la consommation d'énergie mais peut correspondre à un temps de parcours différent de celui désiré. Il faut alors, par itération, rechercher ce temps en modifiant la valeur du gain d'énergie unitaire W_{le} .

2.6 - Remarques et cas particuliers

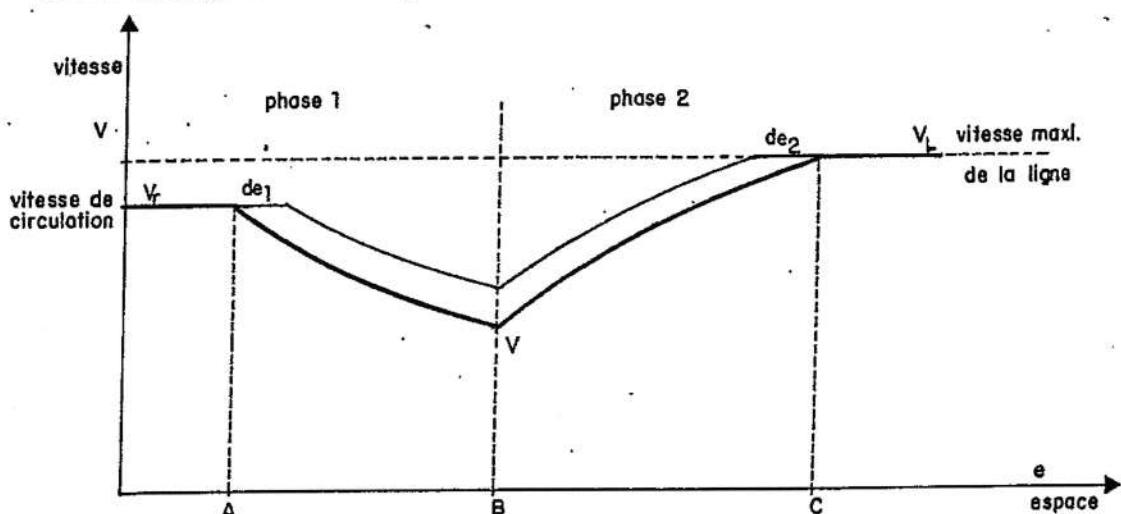
La stratégie optimale retenue a été mise en évidence sur un cas simple qui était celui d'un parcours entre deux points sans limitation de vitesse intermédiaire. En pratique, il existe un grand nombre de cas plus complexes à examiner.

2.6.1 - Influence du profil - Cas des fortes pentes

On a vu plus haut, au stade des définitions, que la formule de résistance à l'avancement incluait l'effet du profil. On voit alors, en examinant les formules donnant les valeurs de V_f et de V_1 , que :

- l'effet du profil ne joue pas sur la détermination de la vitesse stabilisée V_1 . En effet (formule 4), la résistance à l'avancement intervient par sa dérivée par rapport à la vitesse, ce qui élimine l'influence du terme relatif à la pente puisque celui-ci est indépendant de la vitesse. Ce paradoxe apparent s'explique bien physiquement, dès lors que l'on considère que le profil, au plan énergétique, se traduit par une certaine quantité d'énergie potentielle. Cette énergie, qui est l'image de la dénivellation d'altitude entre les deux points extrêmes de la marche, est par suite indépendante de la vitesse pratiquée sur le tronçon ;
- par contre, pour la détermination de la vitesse de prise de freinage il est intuitif, et la formulation le confirme, que l'influence du profil est déterminante. Ceci ne doit pas surprendre puisque, en fait, le paramètre important au sens de l'énergie consommée est le point de départ de la marche sur l'erre. Ce point dépend tout à la fois de la vitesse de prise de freinage et du profil que le train rencontre sur la zone de marche sur l'erre.

On a considéré, dans tout ce qui précède qu'il n'était pas nécessaire de freiner dans les pentes pour maintenir la vitesse constante. C'est, bien sûr, le cas général mais, dès lors que le programme visait à traiter toutes les configurations possibles de marche, il fallait envisager le cas des pentes accélératrices, pentes dans lesquelles la vitesse d'équilibre est supérieure à la vitesse maximale de circulation (et nécessitant donc un freinage)⁽¹⁾. Examinons quelle stratégie doit être adoptée dans ce cas, le principe de base étant que l'on cherchera à cesser la traction avant la forte pente, ce qui économisera de l'énergie, la reprise de vitesse étant assurée par la gravité dans la forte pente ce qui, rendant inutile tout ou partie du freinage, évitera de gaspiller l'énergie apportée par la gravité. Cette séquence de la marche peut être représentée par le schéma ci-dessous et se décompose en deux phases.



- phase 1 où, partant de la vitesse de circulation V_r économique telle qu'elle a été définie précédemment, on cesse la traction au point A pour poursuivre en marche sur l'erre sans consommation d'énergie et où la vitesse diminue,
- phase 2 où, à partir du point B de début de la forte pente, le train réaccélère jusqu'à atteindre la vitesse V_L limite de la ligne qui est maintenue ensuite grâce au freinage.

Le problème est alors de déterminer le point de couper-courant A qui satisfait le critère habituel, à savoir, celui de la constance, quelle que soit la phase de la marche, du gain d'énergie unitaire. Dans ce but on fait varier la vitesse V du début de la forte pente. Une augmentation de cette vitesse, due à une prolongation de l'effet de traction dans la phase 1, se traduit par une prise en charge plus rapide par le frein en phase 2. On repère par de_1 et de_2 les variations d'espace correspondantes. Si l'on convient d'appeler γ_1 et γ_2 les décélérations et accélérations moyennes pendant les phases 1 et 2 (valeurs qui dépendent directement du profil rencontré pendant ces deux phases) il est aisé de montrer que γ_1 et γ_2 sont liées par la relation :

$$de_2 = - \frac{\gamma_1}{\gamma_2} de_1$$

(1) A titre d'exemple, un train composé de matériel "grand confort" ou "UIC" a une vitesse d'équilibre de 190 km/h dans une pente de 7,9 mm/m tandis qu'un train de marchandises "tout venant" est en équilibre à 80 km/h dans une pente de 5,4 mm/m.

$$\Delta t = \frac{de}{V_i} - \frac{de}{V_f} \Rightarrow \Delta t_1 = \frac{de_1}{V_r} - \frac{de_r}{V} \quad \& \quad \Delta t_2 = - \left[\frac{de_2}{V} - \frac{de_r}{V_L} \right]$$

- 13 -

$\Delta t_1 < 0$
 $\Delta t_2 < 0$ } gain de temps

Le gain de temps apporté par un accroissement de la vitesse V est égal à la somme des gains de temps élémentaires des deux phases et, donc, peut s'écrire (en appliquant la mise en équation explicitée lors de l'exposé de la méthode générale) :

$$dt = dt_1 + dt_2 = \frac{de_1}{V_2} - \frac{de_1}{V} + \frac{de_2}{V_L} - \frac{de_2}{V}$$

En rapprochant ces deux formules de l'expression du surcroît de consommation d'énergie qui s'exprime par l'équation :

$$dE = R_1 de_1$$

Surcroît Σ pour parcourir de_1 à V_r

(car seul le prolongement de la traction en phase 1 est consommateur d'énergie), on peut écrire :

$$W_{le} = \frac{dE}{dt} = \frac{R_1}{\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \cdot \frac{1}{V_L} - \frac{1}{V_2} + \frac{1}{V} (1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_2})} \quad (9)$$

 R_1 étant toujours la résistance à l'avancement (ici en phase 1) incluant l'effet du profil. Ainsi, connaissant la valeur de W_{le} , qui doit être constante pour toute la marche, il est possible d'en déduire la vitesse V à laquelle doit être abordée la forte pente (et donc la position du point de couper-courant A). Il est à noter que, comme pour les autres cas de prise de marche sur l'erre, le profil en amont de la forte pente a une influence directe sur le résultat obtenu (par R_1 et γ_1 dans la formule (9)).

Remarque : simplification de la prise en compte des fortes pentes.

Comme il vient d'être montré, la valeur des profils moyens, tant dans la zone de forte pente que dans la zone précédente, a une influence importante qui, sans anticiper sur le mode de résolution informatique des équations, va conduire à un nombre d'itérations important. Or, en pratique, et cela a été confirmé par un grand nombre d'essais, les valeurs usuelles du gain d'énergie unitaire conduisent à des vitesses V très faibles. Ceci a pour corollaire de supposer que la longueur de la forte pente est importante pour que le train retrouve la vitesse maximale sous l'effet de la gravité. En pratique cette condition est rarement réalisée. Aussi on ne peut appliquer intégralement la méthode qui vient d'être exposée. Pour exploiter au mieux l'apport d'énergie gravitaire on applique la procédure simplifiée suivante :

- mise en marche sur l'erre dans la zone précédant la forte pente,
- reprise de la vitesse stabilisée⁽¹⁾, sous l'effet de la gravité au bas de la forte pente, le problème consistant à rechercher le point de prise de marche sur l'erre permettant de respecter la seconde condition.

(1) Dans le paragraphe précédent il avait été indiqué que l'on reprenait la vitesse limite et non la vitesse stabilisée. En pratique les différences sont faibles car la prise en compte de la vitesse limite oblige à tractionner plus longtemps dans la zone précédant la forte pente. Un grand nombre d'essais a montré que les différences entre les énergies économisées par chacune de ces solutions étaient négligeables.

2.62 - Cas des faibles vitesses limites de ligne

Dans certains cas, la résolution du système d'équations de base peut conduire à une vitesse de circulation optimale V_r supérieure à la vitesse limite de la ligne⁽¹⁾. Dans ce cas, on respecte les vitesses limites de la ligne (toute la marge de régularité étant obtenue par les séquences de marche sur l'erre⁽²⁾). Bien entendu la consommation d'énergie pour un temps de parcours donné sera supérieure à ce qu'elle aurait été si l'on avait pu circuler à la vitesse optimale V_r .

2.63 - Cas des faibles vitesses trains et des fortes marges de régularité

Lorsque l'on étudie le problème des trains à faible vitesse de circulation et à forte marge de régularité (cas plus particulier de certains trains de marchandises) on est amené, en suivant la stratégie de conduite optimale, à prévoir des marches sur l'erre très longues qui conduisent à des vitesses de prise de freinage V_f très basses. Il a paru judicieux, pour tenir compte des impératifs d'exploitation des lignes (déplacement rapide de zones critiques par exemple), de limiter cette possibilité et de ne pas prendre en compte les marches sur l'erre qui aboutiraient à des vitesses de prise de freinage V_f inférieures à un taux précisé par l'utilisateur. Bien entendu, cette limitation conduit, à temps de parcours égal, à une consommation d'énergie supérieure à ce qu'elle aurait pu être.

*Très réessai
pour FdV*

(1) Ou à certaines des vitesses limites de la ligne lorsque des tronçons voisins ont des vitesses limites très différentes.

(2) Il peut arriver que, dans ce cas, sur un parcours donné, la prise en compte de toutes les zones de forte pente et leurs marches sur l'erre correspondantes conduit à une détente trop importante. Dans ce cas particulier, on ne retient alors que les zones de forte pente amenant un maximum de gain d'énergie.

3 - MISE EN ŒUVRE INFORMATIQUE

L'algorithme de calcul des marches-types économiques qui vient d'être exposé suppose, pour être mis en œuvre, qu'un certain nombre d'itérations soit effectué à divers niveaux. Ces itérations, qui seront exposées dans la suite du document, correspondent toujours à des bouclages sur des éléments du programme informatique HORER de calcul des marches de base.

Avant d'entrer en détail dans l'informatisation du calcul des marches-types économiques, il est donc bon de rappeler les principaux aspects du calcul informatique des marches de base.

3.1 - Rappel sur le programme HORER

3.1.1 - Principe général

Ainsi qu'il a été rappelé en introduction, le principe de base consiste à résoudre l'équation fondamentale de la dynamique.

$$\gamma = \frac{F_{\text{moteur}} - F_{\text{résistant}}}{M}$$

où l'on note :

- γ : accélération du train,
- F_{moteur} : effort moteur,
- $F_{\text{résistant}}$: effort résistant ,
- M : masse du train (1)

La valeur de γ étant connue, une double intégration dans le temps délivre la vitesse et l'espace parcouru.(2).

(1) En réalité, et pour tenir compte de l'inertie de rotation des masses tournantes on majore forfaitairement la masse de quelques pourcents.

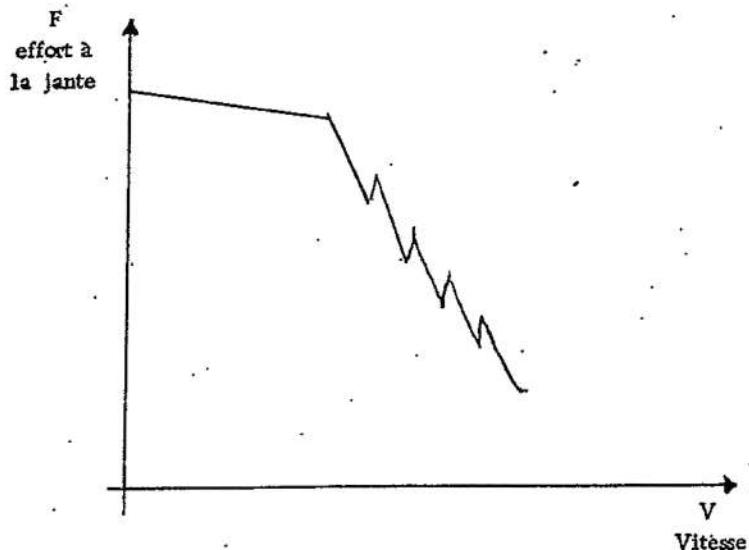
(2) En pratique, et pour tenir compte du fait que les diverses données relatives à la ligne sont connues en fonction de la distance, on opère des intégrations en fonction de l'espace qui délivrent successivement, en partant de l'accélération, la vitesse, et le temps. La transposition des formules est immédiate dès lors que l'on admet que l'accélération est constante sur un pas de calcul.

3.12 - Mode de calcul de l'accélération

3.121 - Effort moteur

L'effort moteur à la jante que peut délivrer l'engin de traction est connu grâce aux courbes effort-vitesse.

En traction électrique et diesel électrique, ces courbes tiennent compte du fonctionnement électrotechnique de la machine et, en particulier, des couplages (série, série parallèle, parallèle) des moteurs de traction, du degré de shuntage des inducteurs ainsi que, éventuellement, de l'insertion dans le circuit de traction de rhéostats de démarrage. Elles se présentent de façon schématique comme l'indique la figure ci-dessous, les discontinuités étant le reflet d'une modification de commande de l'engin (couplage, shuntage). Pour les engins modernes à thyristors à commande continue, les courbes ne présentent pas ces discontinuités.) limite



En traction électrique, ces courbes s'entendent pour une tension de référence donnée (par exemple 25 kV en courant monophasé ou 1 500 V en courant continu) et sont donc sensibles aux variations de cette tension.

fixe en compte effet Joule
La principale cause de baisse de la tension d'alimentation provient des pertes joules dans la caténaire, pertes qui créent une chute de tension entre la sous-station et la locomotive. Cette chute de tension est directement fonction de l'intensité du courant passant dans la caténaire et, de ce fait, dépend non seulement de la puissance demandée par le train étudié, mais également de celle appelée par les autres trains alimentés par la même sous-station. En traction à courant monophasé, la relative faiblesse des courants (permise par la tension élevée) limite l'influence de ce phénomène et on en tient compte forfaitairement en considérant que la tension d'alimentation au niveau de la locomotive est non plus 25 kV mais 22,5 kV.

En traction en courant continu, le phénomène, eu égard à l'importance des courants (4000 Ampères pour certains engins), est beaucoup plus sensible et il est alors nécessaire de tenir compte de l'armement de la ligne et des autres circulations sur le tronçon pour déterminer la résistance de la ligne, l'intensité qui la parcourt et par suite, la tension disponible au pantographe du train étudié. Les deux facteurs résistance de la ligne d'alimentation et intensité captée par les autres circulations sont intégrés dans la notion de résistance apparente de la ligne R telle que l'on ait :

$$U_{\text{panto}} = U_{\text{sous-station}} - RI, \text{ où } I \text{ est le courant capté par le train étudié}$$

Cette résistance R varie de façon continue en fonction de l'espace pour tenir compte tant de l'intensité moyenne captée par les autres trains que de la variation de la résistance ohmique de la ligne de contact (et des rails assurant le retour du courant) ce qui entraîne une variation continue de la tension captée au pantographe, et par suite, de l'effort développé pour une vitesse donnée. On est conduit, pour simplifier le mode opératoire, à procéder par paliers et à diviser les lignes en zones repérées 0, A, A1, etc, à l'intérieur desquelles la résistance apparente est supposée constante et égale à R_1, R_2, R_3 etc. Par convention, les lettres 0, A, A1, etc, représentent le "profil électrique" de ces zones, qui est donc une caractéristique permanente indépendante des engins moteurs utilisés, tout au moins par grandes classes d'engins.

Par ailleurs, alors que les courbes $F(V)$ sont généralement tracées pour une tension nominale de 1,5 kV, les zones de résistance apparente sont définies pour une tension de sortie des sous-stations de 1,6 kV.

La recherche de l'effort disponible à une vitesse donnée impose donc de modifier les courbes $F(V)$ pour tenir compte de la tension de sortie des sous-stations et de la chute de tension en ligne.

Cela conduit à modifier l'échelle des vitesses (ou à translater la courbe enveloppe), et l'effort disponible à une vitesse V est à rechercher, sur la courbe enveloppe, en regard d'une vitesse V' telle

$$V' = V \frac{U_1 - RI - RmIm}{U_n - RmIm}$$

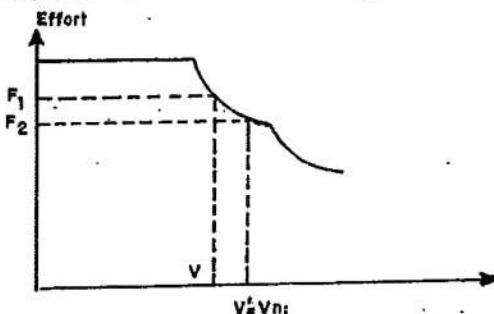
- où U_1 est la tension de sortie des sous-stations
 U_n la tension de référence de la courbe $F(V)$ (en général 1500 V)
 R la résistance apparente de la ligne d'alimentation
 I l'intensité qui parcourt cette ligne
 Rm la résistance du moteur
 Im l'intensité qui traverse le moteur
- } en tenant compte des couplages et du taux d'excitation

Ce calcul devrait être fait à tous les pas, en donnant les valeurs instantanées actuelles à chaque variable.

Il faudrait pour cela calculer l'intensité absorbée par le (ou les) moteur(s), et faire un pari pour la valeur de I (qui dépend des autres engins moteurs présents sur la ligne).

En fait, et par mesure de simplification, le programme détermine, au début de chaque calcul, les coefficients n_1 , n_2 , n_3 reliant V et V' pour chacune des zones définies à l'alinéa précédent, en utilisant, pour I et I_m , des valeurs moyennes.

A chaque pas, la valeur de l'effort disponible sera donc cherchée, sur la courbe enveloppe, en face d'une vitesse V' égale à V_{ni} .



F_1 = effort à la vitesse V sous 1500 V

F_2 = effort réel à la vitesse V en tenant compte des chutes de tension.

Dans cet exemple n_1 est supérieur à 1, ce qui veut dire que la tension panto est inférieure à la tension pour laquelle la courbe enveloppe avait été tracée.

Toutefois, on vérifie que la tension au pantographe reste toujours supérieure à 1000 V. Si cette condition n'est pas remplie, le courant doit être réduit en conséquence, soit en adoptant un taux d'excitation plus élevé, soit en utilisant un couplage inférieur.

Les incertitudes sur les valeurs réelles de la tension à la sortie des sous-stations, de l'intensité en ligne et de la résistance apparente, sont sans doute, dans les calculs horaires, une source d'imprécision.

Enfin, on notera, et ceci n'est valable que pour les matériels à voyageurs, qu'il y a lieu de prendre en compte l'énergie dépensée pour le chauffage ou la climatisation. Cette énergie, en traction électrique, a une incidence directe sur le courant appelé au pantographe et joue donc lorsque l'on intègre l'influence des profils électriques. En traction diesel électrique, elle vient limiter la puissance que peut délivrer l'engin de traction.

3.122 - Effort résistant

Les efforts résistants à vaincre sont essentiellement de deux ordres, la résistance aérodynamique du train et la résistance due au profil de la ligne, cette dernière se transformant d'ailleurs en effort moteur dans les pentes.

La prise en compte des efforts dus au profil ne pose pas de problème particulier. En effet, si on appelle i la penté, M la masse du train et g l'accélération de la pesanteur, l'effort correspondant s'exprime par la formule :

$$F_r = Mgi$$

$$F_r = Mg \sin i \approx Mg i$$

La résistance à l'avancement dépend de facteurs variés complexes et souvent difficiles à saisir. En effet, outre la longueur du train et son maître-couple, dont l'influence est bien connue, il y a lieu de prendre en compte les divers éléments perturbant l'écoulement de l'air (bogies, éléments saillants de la caisse, césure entre caisses,

ligne de toiture, pantographes, etc.) et accroissant ainsi la résistance à l'avancement globale. En pratique, ces éléments secondaires varient relativement très peu pour un même type de matériel. Aussi des formules existent, fruit d'essais en ligne et en soufflerie, donnant pour chaque catégorie de matériel la résistance à l'avancement spécifique par unité de masse (tonne).

- Pour les locomotives et automotrices on a retenu une formule de structure :

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

où A rend essentiellement compte des frottements au niveau du roulement rail-roue, où BV représente les efforts de frottement visqueux qui dépendent beaucoup de la tenue en marche du véhicule et où, enfin, CV^2 traduit de façon bien connue la résistance de l'air.

- Pour le matériel remorqué, la relative dispersion des performances a conduit à ne conserver qu'une expression de la forme :

$$R = A + CV^2$$

le terme en BV étant de faible importance.

3.13 - Respect des vitesses limites

Le calcul de l'accélération du train qui vient d'être exposé concerne les phases de démarrage et de reprise de vitesse après ralentissement. Le programme de calcul HORER doit pouvoir également simuler les marches à vitesse constante et prendre en compte les arrêts et les ralentissements.

Pour ce qui est des marches à vitesse constante, le principe est de calculer la résistance à l'avancement du train (compte tenu du profil) à cette vitesse et de s'assurer qu'elle est inférieure à l'effort moteur qu'est susceptible de fournir l'engin de traction à cette même vitesse. Dans les cas où cette condition n'est pas réalisée, on calcule la différence entre efforts moteur et résistant et l'accélération (ici négative) qui en découle, cette dernière valeur fournissant au moyen d'une double intégration, de façon tout à fait semblable au cas du démarrage, la vitesse de circulation et l'espace parcouru.

Dans les cas d'arrêt ou de ralentissement, il y a lieu de prendre en compte les possibilités de freinage du train. Elles s'expriment par la décélération moyenne que les organes de frein sont capables d'assurer au train entre la vitesse de circulation au moment de la prise de freinage et l'arrêt et ce, par convention, indépendamment du profil rencontré⁽¹⁾. Le mouvement du train, lors d'un freinage, se traduit donc par une perte de vitesse linéaire en fonction du temps et un espace parcouru qui évolue comme le carré du temps de parcours. On peut de même calculer la longueur totale de la zone de freinage en fonction de la baisse de vitesse à réaliser. On peut en effet écrire :

$$V_f^2 - V_i^2 = 2\gamma \Delta e$$

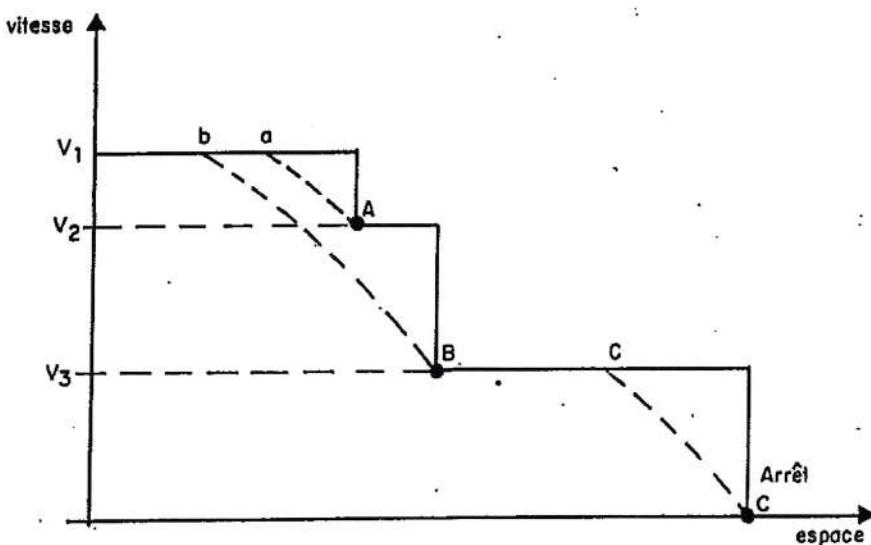
$$\sum \vec{F} = m \vec{a} \quad \frac{1}{2} m V_f^2 - \frac{1}{2} m V_i^2 = W(\vec{F}) = \sum \vec{F} \cdot \vec{l}$$
$$= m \gamma \cdot \vec{l}$$

si V_f et V_i sont les vitesses finale et initiale et Δe l'espace parcouru soit :

$$\Delta e = \frac{V_f^2 - V_i^2}{2\gamma}$$

(1) La décélération prise en compte est bien entendu indépendante du train étudié. On retient $0,6 \text{ m/s}^2$ pour les rames automotrices électriques de banlieue, $0,4 \text{ m/s}^2$ pour les trains de voyageur et $0,2 \text{ m/s}^2$ pour les trains de marchandises.

Cette formulation est à la base du principe retenu pour prendre en compte les cas de freinage pour ralentissement ou arrêt. Explicitons ce principe sur le profil de vitesses limites tel que figuré ci-dessous et qui comprend un ralentissement effectué depuis une vitesse V_1 jusqu'à V_2 , puis un second de V_2 à V_3 et enfin un arrêt.

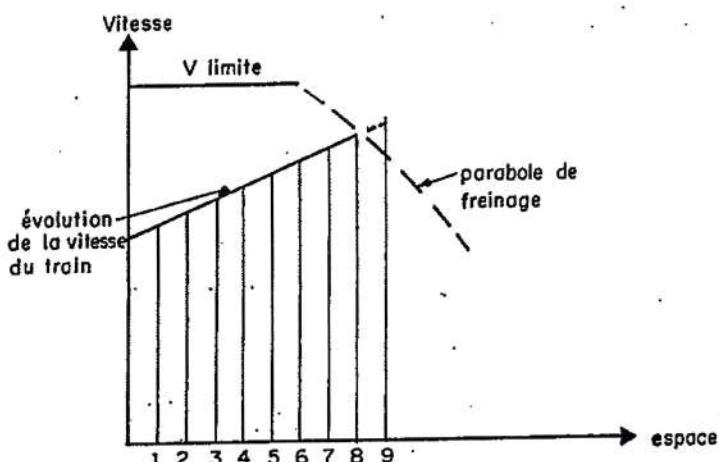


En partant des points A, B et C qui matérialisent les PK où un nouveau taux de vitesse doit être réalisé, il est possible de connaître, à rebours, par la formule précédente, le point où le freinage doit être déclenché, soit, ici, respectivement en a, b et c et toute la parabole de freinage telle que représentée sur la figure ci-dessus. Il est à remarquer sur cette figure que le respect de la vitesse V_3 au point B est plus contraignant que celui de V_2 en A, et, lors d'un calcul de marche, dans ce cas, seule la limitation de vitesse V_3 est prise en compte.

La méthode retenue apparaît alors clairement : lors de l'établissement d'une marche de train, le programme HORER traite en premier lieu les ralentissements et arrêts en générant, à rebours, pour chacun d'eux, une parabole de freinage en éliminant, le cas échéant, les ralentissements conduisant à des contraintes déjà prises en compte (cf exemple ci-dessus).

Ces paraboles sont stockées en mémoire. À chaque pas de calcul des éléments de la marche du train, on vient s'assurer que la courbe vitesse espace n'en vient pas couper une de ces paraboles, sinon on cesse la traction pour suivre une courte à y de décélération constante. Ce processus est illustré par la figure ci-après, où l'on constate, au 9ème pas de cal-

cul, que la vitesse du train est supérieure à celle à laquelle doit être déclenché un freinage. Le train suit alors cette parabole.



3.2 - Adaptation du programme HORER au calcul des marches-types économiques - Le programme MARECO

3.21 - Prise en compte de la stratégie de conduite optimale

On a vu précédemment (§2.5) qu'une marche optimale au point de vue énergétique, se composait de 4 types de phases élémentaires :

- traction en sollicitant au maximum les performances du train pour les démarriages et les reprises de vitesse,
- circulation à vitesse constante inférieure à la vitesse de la ligne (pour autant que cela soit possible compte tenu du profil de cette ligne et des possibilités de l'engin de traction),
- marches sur l'erre (dans les zones précédant les freinages ou dans les zones de forte déclivité),
- freinage utilisant les performances normales en service des organes de frein.

Les phases de traction et de freinage sont analogues à celles qui existent dans le calcul d'une marche de base type HORER (à la différence que, pour les vitesses limites, on respecte des taux qui ne sont pas les taux maximaux autorisés par la ligne, ce qui est sans incidence sur le mode de calcul).

Mode de calcul
évidemment
mode sur l'erre

La phase de marche sur l'erre n'existe pas dans le mode de calcul HORE, et cette nouvelle séquence de calcul a été introduite dans le programme MARECO. De manière très simplifiée, cette séquence de calcul s'effectue à rebours en partant de la vitesse de prise de freinage (cas où cette séquence précède un freinage) ou du PK de fin d'une pente accélératrice (cas des zones de forte pente) et en intégrant les équations différentielles du mouvement en "remontant" le temps ou l'espace jusqu'à retrouver la vitesse origine et donc le point du déclenchement de la marche sur l'erre. Dans

son esprit, la détermination des marches sur l'erre est obtenue de façon analogue à celle qui permet de déterminer les points de prise de freinage.

Concernant le problème du freinage, il a paru intéressant de prendre en compte l'influence de la pente, notamment dans le cadre des études liées à la nouvelle ligne Paris - Sud-Est où les pentes atteignent 35 %, qui vient soit renforcer, soit réduire l'action des freins.

3.22 - Recherche de la marche-type économique correspondant au temps de parcours imposé

La stratégie de conduite qui vient d'être rappelée consiste à rechercher des séquences de marche, sur l'ensemble d'une ligne, telles que le gain d'énergie unitaire résultant d'un allongement élémentaire du temps de parcours ait la même valeur pour toutes les séquences.

Il reste à rechercher la marche-type économique et donc le gain d'énergie unitaire qui conduit au temps de parcours imposé. Pour ce faire, on procède par itérations. Compte tenu des essais faits lors de la mise au point du programme, on se fixe a priori un gain d'énergie unitaire G_1 , qui permet de définir une marche-type économique M_1 (1) associée à un temps de parcours t_1 . Ce temps t_1 est comparé au temps T visé et l'on en déduit une correction sur le gain unitaire qui devient G_2 , ce qui conduit à une marche M_2 et un temps t_2 . Cette approche est renouvelée jusqu'à concordance du temps t avec T (avec bien sûr une marge). En pratique, l'expérience montre que le phénomène est très rapidement convergent. Si l'on tolère un écart de 30 s, il suffit dans la majeure partie des cas d'un calcul intermédiaire, au maximum de deux.

Cette utilisation itérative est, bien évidemment, spécifique du programme MARECO et n'existe pas dans le programme HÖRER.

Il est enfin à noter que, d'une part, les marches intermédiaires sont, elles aussi, optimales au plan énergétique, mais pour un temps de parcours différent, et que, d'autre part, les calculs à rebours effectués pour les marches sur l'erre, spécifiques d'un gain unitaire d'énergie, sont à reprendre pour chaque marche.

3.23 - Définition des temps de parcours à respecter

3.231 - Prise en compte de la marge de régularité

L'instruction générale TR 1 B 1 n° 1 "Détermination des horaires" prévoit que la valeur de la marge de régularité incluse dans la marche-type puisse, à la demande, être fixée, soit par un pourcentage du temps de la marche de base, soit par un nombre de minutes par 100 km de parcours, soit par un nombre donné de minutes sur l'ensemble du parcours.

Le programme MARECO permet d'appliquer n'importe laquelle de ces méthodes.

(1) Cette marche-type économique M_1 est caractérisée par une vitesse stabilisée, des vitesses de prise de freinage et de marche sur l'erre qui dépendent directement du gain G_1 (voir § 2.5).

Marge de régularité

*Hence son
→ place*

De surcroît, l'horaire d'un train peut, en raison de contraintes d'exploitation par exemple, comporter des points dits obligés où l'heure de passage ne peut en aucun cas s'adapter à une meilleure répartition de la marge de régularité globale. Le parcours est alors tronçonné en autant de parcours élémentaires qu'il existe de points singuliers (plus un), et chaque tronçon, défini par l'exploitant par son PK de fin et les caractéristiques de marge de régularité à y respecter (définies comme précédemment sous forme d'horaire, de pourcentage, de détente par tranche de 100 km ou de détente globale), est traité séparément.

*Etude des
contraintes*

Il est toutefois à remarquer que ces contraintes doivent être étudiées préalablement avec soin. En effet, elles ne sauraient être quelconques car elles risqueraient alors de conduire à des impossibilités dans le respect des temps demandés. L'exemple suivant illustrera ce point.

On suppose que sur un tronçon ① on impose une marge de régularité très importante, qui conduise à pratiquer en fin de celui-ci une vitesse relativement basse V ; si, sur le tronçon ② on souhaite un temps de parcours comportant une faible marge de régularité, il est possible que ce temps ne soit pas physiquement réalisable compte tenu de la basse vitesse de départ V.

3.232 - Limites des diverses formes de prise en compte de la marge de régularité

On vient de voir que la marge de régularité à prévoir dans la marche-type pouvait, soit être accordée globalement pour tout le parcours, soit répartie de façon variable sur plusieurs sous-parcours élémentaires.

*limi
t de
parcours
élémen
taire*

Il y a lieu de préciser que cette seconde méthode a ses limites et que la multiplication du découpage tend à réduire les économies d'énergie qui sont maximales lorsque l'algorithme de calcul peut affecter la marge de régularité de façon optimale sur l'ensemble. Dans l'optique d'une réduction maximale de la consommation d'énergie il y a donc lieu d'imposer un minimum de contraintes horaires intermédiaires.

3.24 - Rentrée des données

Comme on l'a vu dans les paragraphes précédents, la mise en oeuvre du programme MARECO nécessite la fourniture de toutes les données nécessaires à tout calcul d'horaires : caractéristiques de la ligne et de ses installations fixes (profil, profil électrique), caractéristiques du train, courbes effort-vitesse de l'engin de traction.

De plus, on doit indiquer les données, propres à la marche-type souhaitée (par tronçon ou pour la mission entière), qui sont soit :

- le temps de parcours imposé,
- la marge de régularité allouée en pourcentage du temps de parcours en marche tendue,

- la marge de régularité exprimée en nombre de minutes à perdre par 100 km de parcours,
- la marge de régularité totale en minutes.

L'examen détaillé de la structure des données sortirait du cadre du présent document⁽¹⁾.

3.25 - Sortie des résultats

Le programme MARECO délivre, en sortie, sur listing, les éléments de la marche de base et de la marche-type souhaitée (ainsi que, sur option, les marches-types intermédiaires calculées lors des diverses opérations).

Il est également possible, en option, d'obtenir un tracé graphique sur table traçante de l'évolution de la vitesse du train en fonction de l'espace et du temps en fonction de l'espace⁽²⁾.

Enfin, et en marge du calcul strict d'horaire, le programme MARECO délivre, sur option, tous les éléments énergétiques des marches étudiées :

- consommation d'énergie à la jante,
- consommation au pantographe pour la traction électrique,
- consommation à l'arbre du moteur diesel (ou de la turbine) en traction thermique,

(si l'on fournit, pour ces deux derniers points, en donnée, les courbes de rendement des engins de traction).

- consommation d'énergie réactive en traction électrique monophasée (en partant des courbes de facteurs de puissance de l'engin qui sont à rentrer en donnée avec les courbes de rendement),
- consommation de carburant diesel et émission de polluant (en partant de la connaissance de la consommation spécifique et de l'émission spécifique de polluant).

Remarque :

La connaissance détaillée des énergies consommées pendant les divers tronçons d'une marche permet d'apprécier les économies (ou les dépenses supplémentaires) apportées par les diverses mesures qui peuvent être prises au niveau des infrastructures (relèvement de vitesse) ou de l'exploitation (modification des jalonnements intermédiaires d'un horaire).

- (1) Pour toute précision complémentaire sur ce point on pourra se reporter au document RT n° 77-175 : CALCUL des MARCHES ÉCONOMIQUES - PROGRAMME MARECO - NOTICE d'UTILISATION. Ce document précise la structure exacte des données à fournir au programme ainsi que le mode de rentrée des variables optionnelles définissant les sorties souhaitées. De surcroît, ce document explicite la structure informatique du programme MARECO (organigramme, liste et objet des sous-programmes, dictionnaire des principales variables entrée-sortie, listing complet). Ce document est disponible au Secrétariat du Département Cybernétique/Technique de la Direction des Etudes Générales et de la Recherche.
- (2) Il est à noter que le tracé précis de la courbe temps espace peut prendre en compte la notion de "profil corrigé" utilisée dans les études de découpage en canton de la ligne nouvelle Paris - Sud-Est. Le programme MARECO est mis en oeuvre à cette fin pour le Département Sécurité et Equipment du Transport de la Direction du Transport.

Au plan de la politique de l'entreprise quant au problème des économies d'énergie, ces estimations ne valent bien évidemment que pour des marches théoriques. L'impact exact de la stratégie MARECO* ne peut être saisi pratiquement qu'au moyen de relevés de consommation d'énergie, à l'aide de compteurs, s'appliquant à des marches pratiques issues des programmes MARECO et HORER.

3.3 - Utilisation opérationnelle du programme MARECO

Des groupes de travail, animés par le Service de l'Informatique et la Direction du Transport, ont mis au point les structures permettant aux Divisions RT2 des Réseaux d'utiliser le programme MARECO de la même manière que le programme HORER et d'obtenir, en sortie, les marches-types désirées sous une forme facilement exploitable.

* compte tenu des incertitudes sur les modes de conduite réellement pratiqués par les mécaniciens

4 - EXEMPLES d'APPLICATION

Ainsi qu'il a été exposé plus haut, l'algorithme de calcul des marches MARECO permet de déterminer des marches-types avec ou sans prise en compte de contraintes intermédiaires. Les exemples qui vont être présentés ci-après ont été choisis aussi variés et typés que possible de façon à rendre compte de ces diverses possibilités.

4.1 - Application du programme MARECO à la ligne nouvelle Paris - Sud-Est

Cette ligne se caractérise par des profils en long présentant des pentes et des rampes pouvant atteindre 35 %... Pour ce qui est des pentes importantes, elles seront mises à profit pour déclencher de nombreuses mises en marche sur l'erre. Le graphique de la figure 1 (provenant directement du programme de tracé associé à MARECO) montre l'évolution de la vitesse et du temps en fonction de l'espace parcouru (pour une marche PARIS-LYON en 2 h)⁽¹⁾. On a repéré par l'indication PCC (point de couper-courant) les points kilométriques où est entamée une marche sur l'erre. Il est à remarquer que la vitesse stabilisée souhaitable (V_r) égale à 247 km/h dans ce cas particulier ne peut fréquemment pas être atteinte, notamment dans les rampes importantes et longues où la puissance de motorisation est insuffisante pour vaincre la résistance à l'avancement à cette vitesse. On notera enfin que, par rapport à la marche tendue, l'économie d'énergie à la jante est de 17 %.

4.2 - Application du programme MARECO sur l'axe Paris - Bordeaux

Le graphique de la figure 2 montre l'application du programme MARECO au train 5 "Etendard" circulant sur l'itinéraire PARIS → BORDEAUX avec des arrêts à ST PIERRE-des-CORPS, POITIERS et ANGOULEME. Pour cette application, on a imposé comme contrainte les temps de parcours prévus à l'indicateur horaire entre les gares d'arrêt intermédiaires. Il est à remarquer ici que les vitesses stabilisées V_r sont aisément maintenues, le profil de la ligne Paris - Bordeaux étant faiblement accidenté. On notera que les vitesses stabilisées sont variables d'un tronçon à l'autre (respectivement 177, 197, 154 et 139 km/h) ceci provenant du fait que les marges de régularité sont elles-mêmes différentes (6,6, 2,7, 13,6 et 18,8 %).

(1) De façon à mieux apprécier le mode d'action de l'algorithme MARECO on a reporté sur la figure 1 le profil de la ligne nouvelle Paris - Sud-Est.

A titre d'exemple, et pour montrer l'intérêt qu'il y a au plan énergétique à limiter les contraintes intermédiaires, la même application a été traitée en laissant libre les temps de parcours intermédiaires. L'examen de la marche tracée à la figure 3 montre que la vitesse stabilisée Vr est alors la même pour tout le trajet (162 km/h). Les arrivées aux gares intermédiaires de ST-PIERRE-des-CORPS, POITIERS et ANGOULEME sont alors retardées.

Dans le cas des temps de parcours intermédiaires imposés, le calcul de l'énergie consommée à la jante donne 6887 kWh. Le retrait des contraintes intermédiaires conduit à abaisser cette consommation à 6754 kWh, soit une économie de 2 %. Il est possible que la suppression de ces contraintes entraîne, au plan de l'exploitation de la ligne, certaines difficultés (rupture des correspondances, moins bonne inscription du train dans une batterie, etc...). Des choix, peut-être délicats, sont alors à faire.

4.3 - Application du programme MARECO à la relation Paris - Dijon

On a choisi sur cet exemple de montrer la possibilité pour l'algorithme MARECO de prendre en compte des passages à des heures précises en des points kilométriques quelconques où le train est en vitesse. Le train considéré est un rapide C 160 de 800 t remorqué par une CC 6500 reliant Paris à Dijon sans arrêt en 2h19. On a imposé, si t_0 est l'heure de départ à Paris, de passer à $t_0 + 52$ mn à Sens, à $t_0 + 1h38$ à Nuits/s/Ravières, et à $t_0 + 2h05$ à Blisy Bas.

On trouvera aux figures 4 et 5 les tracés correspondant à cette marche avec les contraintes et sans les contraintes intermédiaires. On peut faire les mêmes constatations qu'au § 4.2. quant à la fluctuation des marges de régularité accordées sur les divers parcours élémentaires et noter par ailleurs que la prise en compte des contraintes se traduit par une consommation supplémentaire de 1 %.

Concernant ce dernier exercice, il a été tenté de chiffrer la consommation résultant du suivi du fascicule horaire en vigueur. Cette estimation traduit une surconsommation de 100 kWh, soit 1,7 % par rapport à la marche-type MARECO. Il est à noter que la modicité du gain peut ici s'expliquer par le fait que cette marche ne présentant pas d'arrêt intermédiaire et l'itinéraire emprunté n'ayant que peu de limitations de vitesse, l'algorithme MARECO ne déclenche, de ce fait, que peu de marches sur l'erre et se contente essentiellement d'abaisser la vitesse maximale de circulation, se rapprochant ainsi de la marge de régularité uniforme proposée par le programme HORER.

5 - CONCLUSIONS

Les calculs d'horaires effectués à l'aide du programme HORER sont particulièrement bien adaptés au calcul des marches de base. Pour ce qui est du calcul des marches-types, ce programme pratique un abattement forfaitaire de toutes les vitesses de la marche de base selon un pourcentage égal au taux de marge de régularité adopté. Cette répartition uniforme de la marge de régularité conduit à des marches-types non optimales au plan énergétique.

A l'inverse, l'algorithme MARECO, dans lequel la marge de régularité est matérialisée par l'écrêttement des vitesses les plus élevées et le déclenchement de marches sur l'erre en amont des zones de ralentissement ou des pentes accélératrices, conduit à une répartition qui minimise l'énergie de traction consommée à la jante.

Il est à noter que la détermination des vitesses écrêtées et la fixation des points de couper-courant qui caractérise la marche-type dite économique s'entendent pour une "mission" bien déterminée (temps de parcours, tonnage, engin moteur) et que toute modification des paramètres de bases de cette mission se traduit, pour conserver une marche économique, par une modification corrélative des grandeurs caractéristiques de la marche-type.

L'algorithme MARECO, par sa transposition informatique, est un outil performant de calcul des marches-types et un complément précieux de la machine analogique AMSLER qui, par son conception, reste un outil d'étude, mais ne saurait devenir un outil opérationnel de calcul systématique des marches-types. Il est, en effet, possible, en partant des mêmes données que celles actuellement fournies au programme HORER, de calculer à grande échelle avec MARECO des marches-types économiques avec, toutefois, un temps de calcul trois ou quatre fois plus important, à cause des itérations inhérentes à l'algorithme.

Pour tenir compte des diverses sujétions liées à l'établissement pratique des horaires, parallélisme des marches des trains se succédant, correspondances à assurer, report d'une part importante de la marge de régularité en fin de parcours, il a été prévu avec l'algorithme de calcul MARECO de pouvoir prendre en compte un certain nombre de contraintes d'exploitation exprimées sous forme de temps de parcours imposés entre des points d'arrêt ou de passage. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que l'introduction de ces contraintes supplémentaires se paie par une augmentation de l'énergie consommée à la jante.

Enfin, il y a lieu d'insister sur le fait que les marches étudiées par l'algorithme MARECO ne procureront un maximum d'économies d'énergie que pour autant que l'horaire prévu sera respecté avec précision. A cet égard, se pose, bien évidemment, le problème de la façon pratique d'indiquer au mécanicien la marche à suivre (heures de passage avec une grande précision, vitesses de circulation stabilisées, points de couper-courant). Ces divers problèmes ainsi que ceux rencontrés pratiquement par les horairistes ayant à utiliser l'outil MARECO sont examinés par des groupes d'étude spécialisés.

L'utilisation, par la Division RT 2 des Réseaux, du programme MARECO pour la préparation de leurs horaires, devrait permettre, à terme, la généralisation de marches de trains plus économiques en énergie.

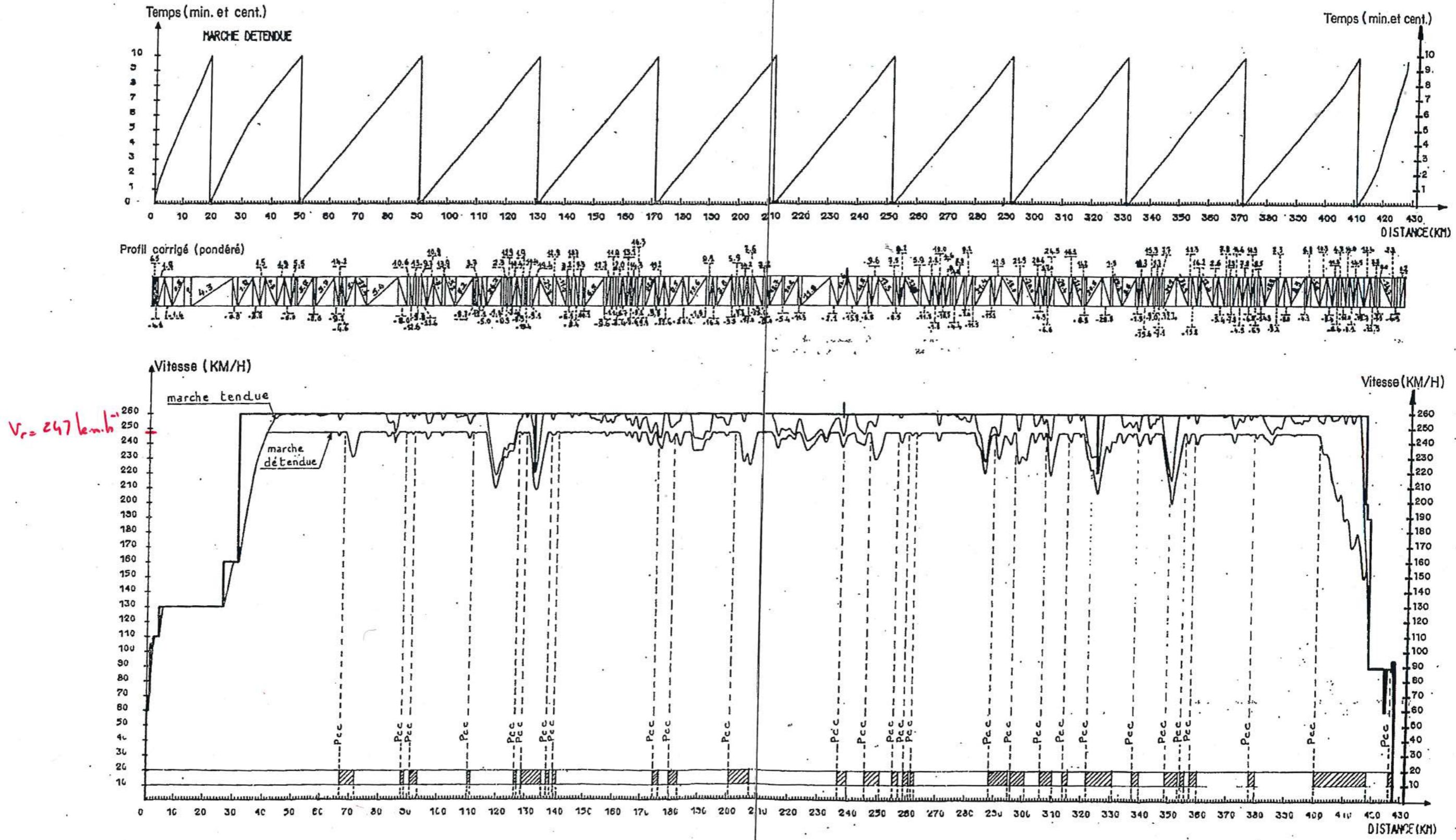
Figures

G 1

PARIS-LYON, CO3-SUD

Figure 1

Temps de parcours : 2h soit 5% de marge de régularité



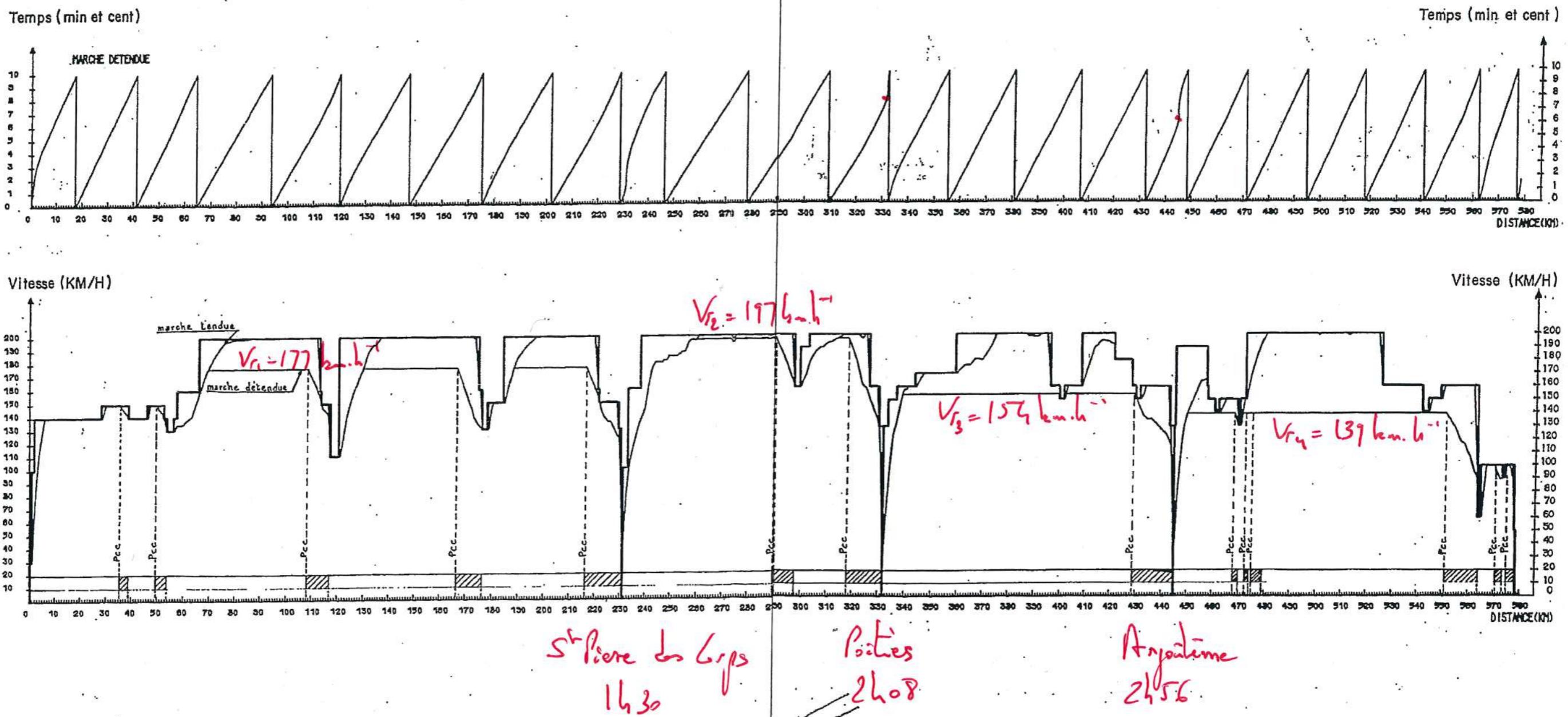
G 2

Chaque : 3 arrêts à horaire étendu

D 2

PARIS-BORDEAUX Train n° 5
 Marche détendue "MARECO" respectant le temps de passage aux gares d'arrêt
 (Marge de régularité 11%)

Figure 2



G3

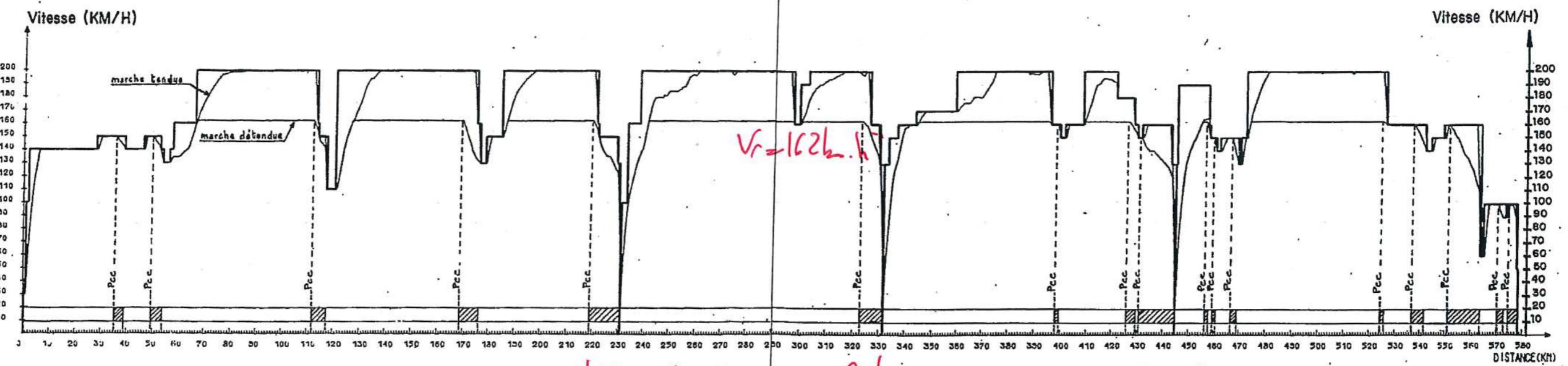
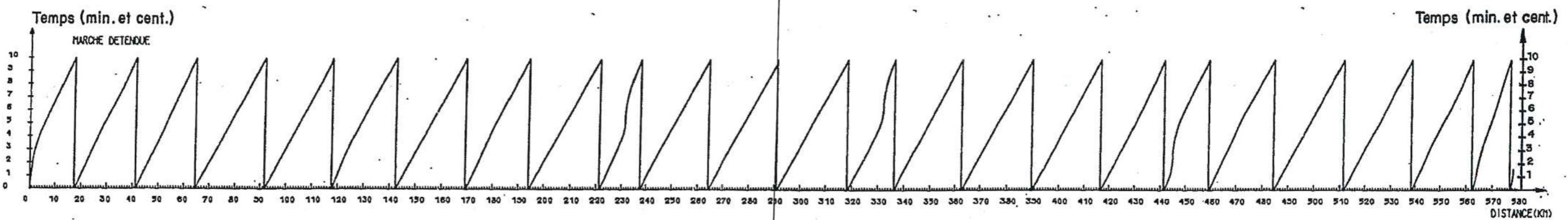
Liberé horaire d'arrêt

D3

PARIS-BORDEAUX TRAIN N°5

Marche détendue MARECO avec modification
des temps de passage aux gares d'arrêt.
(Marge de régularité 11%)

Figure 3.

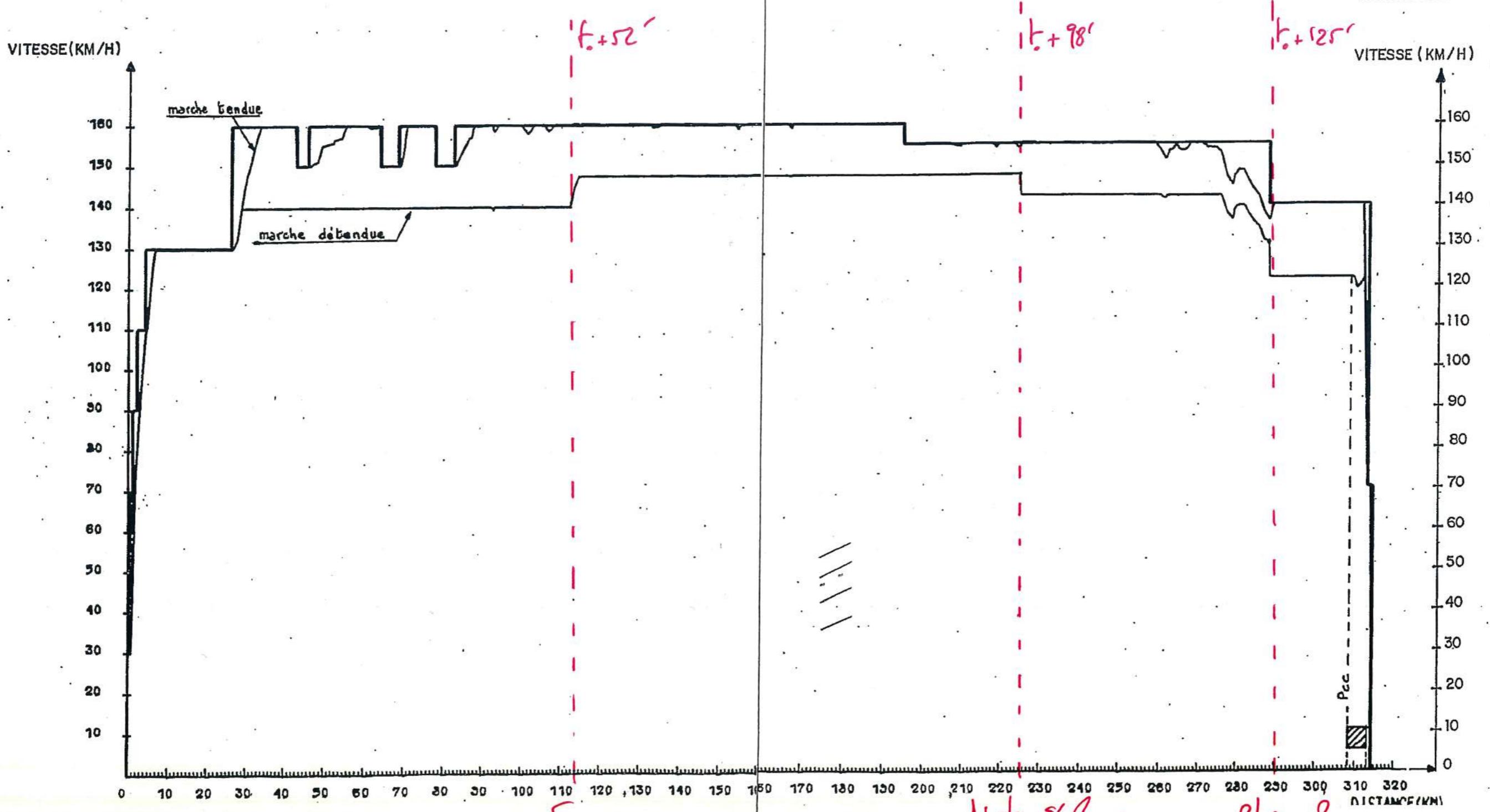
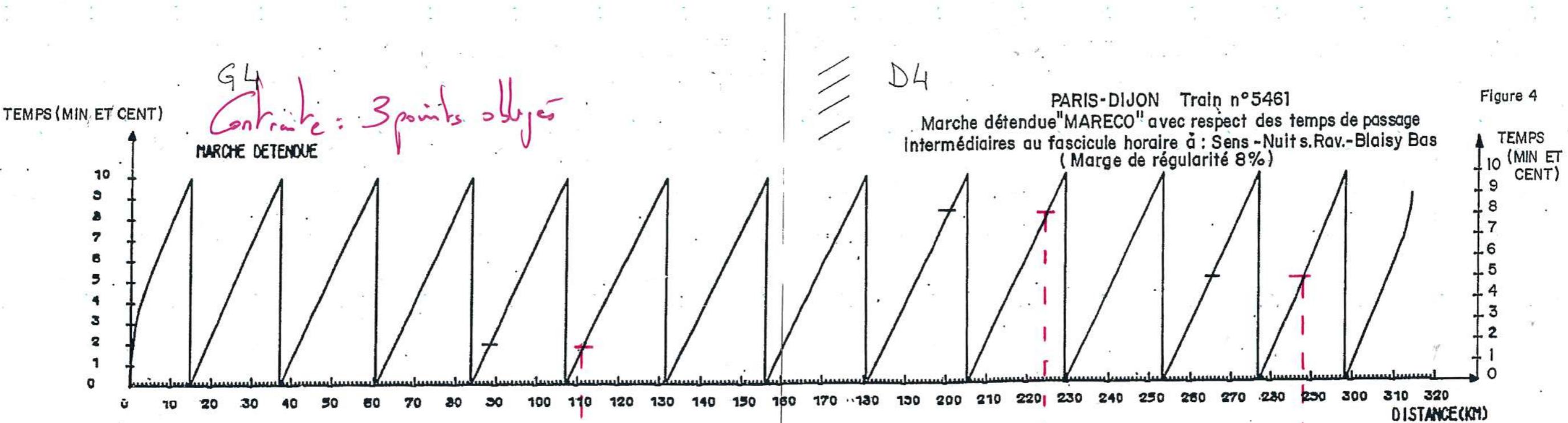


St Pierre des Corps
1h35
(+5)

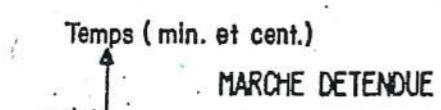
Poitiers
2h15
(+9)

Aytré
5h01
(+5)

Figure 4



G 5

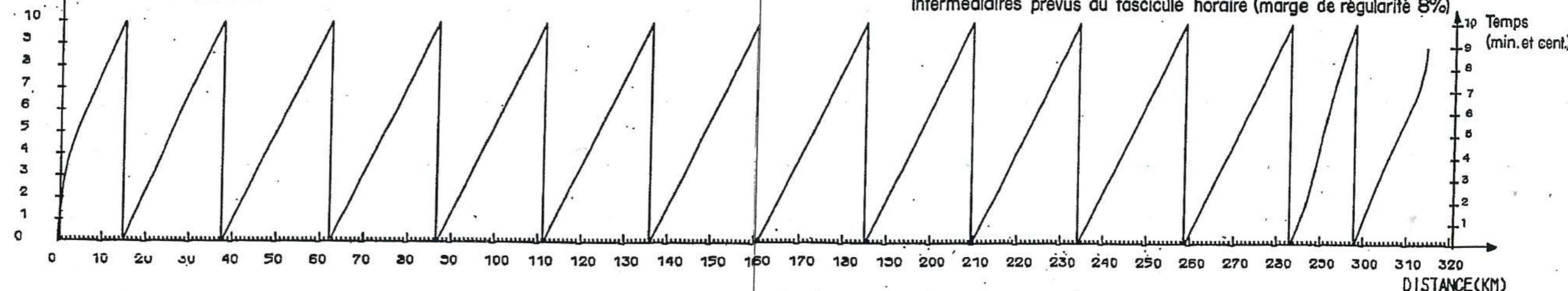


D 5

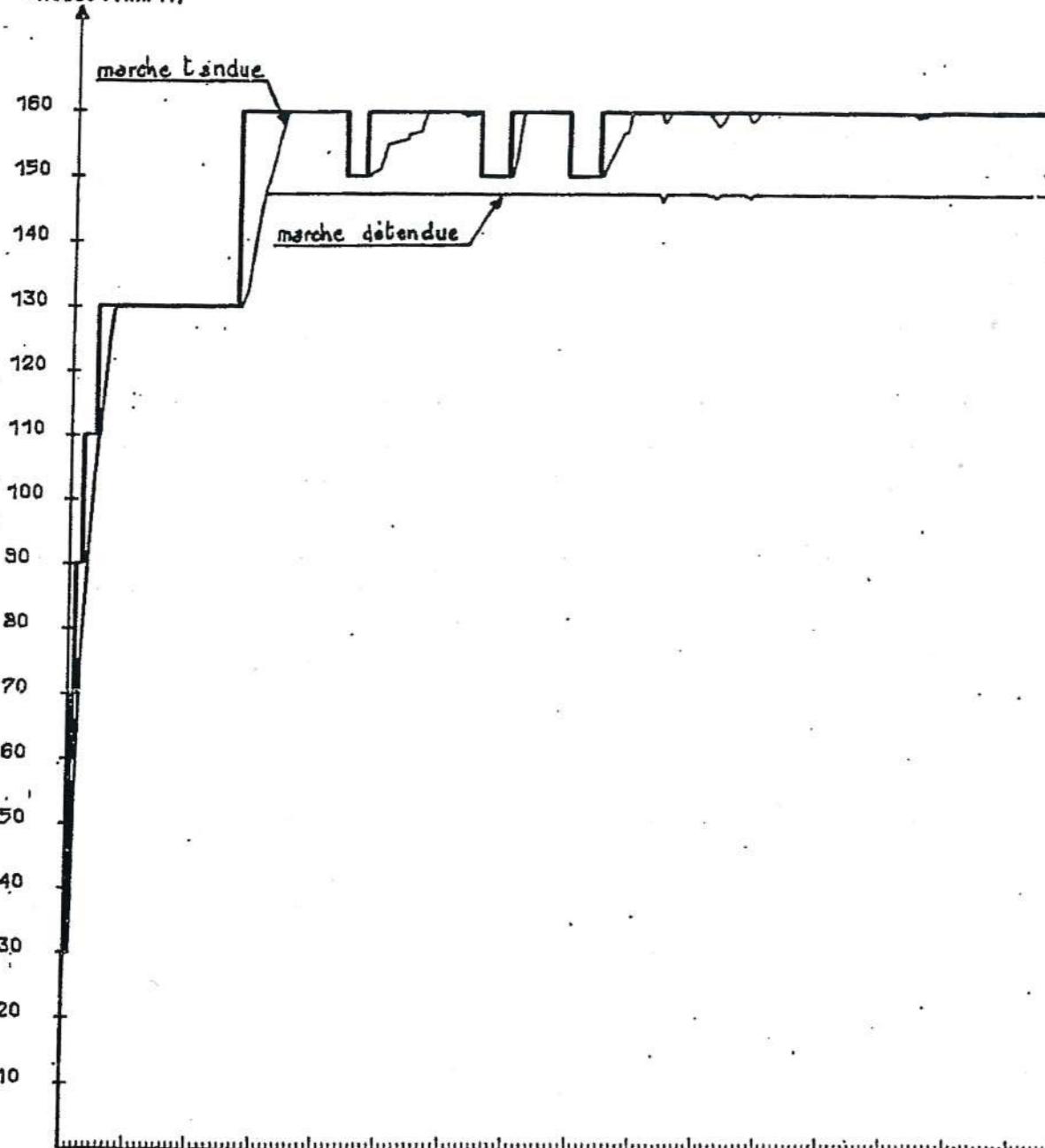
PARIS-DIJON TRAIN N°5461

Marche détendue "MARECO" sans respect des temps de passage
intermédiaires prévus au fascicule horaire (marge de régularité 8%)

Figure 5



Vitesse (KM/H)



Vitesse(KM/H)

