

CALCUL DE MARCHES DE TRAINS ÉCONOMISANT L'ÉNERGIE DE TRACTION

5704

LE PROGRAMME MARECO

Daniel LANCIEN
Chef du Département
Cybernétique/Technique

Michèle FONTAINE
Inspecteur au Département
Cybernétique/Technique

*de la Direction des Études générales
et de la Recherche de la S.N.C.F.*

La S.N.C.F. 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, 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 est difficilement utilisable en pratique dès lors qu'un grand nombre de marches-types sont à établir. Et elle se présente de ce fait 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 aisé 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, minimisation de l'énergie à la jante pour un temps de parcours donné, par un compromis judicieux entre une réduction des vitesses maximales de circulation et le recours à des marches sur l'erre.

Dans une dernière partie, après avoir donné un aperçu sur la mise en œuvre informatique de l'algorithme MARECO, quelques exemples d'application sont donnés qui mettent en évidence les gains d'énergie apportés par la mise en œuvre de cet outil tant au niveau de la conception des marches que sous forme de conseils chiffrés donnés aux mécaniciens.

1. INTRODUCTION

1.1. Définitions

Il paraît opportun de rappeler les définitions de quelques expressions qui seront fréquemment employées dans la suite de l'article :

— la *marche de base* est la marche la plus tendue que l'on juge possible de réaliser en utilisant de façon rationnelle la puissance de la locomotive;

— 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 petits incidents extérieurs venant perturber la marche théorique des trains, et pour compenser les retards consécutifs aux limitations temporaires de vitesse pour travaux;

— 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 S.N.C.F.

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 $F - R = M \gamma$ 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 méthodes analytiques puis graphiques ont été mises successivement en œuvre pratiquement depuis que la notion d'horaire existe. 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.

Un progrès important 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⁽¹⁾. Ce type de calculateur analogique a été construit par les établissements AMSLER en partant des principes de conception mis au point à la S.N.C.F. 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⁽²⁾. Cette conception de machine analogique a été adoptée par de nombreux réseaux. Elle présente tous les avantages et inconvénients des machines analogiques. 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 présentent l'inconvénient d'un temps de mise en œuvre important, qui devient rapidement rédhibitoire lors de travaux à caractère répétitif.

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 aisé d'une part de prendre en compte un maximum de données sans aucune simplification⁽³⁾, et d'autre part de traiter rapidement un grand nombre de calculs. Ce programme de calcul est aujourd'hui utilisé opérationnellement par les organismes chargés d'étudier et de mettre au point les horaires. Par contre, la possibilité de dialogue permanent opérateur-ordinateur faisant défaut, il est impossible par ce procédé d'exercer 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, de manière assez éloignée du mode de travail habituel des agents de conduite. En effet, il a été admis que la marge de régularité était uniformément répartie. Partant de ce principe, le mode opératoire retenu est simple : l'ordinateur élabore la marche de base, en

⁽¹⁾ La description détaillée de la simulatrice analogique AMSLER figure dans la *R.G.C.F.*, n° 4, 1950, « Appareil de la S.N.C.F. pour le tracé des horaires des trains », par M. G. BOHL.

⁽²⁾ 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 *R.G.C.F.*, article de M. P. FREMAUX, n° 3, 1959.

⁽³⁾ A propos du calcul des marches sur ordinateur on pourra se reporter à l'article publié par M. CHAUVIN, Ingénieur de la Compagnie IBM, dans la *R.G.C.F.*

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 peu réaliste, 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 (*).

1.3. Le problème des marches économiques

Ainsi qu'il résulte de ce qui vient d'être exposé, la S.N.C.F. 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. 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 manière absolument satisfaisante au plan énergétique.

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 de 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 optimale, 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 article 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, puis la manière dont cette stratégie a été automatisée et systématisée de manière à couvrir tous les problèmes pratiques de traction. L'exposé de la mise en œuvre 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 de l'article.

2. DÉTERMINATION D'UNE STRATÉGIE DE CONDUITE OPTIMALE

2.1. Le critère de décision

Une 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 S.N.C.F., c'est-à-dire la somme des redevances à l'E.D.F. et aux compagnies fournissant le gazole. (Il est clair que la diversité et le volume des circulations d'une part, la complexité de la facturation établie par l'E.D.F. 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 : il est difficile de cerner correctement les phénomènes électriques entre sous-station et pantographe d'une locomotive car ceux-ci sont liés à la circulation des autres trains. 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, et pour éviter une trop grande complexité, il a paru

(*) Dans le cas de la marche de base, il est aisé 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.

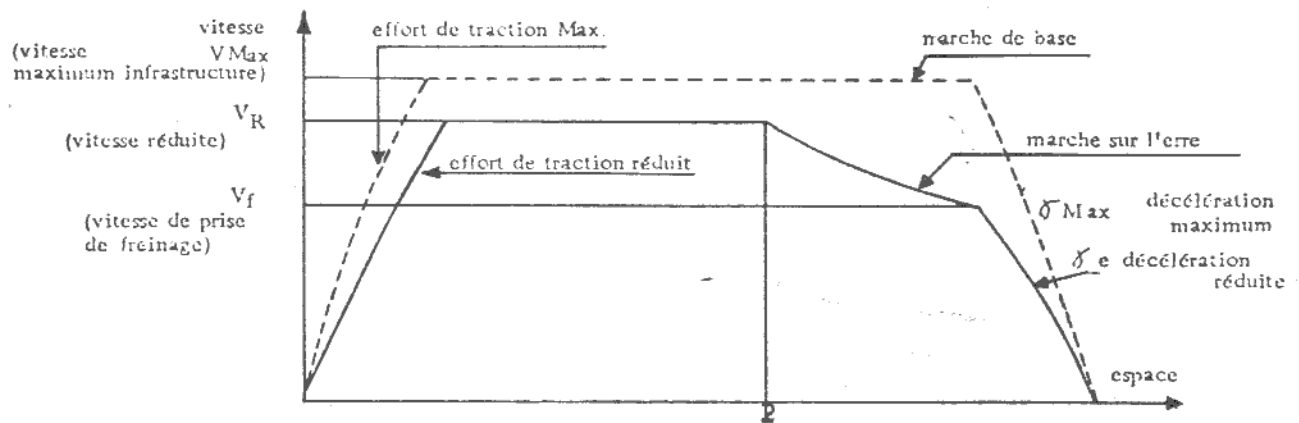


Fig. 1. — Marche-type d'un train représentée dans le plan espace-vitesse.

préférable de se fixer comme critère de décision (l'énergie consommée à la jante). Cette hypothèse semble tout à fait satisfaisante pour les engins de traction modernes présentant un excellent rendement dans toute leur plage de fonctionnement.

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 évoqués plus haut.

2.2. Les éléments de la stratégie de conduite

Le problème ainsi 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 :

- 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;

- 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.

- 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;

- 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 ($-dE/dt$) que l'on peut appeler gain d'énergie par unité de temps supplémentaire (la dérivée algébrique 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_{te} ⁽⁵⁾.

⁽⁵⁾ De premiers travaux ont été conduits dans ce sens par le professeur Di Majo (cf. *Ingegneria Ferroviaria*, septembre 1969, Rome).

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 1 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 qu'en marche type. Concernant cette dernière, on a alloué une marge de régularité lors du démarrage (en ne sollicitant pas toute l'accélération permise par l'engin de traction), lors de 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 P) 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 P 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 la 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. Les relations existant entre ces quatre paramètres et la grandeur $W_{te} = -dE/dt$ vont successivement être mises en évidence.

2.4.1. Cas de la montée en vitesse

Considérons la mise en vitesse, représentée à la figure 2, dans laquelle on passe de la vitesse nulle à une vitesse but V_1 . On not. 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 et, sur une très petite distance, autour de la vitesse V_1 , un effort F_i inférieur à l'effort maximal F_{Max} est appliqué.

S'agissant de petites variations, il est possible de démontrer 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, la résistance à l'avancement ne variant pas de façon significative.

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.

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

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

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 :

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

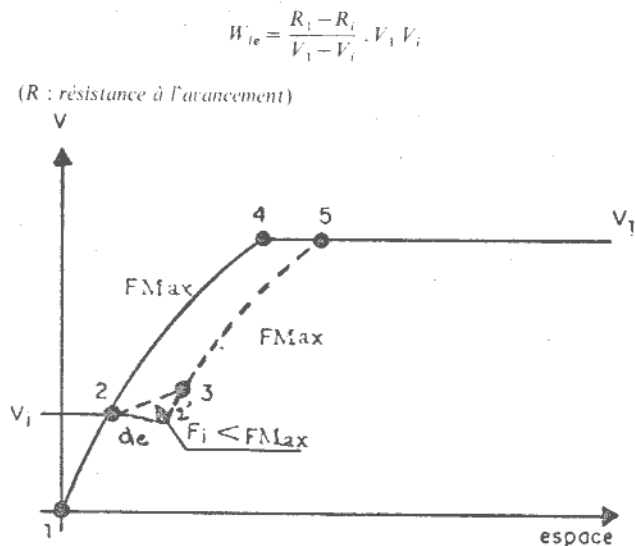
Le rapprochement des formules (1) et (2) permet de calculer la valeur du gain d'énergie unitaire par tonne remorquée :

$$W_{te} = -\frac{dE}{dt} = \frac{R_i - R_1}{V_1 - V_i} V_1 V_i. \quad (3)$$

2.4.2. Cas du parcours à vitesse constante

Considérons un parcours de longueur e parcouru à une vitesse V_1 , donc en un temps e/V_1 , la consomma-

Fig. 2. — Détermination du gain d'énergie unitaire pendant la montée en vitesse.



— 1.2.4.5 Mise en vitesse utilisant l'effort maximal disponible de l'engin moteur.

- - - 1.2.3.5 Mise en vitesse utilisant sur une courte distance (2.3) un effort inférieur à l'effort maximal disponible.

- - - - - 1.2.2'.3.5. Mise en vitesse équivalente sur le plan énergétique au schéma 1.2.3.5.

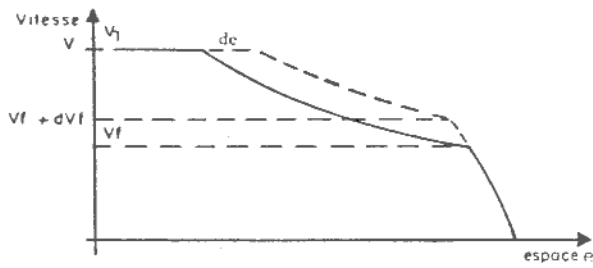


Fig. 3. — Détermination du gain d'énergie unitaire pendant la marche sur l'erre.

$$W_{te} = R_1 V_1 \frac{V_f}{V_1 - V_f}$$

(R = résistance à l'avancement)

tion d'énergie étant $e R_1$ 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 :

$$\frac{e}{V_1 + dV} \quad \text{et} \quad e(R_1 + R'_1 dV),$$

où R' 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 :

$$W_{te} = - \frac{dE}{dt} = R'_1 V_1^2. \quad (4)$$

2.4.3. Cas des marches sur l'erre

Il a été montré précédemment que la marche sur l'erre pouvait être caractérisée par la vitesse de prise de freinage V_f . L'examen de la figure 3 représentant la séquence comprenant une marche sur l'erre abordée depuis une vitesse stabilisée V_1 et se terminant à une vitesse V_f , permet de mettre en évidence la relation entre V_f et le gain d'énergie unitaire.

Un accroissement de la vitesse V_f résulte d'une prolongation de la traction à vitesse V_1 sur un espace de . Il se traduit donc par un surcroît de consommation dE tel que :

$$dE = R_1 de \quad (\text{avec les mêmes notations que précédemment}). \quad (5)$$

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 :

$$dt = \frac{de}{V_1} - \frac{de}{V_f}. \quad (6)$$

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

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

2.4.4. 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 :

$$\frac{dE}{dt} = 0. \quad (8)$$

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 (7).

Un premier élément de la stratégie à adopter apparaît donc : les montées en vitesse (démarrages ou reprises) doivent être effectuées en sollicitant au maximum les possibilités de l'engin de traction (8).

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 séquences sont caractérisées par les formules rappelées ci-dessous :

— marche à vitesse constante :

$$W_{te} = - \frac{dE}{dt} = R'_1 V_1^2;$$

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

Marche à vitesse constante :

$$W_{te} = - \frac{dE}{dt} = (B + 2CV_1) V_1^2.$$

Démarrage :

$$W_{te} = - \frac{dE}{dt} = \frac{C(V_1^2 - V_f^2) + B(V_1 - V_f) \times V_1}{V_1 - V_f} = [C(V_1 + V_f) + B] V_1 V_f$$

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

V_f 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.

(8) Prescription connue depuis les origines de la traction électrique.

- marche sur l'erre :

$$W_{te} = - \frac{dE}{dt} = R_1 V_1 \frac{V_j}{V_1 - V_j}$$

Pour une valeur donnée du gain d'énergie unitaire W_{te} , il existe un seul couple de valeurs V_1 (vitesse constante de circulation) et V_j (vitesse de prise de freinage en fin de marche sur l'erre) permettant de satisfaire simultanément 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 maximale de circulation de la ligne;
- marche sur l'erre se terminant à une vitesse V_j ;
- freinage avec le taux maximal 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_{te} .

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

Il a été indiqué plus haut, au stade des définitions, que la formule de résistance à l'avancement incluait l'effet du profil. En examinant les formules donnant les valeurs de V_j et de V_1 il apparaît alors que :

- l'effet du profil ne joue pas sur la détermination de la vitesse stabilisée de 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 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.

Il a été 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)⁽⁹⁾. Examinons quelle stratégie doit être adoptée dans ce cas, le principe de base étant de 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 la figure 4. Elle se décompose en deux phases :

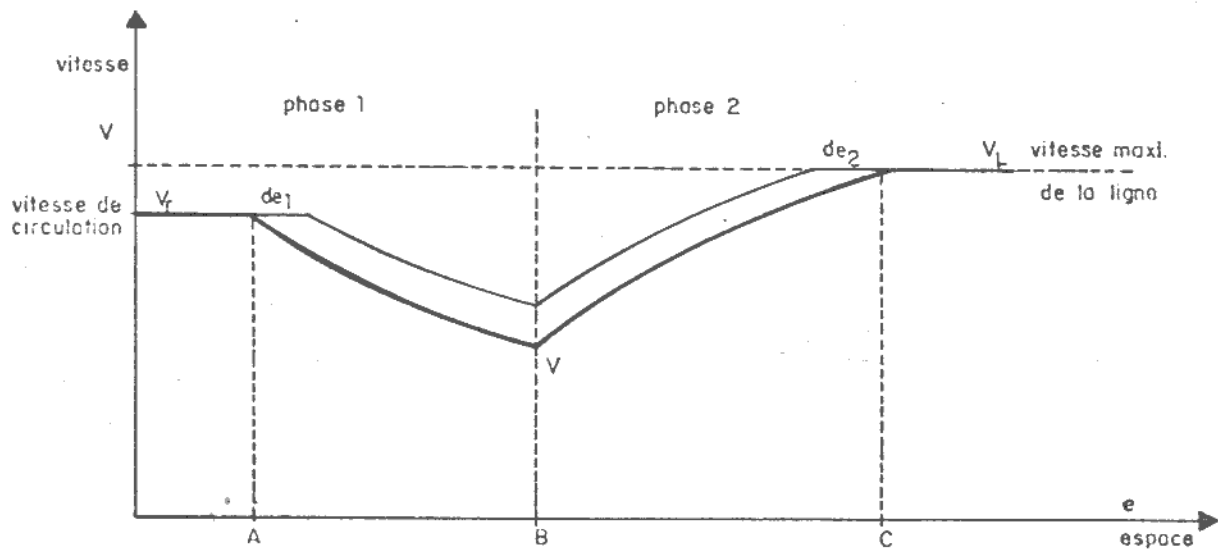
- phase 1 où, partant de la vitesse de circulation V_1 , économique telle qu'elle a été définie précédemment, on cesse la traction au point A pour poursuivre en marche sur l'erre sans consommation d'énergie et où la vitesse diminue,
- phase 2 où, à partir du point B de début de la forte pente, le train réaccélère jusqu'à atteindre la vitesse V_L limite de la ligne qui est maintenue ensuite grâce au freinage⁽¹⁰⁾.

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. Le paramètre fondamental est 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 (soit de_1 et de_2 les variations d'espace correspondantes). Si il est convenu d'appeler γ_1 et γ_2 les décélérations et accélérations moyennes pendant les phases 1 et 2 (valeurs qui dépendent directement du

⁽⁹⁾ 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

⁽¹⁰⁾ Des difficultés d'ordre informatique (recours à des itérations coûteuses en temps de calcul) ont conduit à viser la vitesse stabilisée et non la vitesse limite. Il a été vérifié que les différences de consommation étaient négligeables.

Fig. 4. — Détermination du gain d'énergie unitaire dans le cas de fortes pentes.



$$W_{ic} = \frac{R_1}{\gamma_1/\gamma_2 \cdot 1/V_L - 1/V_2 + 1/V \{1 - (\gamma_1/\gamma_2)\}}$$

(R = résistance à l'avancement; $\gamma_{1,2}$ = accélération pendant les phases 1, 2);

AB, zone de fortes pentes quelconques.
BC, zone de fortes pentes motrices.

profil rencontré pendant ces deux phases) il est aisé de montrer que γ_1 et γ_2 sont liées par la relation :

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

Le gain de temps apporté par un accroissement de la vitesse V est égal à la somme des gains de temps élémentaire 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 :

$$dE = R_1 de_1$$

(car seul le prolongement de la traction en phase 1 est consommateur d'énergie), il vient :

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

R_1 étant toujours la résistance à l'avancement (ici en phase 1) incluant l'effet du profil. Ainsi, connaissant la valeur de W_{ic} , 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)].

2.6.2 Cas des faibles vitesses limites de ligne

Dans certains cas, la résolution du système d'équation de base peut conduire à une vitesse de circulation optimale V_r supérieure à la vitesse limite de la ligne ⁽¹¹⁾. On respecte alors les vitesses limites de la ligne [toute la marge de régularité étant obtenue par les séquences de marche sur l'erre ⁽¹²⁾]. 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 .

2.6.3 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

⁽¹¹⁾ Ou à certaines des vitesses limites de la ligne lorsque des tronçons voisins ont des vitesses limites très différentes.

⁽¹²⁾ 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 déente trop importante. Dans ce cas particulier, on ne retient alors que les zones de forte pente amenant un maximum de gain d'énergie.

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 (dégagement 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.

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 :

$$F_{\text{moteur}} - F_{\text{résistance}} = M. \quad (13)$$

La valeur de γ étant connue, une double intégration délivre la vitesse et l'espace parcouru.

3.1.2. Mode de calcul de l'accélération

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 sous forme d'un ensemble de courbes, 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.

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

La principale cause de baisse de la tension d'alimentation provient des pertes Joule dans la caténaire. 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 (4 000 A 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 l'intensité qui le 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 :

$$U_{\text{panto}} = U_{\text{sous-station}} - RI,$$

où I 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.

L'exposé détaillé du calcul permettant de tenir compte du profil électrique sortirait par trop du cadre

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

du présent exposé. Au plan global ce phénomène se traduira par une réduction de l'effort disponible à la jante de l'engin de traction pour une vitesse donnée.

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 pente, M la masse du train et g l'accélération de la pesanteur, l'effort correspondant s'exprime par la formule :

$$F_r = M g i$$

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 peu pour un même type de matériel. Aussi des formules existent, fruits 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.

3.1.3. 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, le calcul de la différence entre efforts moteur et résistant conduit à 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⁽¹⁴⁾. 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. Des formules élémentaires permettent de calculer la longueur totale de la zone de freinage en fonction de la baisse de vitesse à réaliser.

Au plan pratique, 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.

Ces paraboles sont stockées en mémoire. A chaque pas de calcul des éléments de la marche du train, on vient s'assurer que la courbe vitesse espace ne vient pas couper une de ces paraboles, sinon la traction cesse pour suivre une courbe à γ de décélération constant. Ce processus est illustré par la figure 5, où l'on constate, au 9^e pas de calcul, 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

3.2.1. 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 quatre types de phases élémentaires :

— traction en sollicitant au maximum les performances du train pour les démarrages et les reprises de vitesse;

⁽¹⁴⁾ La décélération prise en compte est de 0.6 m/s² pour les rames automotrices électriques de banlieue, 0.4 m/s² pour les trains de voyageurs et 0.2 m/s² pour les trains de marchandises.

- 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).

La phase de marche sur l'erre n'existe pas dans le mode de calcul HORER, 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.

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

La stratégie de conduite qui vient d'être rappelée consiste à appliquer 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, il est procédé par itérations. Compte tenu des essais faits lors de la mise au point du programme, un gain d'énergie unitaire $G1$, fixé *a priori*, permet de définir une marche-type économique $M1$ ⁽¹⁵⁾ associée à un temps de parcours t_1 . Ce temps t_1 est comparé au temps T visé de manière à déduire une correction sur le gain unitaire qui devient $G2$, ce qui conduit à une marche $M2$ 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 un écart de 30 secondes est toléré, il suffit dans la majeure partie des cas d'un calcul intermédiaire, au maximum de deux,

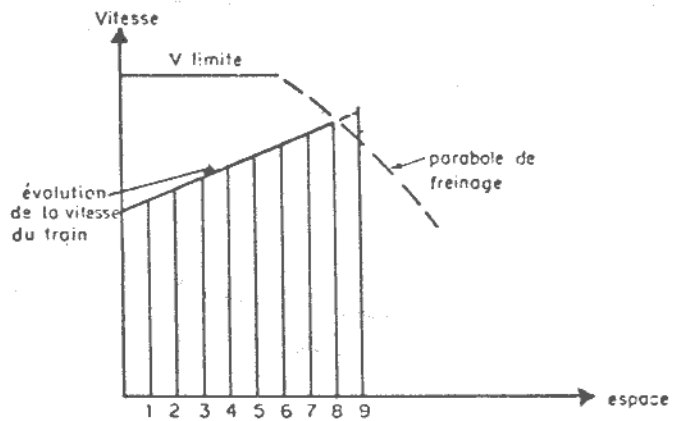


Fig. 5. - Détermination du point de déclenchement du freinage.

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

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.

3.2.3 Rentrée des données

Comme on l'a vu dans les paragraphes précédents, la mise en œuvre 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.

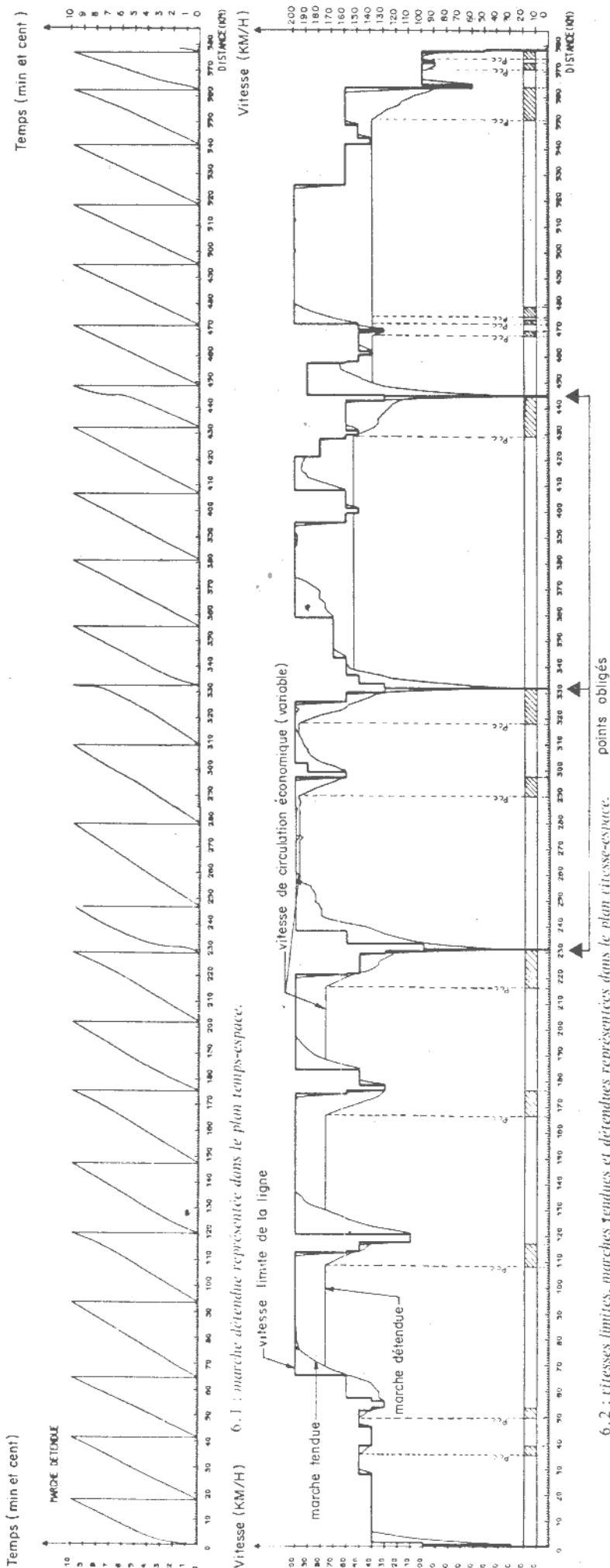
De plus, on doit indiquer les données propres à la marche-type souhaitée (par tronçon ou pour la mission entière), qui sont, selon le cas :

- 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.

3.2.4 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).

⁽¹⁵⁾ Cette marche-type économique $M1$ est caractérisée par une vitesse stabilisée, des vitesses de prise de freinage et de marche sur l'erre qui dépendent directement du gain $G1$ (voir § 2.5)



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.

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;
- compte tenu pour ces deux derniers points, des courbes de rendement des engins de traction.

3.3. Utilisation opérationnelle du programme MARECO

Dès lors que l'algorithme de calcul de marches économiques était établi tant au niveau de l'adaptation des principes généraux aux multiples cas pratiques qu'à celui de la mise en œuvre informatique, il convenait de mettre au point les structures informatiques permettant aux concepteurs d'horaires d'utiliser le programme MARECO de la même manière que le programme HORER. Cette tâche, menée conjointement par les spécialistes des horaires et des applications informatiques, a permis de rendre cet outil opérationnel de manière à ce que, partant de la structure habituelle des données, il soit possible d'obtenir, en sortie, les marches-types de train désirées sous une forme aisément exploitable.

Au-delà de ce mode d'utilisation de l'algorithme MARECO, aujourd'hui opérationnel, il a paru intéressant d'examiner s'il n'était pas envisageable de guider plus finement le mécanicien dans le respect d'une marche économique que par le biais des horaires. La marche économique étant caractérisée par des règles simples pour ce qui est d'une part des démarrages et reprises de vitesse (utilisation de toute la puissance de l'engin de traction) et d'autre part des freinages pour ralentissement ou arrêt (utilisation de l'effort maximal de freinage de service), l'indication au mécanicien de la vitesse de circulation économique et des points de couper-courant pour mise en marche sur l'erre devrait permettre d'atteindre cet objectif. Les modalités pratiques de cette application ainsi que son efficacité font actuellement l'objet de tests poussés.

Fig. 6. - Marche détendue économique Paris-Bordeaux respectant les heures de passage aux points d'arrêt. (marge de régularité 11 %) (consommation 6 887 kWh à la jante).

4. EXEMPLES D'APPLICATION

De manière à mettre en lumière les avantages à attendre de la mise en œuvre de l'outil informatique MARECO deux exemples sont présentés. Le premier montre l'intérêt de cet outil au niveau de la conception des horaires en mettant en lumière l'influence de la répartition de la détente sur l'énergie consommée. Le second se propose, sur un cas particulier, de chiffrer l'intérêt qu'il y aurait à guider le mécanicien dans la mise en œuvre d'une conduite économe en énergie.

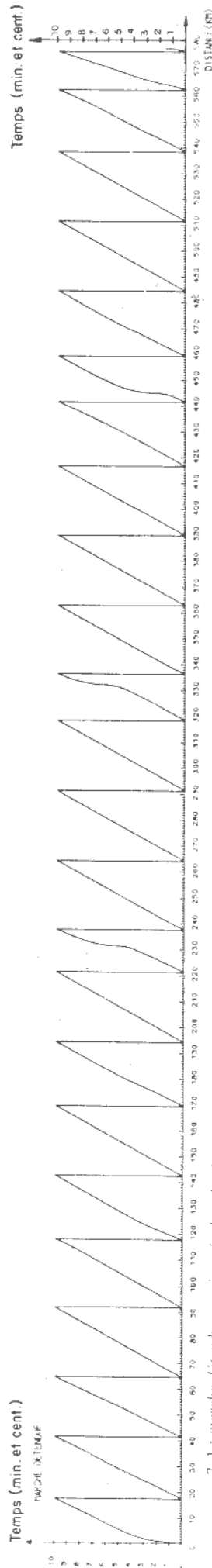
4.1. Application du programme MARECO à l'étude d'horaires sur l'axe Paris-Bordeaux

Le graphique de la figure 6 montre l'application du programme MARECO au train 5 *Étendard* circulant à la vitesse de 200 km/h maximum sur l'itinéraire Paris → Bordeaux avec des arrêts à Saint-Pierre-des-Corps, Poitiers et Angoulême. Pour cette application, ont été imposés comme contraintes 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 %).

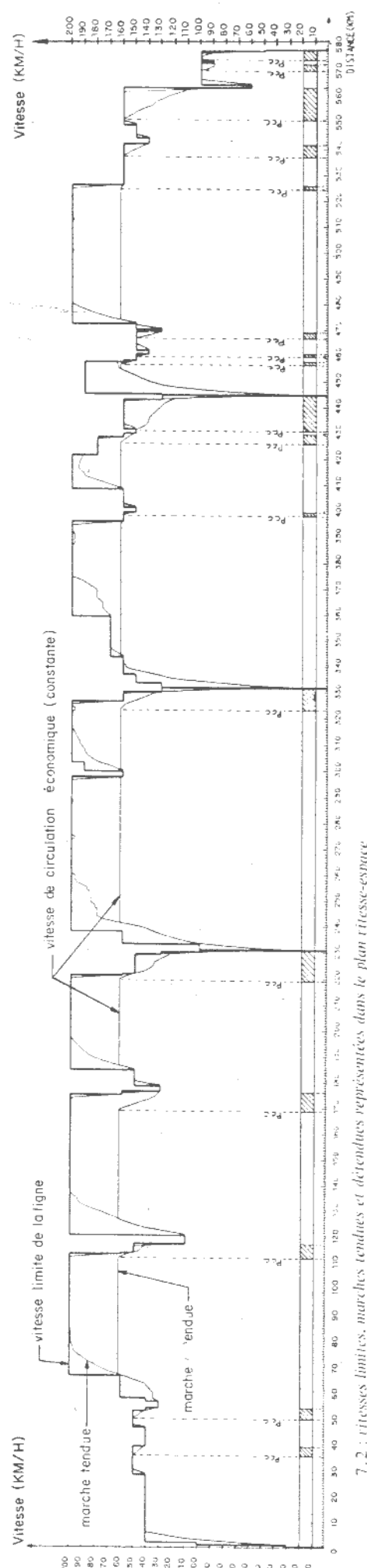
A titre d'exemple, et pour montrer l'intérêt qu'il y a au plan énergétique à limiter les contraintes intermédiaires, la même application a été traitée en laissant libre les temps de parcours intermédiaires. L'examen de la marche tracée à la figure 7 montre que la vitesse stabilisée V_r est alors la même pour tout le trajet (162 km/h). Les arrivées aux gares intermédiaires de Saint-Pierre-des-Corps, Poitiers et Angoulême 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 clair que l'existence de temps de parcours intermédiaires imposés correspond à des préoccupations d'exploitation (marge en fin de parcours pour améliorer les correspondances, inscription des trains dans une batterie). Une autre répartition de ces temps conduit à des difficultés qu'il n'est pas toujours possible de régler.

Fig. 7. — Marche détendue économique Paris-Bordeaux avec modification des heures de passage aux points d'arrêt. (marge de régularité 11 %) (consommation 6754 kWh à la jante).



7.1 : marche détendue représentée dans le plan temps-espace.



7.2 : vitesses limites, marches tendues et détendues représentées dans le plan vitesse-espace

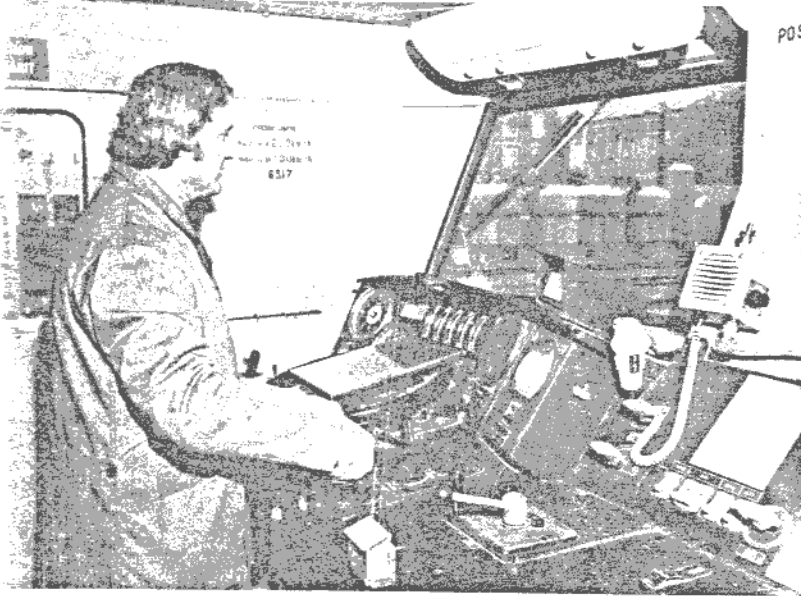


Fig. 8. Un acteur essentiel dans la recherche d'économies d'énergie : le mécanicien à son poste de conduite.

4.2. Sensibilité de la consommation énergétique aux paramètres de la stratégie MARECO

Au plan des phases de traction la stratégie MARECO préconise d'une part d'effectuer démarrages et reprises de vitesse en utilisant toute la puissance de traction autorisée et d'autre part de maintenir une vitesse stabilisée dite économique. Il était dès lors intéressant de montrer la sensibilité de la consommation énergétique au respect de ces deux règles sur un exemple concret.

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'arrêts ou de passage. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que l'introduction de ces contraintes supplémentaires se traduit par une augmentation de l'énergie consommée.

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 (vitesses de circulation stabilisées, points de couper-courant). Une maquette de fiche, qui a reçu le nom de « fiche train 81 », donnant ces informations a été testée sur le terrain. Les premiers essais ont montré que l'efficacité de ces dispositions serait telle qu'elles permettraient un gain d'énergie de plusieurs pour cent, pour un train non perturbé. Ces divers problèmes ainsi que ceux rencontrés pratiquement par les horairistes ayant à utiliser l'outil MARECO sont examinés par des groupes d'études spécialisés.

A cet effet, il est possible de s'intéresser à nouveau au cas de la circulation du train *Étandard*. Pour mettre en lumière l'intérêt qu'il y avait à utiliser toute la puissance de l'engin de traction, une marche MARECO a été calculée en minorant de 20 % les capacités de traction. Il en est résulté une surconsommation de 2 % provenant de la nécessité d'augmenter la vitesse de circulation stabilisée pour compenser les pertes de temps survenant pendant les phases d'accélération.

De la même manière il a été examiné l'influence d'une réduction de 5 km/h de la vitesse économique optimale. Cette réduction a conduit à une augmentation de 1,8 % de la consommation à la jante de par le fait que les marches sur l'erre ont dû être réduites pour compenser le retard dû à la diminution de la vitesse de circulation ⁽¹⁶⁾.

Ces exemples doivent bien évidemment être retenus qualitativement et non quantitativement, les surconsommations résultant du non respect de l'algorithme MARECO pouvant sensiblement varier d'un train à un autre et d'une ligne à une autre. Ils montrent toutefois l'intérêt de guider de manière précise le mécanicien en lui indiquant les vitesses conseillées, tronçon par tronçon, et les divers points de mise en marche sur l'erre.

5. CONCLUSION

Tandis que le programme HORER, conçu pour le calcul des marches tendues de base, ne fournit de marches-types que sous une forme forfaitairement détendue n'assurant pas l'optimum énergétique, l'algorithme MARECO, dans lequel la marge de régularité est matérialisée par l'écrêtement 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.

⁽¹⁶⁾ La même constatation a été faite lors d'études sur les horaires TGV.