

N° d'ordre : 824

50376
1980
36



50376
1980
36

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Spécialité Electronique

par

Daniel PINCHON

**SUR L'OPTIMISATION DU TEMPS DE REPONSE
D'UN SYSTEME DE POSITIONNEMENT
À MOTEUR PAS À PAS**



Soutenue le 6 juin 1980 devant la Commission d'Examen

MM. BECART

Président

SEGUIER

Examinateur

MAIZIERES

Rapporteur

ABIGNOLI

Examinateur

MANESSE

Directeur du Travail

AVANT PROPOS

Ce travail a été effectué dans le laboratoire de Systèmes Electromécaniques du Service d'Electrotechnique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille.

Nous sommes particulièrement sensible à l'honneur que Monsieur Le Professeur BECART, Directeur de l'I.U.T de L'Université des Sciences et Techniques de Lille nous a fait en acceptant de présider le Jury d'examen.

Nous remercions Monsieur Le Professeur MAIZIERES pour l'aide qu'il nous a accordée et l'attention dont il a témoigné pour notre recherche.

Nous voulons exprimer notre profonde gratitude à Monsieur MANESSE qui a assuré la direction de notre travail et qui, par son dynamisme et ses précieux conseils nous a permis d'aboutir à la présentation de ce mémoire.

Nous remercions très vivement Monsieur Le Professeur SEGUIER pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à notre recherche en acceptant de participer à notre jury de thèse.

Nous sommes très touché que Monsieur Le Professeur ABIGNOLI, qui s'étant déjà intéressé à nos travaux, ait bien voulu accepter de venir les juger.

Que Madame DEVAUX, Messieurs HUYGHE, FRANCHULT, HOUZE et MULDERMANS trouvent ici l'expression de ma reconnaissance pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

1 - <u>EQUATION DE FONCTIONNEMENT</u>	1
1.1. Présentation et différents types	1
1.2. Définition et calcul du pas	1
1.3. Phénomène de perte de pas	4
1.4. Variation du couple moteur en fonction du déplacement angulaire	5
1.5. Définition des grandeurs utilisées	8
1.6. Equation du moteur pas à pas	8
1.7. Caractéristiques du moteur	8
1.8. Caractéristiques de la charge entraînée	8
1.9. Valeurs numériques intervenant dans l'équation du moteur	9
2 - <u>SCHEMA DE SIMULATION</u>	10
2.1. Changement d'échelle sur un déplacement θ_1	10
2.2. Changement d'échelle sur le temps	11
2.3. Principe général du schéma de simulation	13
2.4. Générateur de $\sin 2\pi\phi$	14
2.5. Simulation de la non-linéarité correspondant au frottement sec	15
2.6. Conditions initiales	16
2.7. Temps d'évolution de la simulation sur un pas	16
2.8. Mode de fonctionnement des intégrateurs	17
2.9. Détermination de la fréquence de rotation du moteur	23
2.10. Temps de mise en vitesse lors de l'accélération	24
2.11. Conclusion	24
3 - <u>ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DANS LA ZONE DE DEMARRAGE</u>	25
3.1. Résultats numériques obtenus	25
3.2. Utilisation de la méthode des isoclines	26
3.3. Enregistrements	31
3.4. Justification théorique de la limite d'arrêt sur le pas	40
3.5. Considérations sur l'accélération	40
3.6. Conclusion	42
Remarque : relations entre les grandeurs-machine et les grandeurs réelles	43

IV - <u>ETUDE DE LA MISE EN VITESSE DU MOTEUR</u>	45
4.1. Résultats obtenus pour une mise en vitesse donnée	47
4.1.1. Loi de mise en vitesse	47
4.1.2. Résultats	50
4.2. Généralisation de la mise en vitesse	60
4.2.1. Résultats des mesures effectuées	60
4.2.2. Conclusion	69
4.3. Loi linéaire de mise en vitesse optimale pour un parcours donné effectué dans la phase d'accélération	70
4.3.1. Choix de la vitesse initiale	70
4.3.2. Nombre de pas parcourus en un temps donné	70
4.4. Généralisation	76
4.4.1. Lois de mise en vitesse à partir de la valeurs optimale de n_i	76
4.4.2. Choix du régime optimal suivant le nombre de pas à parcourir	78
4.5. Application	82
4.6. Conclusion	85
V - <u>ETUDE DU RALENTISSEMENT DU MOTEUR</u>	86
5.1. Présentation de l'étude	86
5.2. Equation permettant d'observer le ralentissement	87
5.3. Schéma de simulation	88
5.3.1. Principe général	88
5.3.2. Affichage des conditions initiales	89
5.3.3. Dispositif simulant le ralentissement	91
5.4. Relation entre a et le temps t' de ralentissement	92
5.5. Régime sans gain de pas	93
5.6. Définition du facteur de régularité	96
5.6.1. Enregistrements	96
5.6.2. Facteur de régularité	96
5.6.3. Variation du facteur de régularité en fonction de a	100
5.7. Choix du régime de ralentissement	102
5.7.1. Critère utilisé	102
5.7.2. Influence de la vitesse finale	102
5.8. Temps de positionnement pour le parcours envisagé	103
5.9. Cas d'un parcours dissymétrique	105
5.9.1. Définition du parcours	105
5.9.2. Ralentissement et temps de parcours	105
5.10. Conclusion	107

<u>VI - AMELIORATION DE LA COMMANDE OPTIMALE</u>	109
6.1. Lois d'accélération non linéaire	109
6.1.1. Construction de la caractéristique de commande	109
6.1.2. Calcul des coordonnées des différents coudes de la caractéristique	110
6.2. Calcul des temps successifs de franchissement des pas	112
6.2.1. Calcul préliminaire	112
6.2.2. Correction du calcul	114
6.3. Modèle à deux paramètres du moteur pas à pas	115
6.4. Simulation numérique du moteur pas à pas	116
6.5. Accélération linéaire obtenue par la simulation numérique	117
6.6. Accélération non linéaire	118
6.7. Commande par commutation au maximum de la vitesse	123
6.8. Ralentissement	123
6.9. Conclusion	126
<u>CONCLUSION</u>	127
<u>ANNEXE 1</u>	128
<u>ANNEXE 2</u>	132
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	135

Remarque : Sur les enregistrements du chapitre 3, lire $\dot{\theta} = 270 \text{ } \phi$ au lieu de $\dot{\theta} = 261 \text{ } \phi$

INTRODUCTION

Les moteurs pas à pas retrouvent actuellement un regain d'intérêt de la part d'un grand nombre d'utilisateurs. Nous pouvons citer différents champs d'application :

- positionnement et commande numérique de machines-outils, |1| , |I| , |II| ;
- techniques spatiales : prise de vues, mise en place d'antennes et de panneaux de batteries solaires ;
- horlogerie, suite à l'utilisation du cristal de quartz |III| ;
- péri-informatique : entraînement de bandes et de cartes, et d'une façon générale, tout système exigeant des mouvements incrémentaux |IV| ;
- robotique, de par leur possibilité d'utilisation en boucle ouverte |V| |VI| ;

Les moteurs pas à pas se substituent, dans ces différentes applications, aux moteurs de servomécanismes grâce au développement des techniques numériques. De nombreuses recherches sont poursuivies pour améliorer leurs possibilités |VII| . Elles portent notamment sur leur structure, leur alimentation et leur commande. L'étude envisagée ici est orientée sur ce dernier point.

Les performances dynamiques des moteurs pas à pas sont limitées par le fait qu'on ne peut leur imposer une fréquence de rotation quelconque sans risque de perte de pas. En effet, nous devons distinguer, dans le plan vitesse-couple deux zones de fonctionnement |2| , |3| , |4| , |15| :

- la zone de démarrage dans laquelle le moteur peut démarrer, s'arrêter et changer de sens de rotation instantanément sans décrochement.
- la zone d'entraînement où les manoeuvres précitées provoquent une perte de pas.

Dans ces conditions, pour obtenir un point de fonctionnement situé dans la zone d'entraînement, nous allons partir d'une fréquence initiale correspondant à la zone de démarrage et accélérer pour atteindre la vitesse souhaitée. Le problème consiste donc à définir le temps minimal correspondant à cette mise en vitesse.

Puis nous étudions les conditions du retour du point de fonctionnement dans la zone de démarrage en examinant notamment dans quelle mesure l'état défini par la position et la vitesse à la fin de la période d'accélération influence son ralentissement.

Différentes études ont déjà été menées à bien sur la modélisation des moteurs pas à pas, [3], [8], [16], [17], [VIII], [IX], sur leurs performances dynamiques, [15], [VIII], et sur leurs commandes optimales [3], [16], [17], [X]

Notre travail se décompose en six parties principales :

- mise en équation du système et établissement d'un modèle analogique permettant l'étude du franchissement d'un ou de plusieurs pas ;

- exploration de la zone de démarrage ;

- accélération linéaire et mise en évidence d'un régime optimal pour un nombre donné de pas à franchir lors de ce fonctionnement ;

- ralentissement linéaire en tenant compte des conditions initiales (position et vitesse) et définition d'un facteur de régularité afin de supprimer les phénomènes troublés qui apparaissent lors de la décélération ;

- temps nécessaire pour un positionnement donné, en tenant compte des lois linéaires d'accélération et de ralentissement ; possibilité de réduire ce temps par le choix d'un parcours dissymétrique.

- loi non linéaire de mise en vitesse qui conduit à une amélioration du temps de positionnement, particulièrement intéressante si le nombre de pas est élevé.

CHAPITRE 1

EQUATION DE FONCTIONNEMENT

Dans le présent chapitre, nous allons définir les caractéristiques fondamentales des moteurs pas à pas et préciser notamment la définition du pas et les variations du couple délivré en fonction du déplacement du rotor. Nous pourrons à partir de là, écrire l'équation de fonctionnement du moteur pas à pas.

1.1. Présentation et différents types

Il existe deux types principaux de moteur pas à pas [3] [4] :

- Les moteurs à aimant permanent.
- Les moteurs à réluctance variable.

Dans les deux cas, le stator est composé de n_s phases à raison de n_b bobines par phases, ce qui implique N_s dents statoriques, avec $N_s = n_s \times n_b$.

Le rotor est :

- soit un aimant permanent de N_R pôles;
- soit, pour les moteurs à réluctance variable, une pièce dentée en fer doux, à forte perméabilité, et qui comporte N_R dents.

Les bobines du stator sont alimentées, successivement, en courant continu. Le sens de rotation du moteur est lié à la séquence imposée par le dispositif de commutation des phases. La fréquence de déroulement de cette séquence détermine la vitesse de rotation, et le phénomène de perte de pas se produit lorsque cette fréquence dépasse une limite liée au moteur utilisé et à la charge entraînée. Nous allons expliquer ce phénomène en ayant au préalable déterminé le pas du moteur.

1.2. Définition et calcul du pas

Après chaque commutation, le rotor tourne d'un angle p .

appelé pas angulaire [5][6]. Cette grandeur est caractéristique du moteur, bien que certains dispositifs d'excitation des bobines permettent d'obtenir différentes valeurs du pas pour un même moteur [5].

Appelons :

$\theta_s = \frac{2\pi}{N_s}$ la distance géométrique entre deux dents statoriques.

$\theta_R = \frac{2\pi}{N_R}$ la distance géométrique entre deux dents rotoriques.

Au moment de la commutation - la dent statorique n° I a été excitée et la dent rotorique n° 1 est venue se caler sous elle ; la commutation a pour effet d'exciter la dent statorique n° II - deux cas peuvent se présenter comme l'indique la figure 1.1. Le sens de rotation du moteur est lié à la position de la dent rotorique la plus proche de la dent statorique n° II. La valeur maximale du pas est donc égale à $\theta_R/2$, soit

$$P_{\max} = \frac{\pi}{N_R}$$

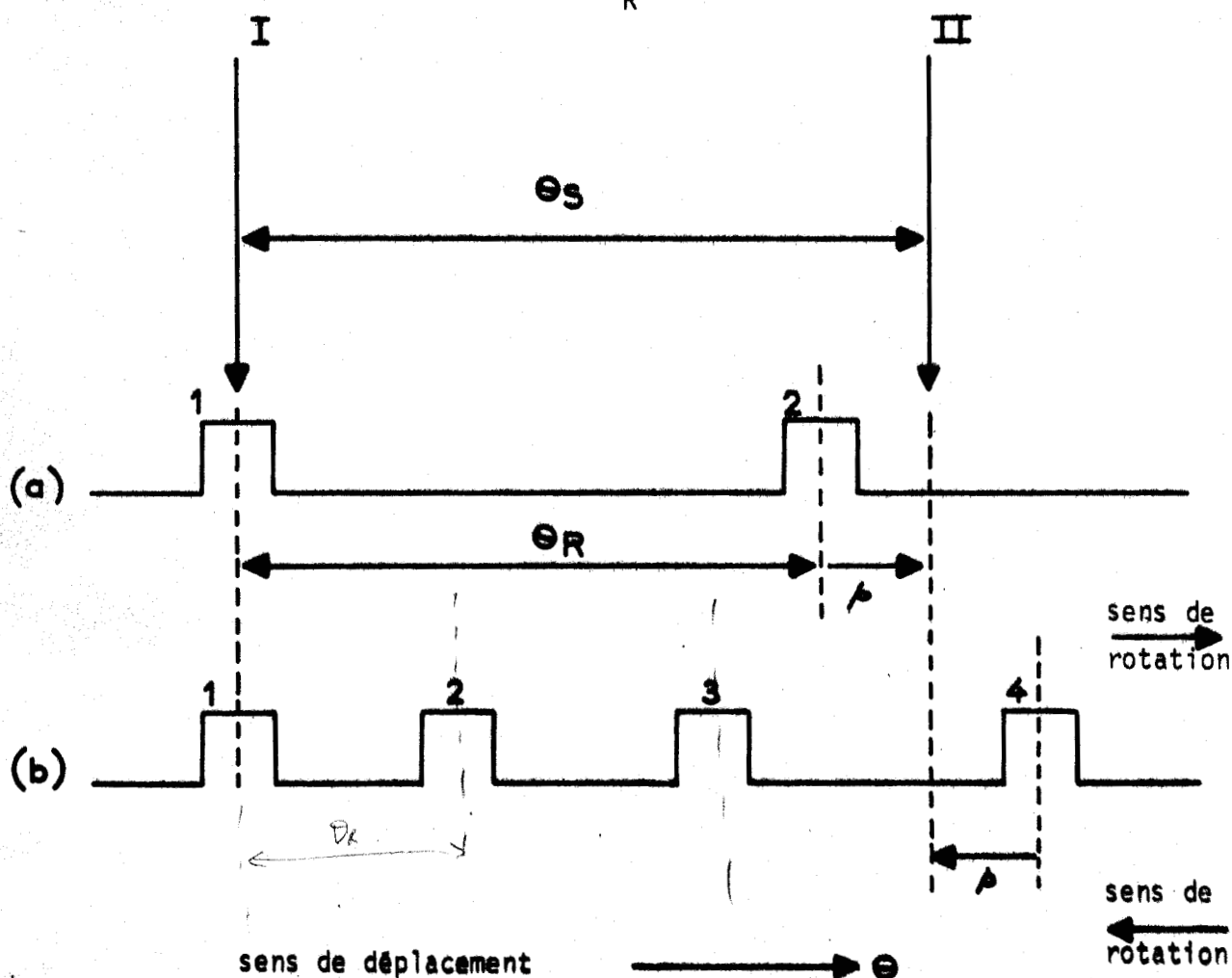


Figure 1.1. Représentation du pas du moteur.

Dans le cas (a) - le sens de rotation est conforme au sens arbitrairement choisi pour le déplacement du rotor -, nous pourrions écrire :

$$\theta_s = n_R \theta_R + p$$

où n_R est le nombre de dents rotoriques comprises entre les deux dents statoriques I et II concernées par la commutation.

La relation précédente peut s'écrire :

$$N_R = n_R N_s + \frac{N_R N_s}{2\pi} p$$

Le reste r de la division de N_R par N_s nous permet donc de calculer le pas

$$p = \frac{2\pi}{N_R N_s} r.$$

Dans le cas (b) - le sens de rotation est contraire au sens arbitrairement choisi - nous écrivons :

$$\theta_s = n_R \theta_R + \theta_R - p$$

Posons :

$$\theta_R - p = \theta'_p$$

La relation précédente devient :

$$N_R = n_R N_s + \frac{N_R N_s}{2\pi} \theta'_p$$

et le pas est donc égal à : $p = \theta_R - \theta'_p$ soit

$$p = \frac{2\pi}{N_R} \left(1 - \frac{r}{N_s}\right)$$

où r représente toujours le reste de la division de N_R par N_s .

Illustrons ce calcul à l'aide de plusieurs exemples [6].

- Exemple n° 1 : moteur S.F.M.I. 20004 dont les caractéristiques sont les suivantes :

$$n_s = 3 \quad n_b = 4 \quad N_s = 12 \quad N_R = 8$$

Donc

$$p_{\max} = 22,5 \text{ et } r = 0.$$

La quantité $\frac{2\pi}{N_R N_s} r$, égale à 30° , est supérieure à p_{\max} .

Le pas du moteur vaut donc $p = \frac{2\pi}{N_R} - \frac{2\pi}{N_R N_s} r$, soit $p = 15^\circ$, le déplacement se faisant dans le sens représenté à la figure 1.1.(b).

- Exemple n° 2 : Considérons le même moteur, mais réduisons de moitié le nombre de bobines par phase.

$$n_s = 3 \quad n_b = 2 \quad N_s = 6 \quad N_R = 8$$

p_{\max} reste égal à $22;5^\circ$; r vaut 2 et p est égal à 15° .

Le pas garde la même valeur, mais le moteur tourne dans le sens contraire.

- Exemple n° 3 : Il s'agit des moteurs qui entraînent le chariot d'une machine [1] destinée à percer automatiquement les circuits imprimés, et dont nous allons étudier le fonctionnement dynamique.

$$N_s = 3 \quad N_R = 4$$

$p_{\max} = 45^\circ$; $r = 1$ et donc $p = 30^\circ$.

Nous allons maintenant examiner l'effet de la commutation sur le déplacement du rotor.

1.3. Phénomène de perte de pas

Après la commutation, la dent rotorique n° 2 s'est calée sous la dent statorique n° II, alors sous tension. Le rotor a donc tourné d'un angle de 30° dans le sens indiqué à la figure 1.2.(b).

Cependant, si la fréquence du générateur commandant la commutation des phases est trop élevée, c'est la dent rotorique n° 3 qui vient se caler sous la dent statorique n° II et le rotor a alors tourné de 60° dans le sens contraire (figure 1.2.(c)). La position recherchée n'est pas atteinte : on dit qu'il y a perte de pas. Notons que, dans le cas présent, il y a perte de deux pas.

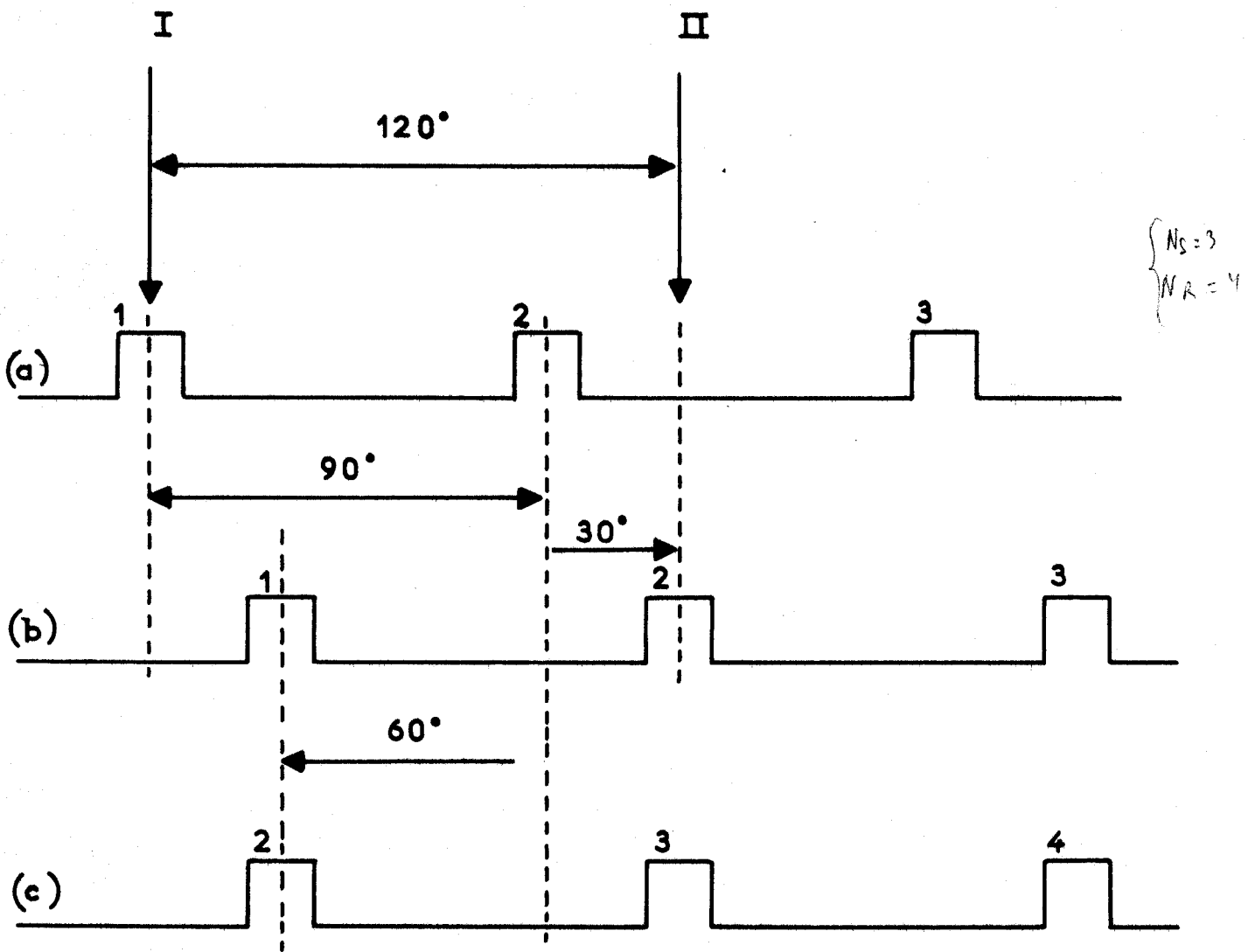


Figure 1.2. : Phénomène de perte de pas.

1.4. Variation du couple moteur en fonction du déplacement angulaire

On admet [7], [8], [9] que le couple moteur C est une fonction sinusoïdale de l'angle d'écart du rotor par rapport à sa position d'équilibre. Avec le sens défini pour θ à la figure 1.1., nous pouvons écrire :

$$C = C_M \sin k \theta$$

La position d'équilibre, définie par l'axe de la dent statorique n° II, correspond à $\theta = 0^\circ$. Dans le cas d'un déplacement normal du rotor, θ part de la valeur -30° pour aboutir à 0° (figure 1.3.) ; s'il y a perte de pas, θ tend vers -90° , cela résume le paragraphe précédent.

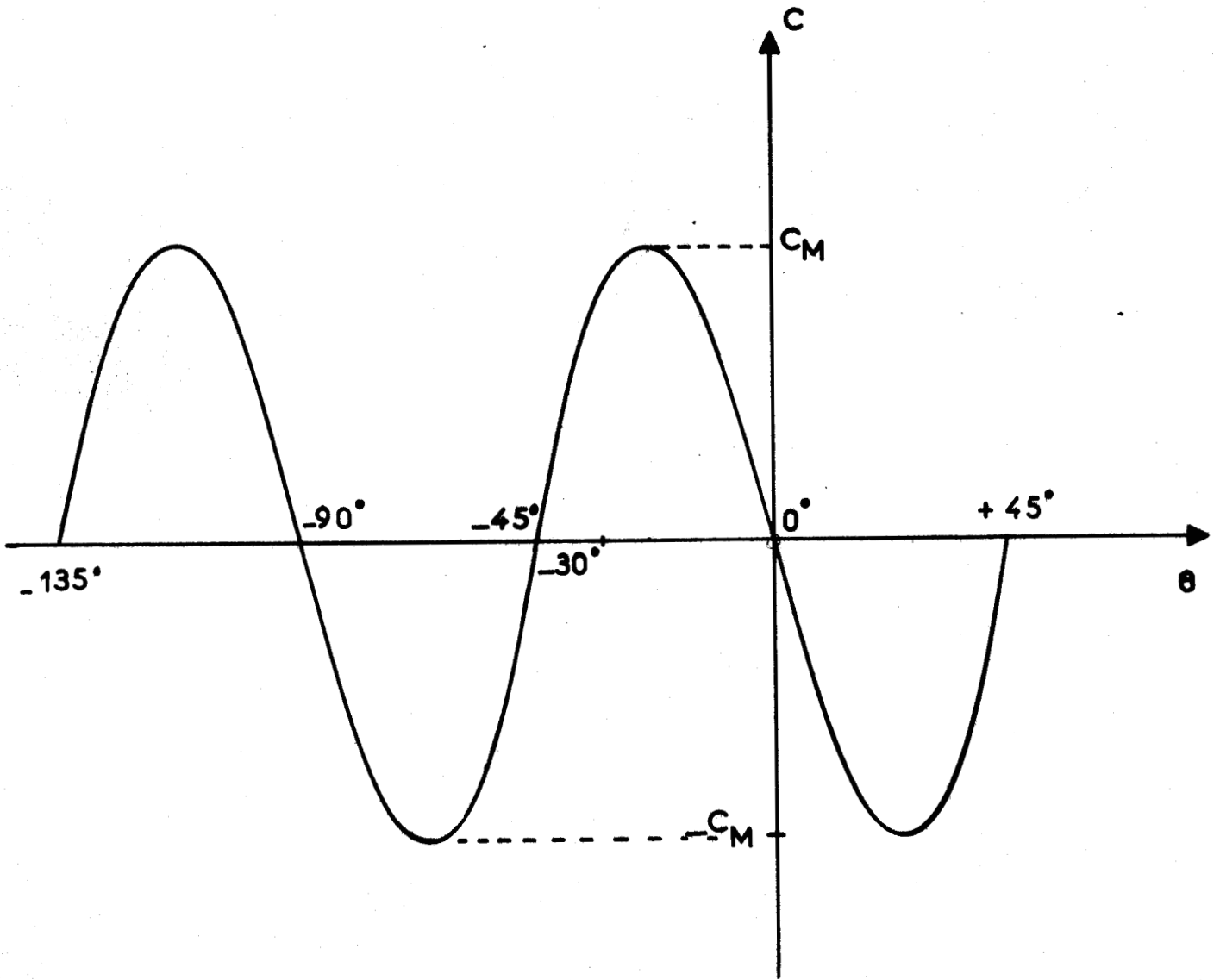


Figure 1.3. : Variation du couple moteur C en fonction du déplacement angulaire θ

C_M est une grandeur qui dépend du courant alimentant les différentes bobines $|8|, |10|$. Nous nous proposons d'étudier le fonctionnement du moteur à courant constant : C_M garde alors une valeur fixe qui peut, par exemple, être déterminée à partir des notices fournies par le constructeur.

D'autre part, le couple C est nul si une dent statorique se trouve au-dessus d'une dent rotorique (position stable) ou au-dessus du milieu de l'intervalle séparant deux dents rotoriques voisines (position instable). La période de la fonction $C(\theta)$ est donc égale à θ_R et, en définitive, nous pouvons écrire, d'après la représentation donnée à la figure 1.3. :

(1.1.)
$$C = - C_M \sin N_R \theta$$

Puisque nous nous proposons de simuler l'équation du moteur sur calculatrice hybride, et, en particulier, celle qui donne le couple en fonction du déplacement angulaire, imposons un changement de variable de façon que la nouvelle grandeur représentant le déplacement varie de façon symétrique autour de la nouvelle origine.

Nous sommes donc amenés à poser :

$$\theta_1 = \theta + \frac{\theta_R}{2}$$

c'est-à-dire, pour le moteur utilisé ($N_R = 4$ et $\theta_R = 90^\circ$)

$$\theta_1 = \theta + 45^\circ$$

et le couple s'écrit :

$$(1.2.) \quad C = C_M \sin 4\theta_1$$

la courbe représentative donnée par la figure 1.4. étant bien symétrique par rapport à l'origine.

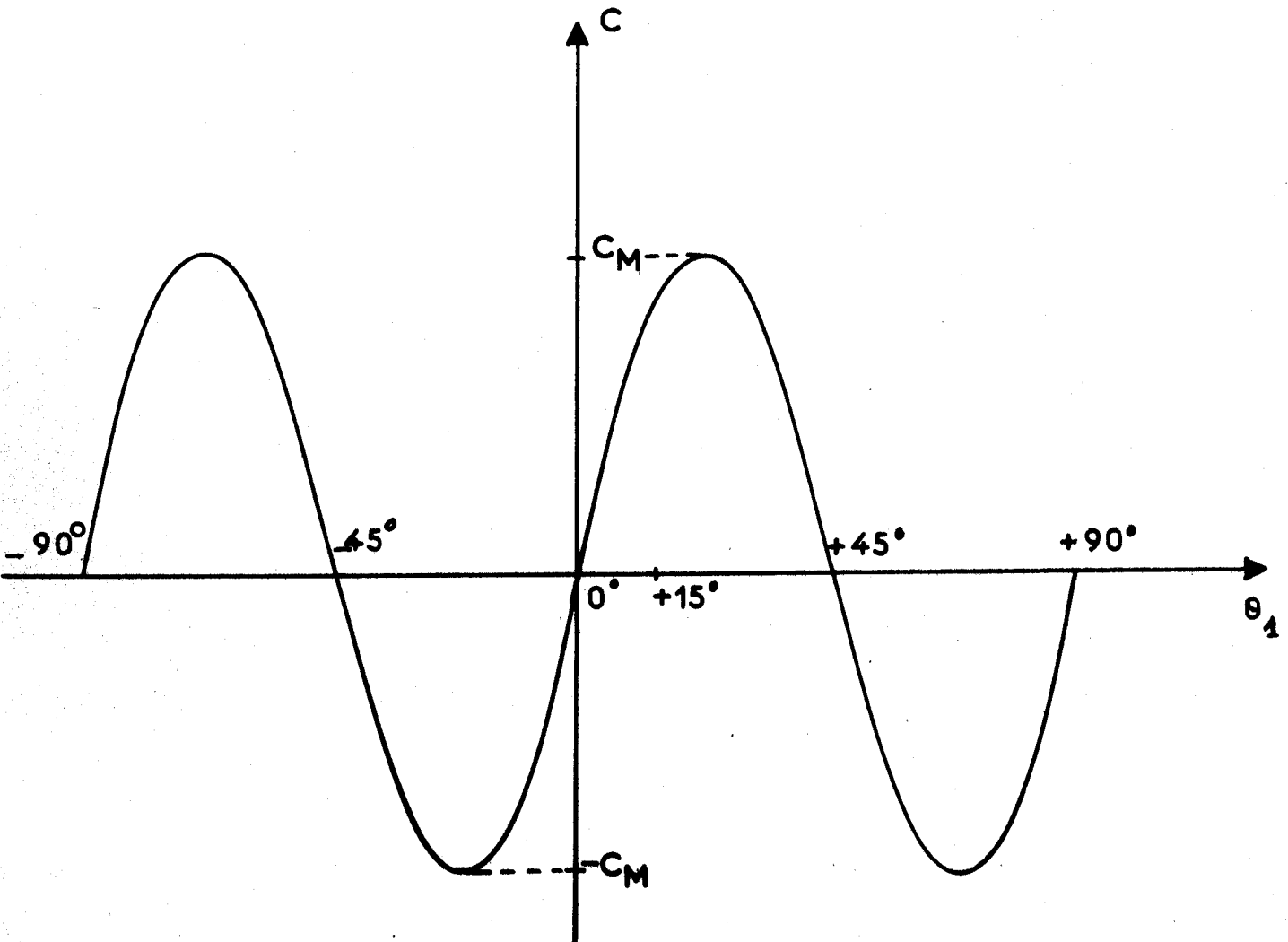


Figure 1.4. : Variation du couple moteur en fonction de la grandeur θ_1 .

Dans ces conditions, le moteur à l'arrêt correspond à $\theta_{1_0} = 15^\circ$; s'il n'y a pas de perte de pas, la valeur finale, c'est-à-dire après commutation vaut $\theta_{1_f} = 45^\circ$; sinon θ_{1_f} prend la valeur $- 45^\circ$.

Nous pouvons déduire de ce qui précède l'équation régissant le fonctionnement du moteur pas à pas.

1.5. Définitions des grandeurs utilisées

On appelle :

- θ le déplacement angulaire.
- N_R le nombre de pôles ou de dents du rotor
- C_M le couple statique
- C_R le couple résistant dû aux frottements secs
- f le coefficient de frottement visqueux
- J l'inertie totale, c'est-à-dire l'inertie J_R du rotor augmentée de l'inertie J_C de la charge.

1.6. Equation du moteur pas à pas

Le fonctionnement du moteur est régi par l'équation différentielle :

$$(1.3.) \quad J \frac{d^2\theta}{dt^2} = C - f \frac{d\theta}{dt} - C_R \operatorname{sgn} \frac{d\theta}{dt}$$

soit, avec le changement de variable imposé ci-dessus :

$$(1.4.) \quad J \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + f \frac{d\theta_1}{dt} + C_R \operatorname{sgn} \frac{d\theta_1}{dt} - C_M \sin N_R \theta_1 = 0$$

1.7. Caractéristiques du moteur

Le moteur que nous utilisons pour entrainer le chariot de la machine à percer automatiquement les circuits imprimés est à aimant permanent. Son pas angulaire est de 30° . Le couple statique vaut $0,38 \text{ N.m}$ et le moment d'inertie du rotor $0,8 \cdot 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$.

1.8. Caractéristiques de la charge entraînée

Le couple résistant dû aux frottements secs vaut $0,072 \text{ N.m}$.

le coefficient de frottement visqueux $1,8 \cdot 10^{-3}$ Nm/rad/s, le moment d'inertie de la charge $2 \cdot 10^{-4}$ Kg.m².

En fait, f représente le coefficient de frottement visqueux global, correspondant à la fois au moteur et à la charge.

1.9. Valeurs numériques intervenant dans l'équation du moteur

$$N_R = 4$$

$$C_M = 0,38 \text{ N.m}$$

$$C_R = 0,072 \text{ N.m}$$

$$f = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ N.m/rad.s}^{-1}$$

$$J = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$$

L'équation (1.4.) qui devient :

$$(1.5.) \quad \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + 6,4 \frac{d\theta_1}{dt} + 257,1 \operatorname{sgn} \frac{d\theta_1}{dt} - 1357,1 \sin 4\theta_1 = 0$$

nous mène directement au schéma de simulation sur calculatrice hybride.

CHAPITRE 2.

SCHEMA DE SIMULATION

A partir de l'équation régissant le fonctionnement du moteur pas à pas, définie dans le chapitre précédent, nous allons pouvoir établir un schéma de câblage pour calculatrice hybride, après avoir effectué les changements de variable nécessaires. Cela nous permettra d'étudier le fonctionnement dynamique du moteur. Il nous faudra pour cela établir la conversion entre le temps de calcul T et le temps réel correspondant à une fréquence n de commutation, exprimée en pas par seconde, et aussi déterminer la relation qui nous permette de calculer le temps réel de mise en vitesse lorsqu'on impose au moteur un régime de n_f pas par seconde, sa vitesse initiale étant fixée à n_0 . Cette dernière étude devra d'ailleurs être reprise lors du ralentissement à partir d'un régime donné, n variant de n_f à n_0 .

2.1. Changement d'échelle sur un déplacement θ_1

La valeur maximale de $|\theta_1|$ est $\theta_R = \frac{2\pi}{N_R}$, ce qui impose la grandeur machine :

$$(2.1.) \quad \phi = \frac{N_R}{2\pi} \theta_1$$

Si le temps de calcul T est lié au temps réel par la relation $T = \lambda t$, cela nous donne :

$$(2.2.) \quad \dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{N_R}{2\pi\lambda} \frac{d\theta}{dt} = \frac{N_R}{2\pi\lambda} \dot{\theta}_1$$

et

$$(2.3.) \quad \ddot{\phi} = \frac{d^2\phi}{dT^2} = \frac{N_R}{2\pi\lambda^2} \frac{d^2\theta_1}{dt^2} = \frac{N_R}{2\pi\lambda^2} \ddot{\theta}_1$$

relations qui peuvent aussi s'écrire :

$$(2.4.) \quad \theta_1 = \frac{2\pi}{N_R} \phi$$

$$(2.5.) \quad \dot{\theta}_1 = \frac{2\pi\lambda}{N_R} \dot{\phi}$$

$$(2.6.) \quad \ddot{\theta}_1 = \frac{2\pi\lambda^2}{N_R} \ddot{\phi}$$

θ_1 , $\dot{\theta}_1$, $\ddot{\theta}_1$ se mesurent respectivement en rad, rad.s^{-1} et rad.s^{-2} ; ϕ est un nombre sans dimensions; $\dot{\phi}$ et $\ddot{\phi}$ s'expriment la première en s^{-1} , la deuxième en s^{-2} .

Les relations précédentes nous permettent de donner les renseignements suivants :

- le pas angulaire $p = \frac{\pi}{6}$ rad se traduit par $\phi_p = 0,333$.
- les conditions initiales $\theta_{10} = \frac{\pi}{12}$ rad et $\dot{\theta}_{10} = 0$ rad/s correspondent à $\phi_0 = 0,167$ et $\dot{\phi}_0 = 0 \text{ s}^{-1}$
- d'après le paragraphe 1.4., suite à la commutation, θ_1 tend $\theta_f = \frac{\pi}{2}$ rad et donc ϕ tend vers $\phi_f = 0,5$ s'il n'y a pas de perte de pas; sinon θ_1 tend vers $\theta_f = -\frac{\pi}{2}$ rad, ce qui correspond à $\phi_f = -0,5$.

L'équation (1.4) à simuler s'écrit alors :

$$(2.7) \quad \frac{2\pi J \lambda^2}{N_R} \ddot{\phi} + \frac{2\pi f \lambda}{N_R} \dot{\phi} + C_R \text{sgn } \dot{\phi} - C_M \sin 2\pi \phi = 0$$

soit :

$$(2.8.) \quad -\ddot{\phi} = -\frac{N_R C_M}{2\pi J \lambda^2} \sin 2\pi \phi + \frac{N_R C_R}{2\pi J \lambda} \text{sgn } \dot{\phi} + \frac{f}{J \lambda} \dot{\phi}$$

2.2. Changement d'échelle sur le temps

L'étude se fera dans le plan de phase (ϕ , $\dot{\phi}$)

Les valeurs absolues des deux variables ϕ et $\dot{\phi}$ ne peuvent dépasser l'unité. Cette condition est déjà satisfaite pour ϕ , étant donnée la définition même de cette grandeur; en outre, nous arrêtons l'étude de l'évolution du système dès que nous détectons la perte de pas.

Quant à $\dot{\phi}$, il est bien évident, à partir de l'équation (2.8), que sa valeur maximale dépend du facteur d'échelle des temps. Nous allons donc choisir λ en supposant :

$$\dot{\phi} = \dot{\phi}_{\max} > 0$$

ce qui entraîne $\text{sgn } \dot{\phi} = +1$ et $\ddot{\phi} = 0$

Ces conditions nous permettent d'écrire :

$$(2.9) \quad 0 = \frac{N_R C_M}{2\pi J \lambda^2} \sin 2\pi \phi + \frac{N_R C_R}{2\pi J \lambda^2} + \frac{f}{J \lambda} \dot{\phi}_{\max}$$

soit en imposant $\dot{\phi}_{\max} = 1$

$$(2.10.) \quad \lambda = \frac{N_R (C_M \sin 2\pi \phi - C_R)}{2\pi f}$$

Comme nous recherchons la valeur optimale de λ , nous donnons à la grandeur $\sin 2\pi \phi$ la valeur + 1, et la relation précédente devient :

$$(2.11) \quad \lambda = \frac{N_R (C_M - C_R)}{2\pi f}$$

L'équation machine correspondante s'écrit :

$$(2.12.) \quad -\ddot{\phi} = -\frac{2\pi f^2 C_M}{N_R J (C_M - C_R)^2} \sin 2\pi \phi + \frac{2\pi f^2 C_R}{N_R J (C_M - C_R)^2} \text{sgn } \dot{\phi} + \frac{2\pi f^2}{N_R J (C_M - C_R)} \dot{\phi}$$

ou encore

$$(2.13.) \quad -\ddot{\phi} = \frac{2\pi f^2}{N_R J (C_M - C_R)} \left[-\frac{C_M}{C_M - C_R} \sin 2\pi \phi + \frac{C_R}{C_M - C_R} \text{sgn } \dot{\phi} + \dot{\phi} \right]$$

Les valeurs données au paragraphe 1.9 nous permettent de calculer le facteur d'échelle des temps égal à $\lambda = 109$.

On peut se contenter de choisir λ égal à 90, ce qui amène la relation :

$$(2.14.) \quad T = 90 t,$$

une seconde réelle correspondant à 1,5mn de calcul.

Nous avons donc diminué λ par rapport à la valeur optimale calculée. Cela ne doit pas entraîner de saturation au niveau de $\dot{\phi}$, ce qui a été vérifié pour les différentes mesures.

D'autre part, la relation (2.9) nous permet d'écrire :

$$\dot{\phi}_{\max} = \frac{N_R (C_M - C_R)}{2\pi f \lambda}$$

Diminuer λ a pour conséquence d'augmenter $\dot{\phi}_{\max}$; or comme $\dot{\phi}_{\max}$ est imposée et égale à $\dot{\phi} + 1$, cela revient à améliorer la précision sur $\dot{\phi}$.

Avec les valeurs explicitées au paragraphe 1.9, l'équation (2.8) s'écrit :

$$(2.15) : - \ddot{\phi} = - 0,107 \sin 2\pi\phi + 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi} + 0,0714 \dot{\phi}$$

Cette équation appelée équation-machine, nous mène directement au schéma de câblage.

2.3. Principe général du schéma de simulation

L'équation (2.15) s'écrivant :

$$- \ddot{\phi} = - 0,107 \sin 2\pi\phi - 0,1 (- 0,202 \operatorname{sgn} \dot{\phi} - 0,714 \dot{\phi})$$

conduit au schéma de principe général de la simulation du fonctionnement dynamique du moteur pas à pas, représenté à la figure 2.1.

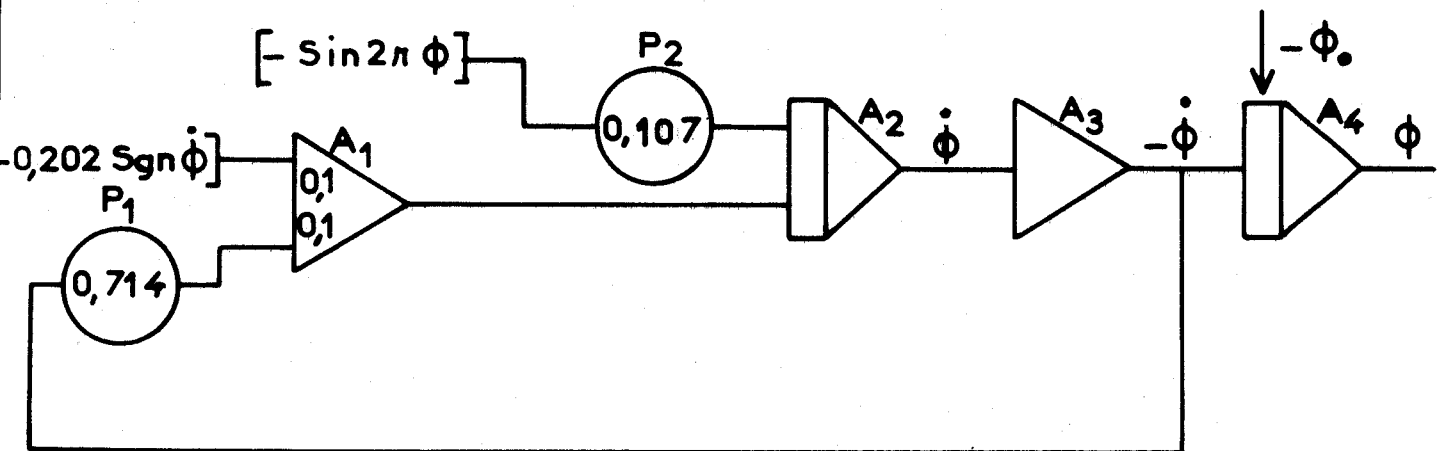


Figure 2.1. Principe général du schéma de simulation

2.4. Générateur de $\sin 2\pi\phi$

Nous élaborons les signaux $y = \sin 1000 t$ et $x = \frac{1000 t}{2\pi} - 1$ en mode répétitif rapide (figure 2.2.). La sortie a_1 du comparateur C_1 change de valeur lorsque la quantité $\phi + x$ devient nulle, ce qui entraîne :

$$\phi = -x$$

soit $1000 t = 2\pi - 2\pi\phi$

et $y = -\sin 2\pi\phi$

Par conséquent les signaux a_1 et \bar{a}_1 vont commander l'échantillonneur-bloqueur formé au moyen des deux amplificateurs A_{10} et A_{11} .

Le mode répétitif rapide permettant d'élaborer x et y sera réglé de façon que $\sin 2\pi\phi$ évolue sur deux périodes pour être conforme à la courbe de couple représentée à la figure 1.4.

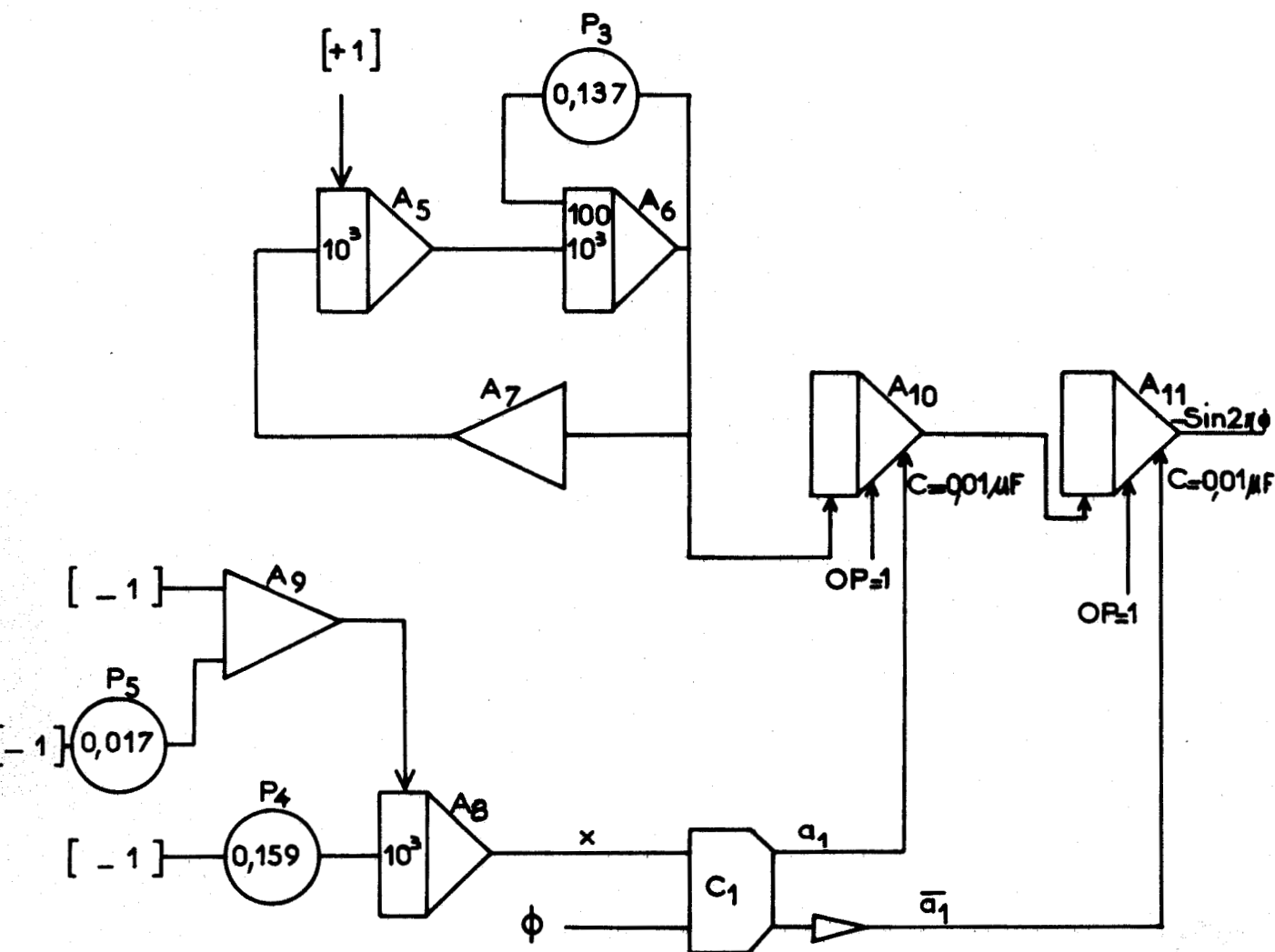


Figure 2.2.

Génération de $\sin 2\pi\phi$

Nous constatons que l'amplitude de y est supérieure à l'unité ; d'où la présence du potentiomètre P_3 que l'on règle pour amortir les sinusoïdes : y varie entre -1 et $+1$ si on affiche P_3 à la valeur $0,137$. D'autre part, pour que l'on possède bien la grandeur $-\sin 2\pi\phi$ à la sortie de A_{11} , il faut introduire en "conditions initiales" de A_8 , non pas $[+ 1]$ mais $[+ 1 + \varepsilon]$. Le potentiomètre P_5 qui fixe ε est affiché à la valeur $0,017$.

Et, enfin, il est bien évident que ϕ devra évoluer très lentement par rapport à x et à y .

2.5. Simulation de la non-linéarité correspondant au frottement sec

La fonction $-0,202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}$ est réalisée au moyen de l'amplificateur A_{12} et d'un interrupteur électronique commandé par le signal logique \bar{a}_2 issu du comparateur C_2 qui détecte le passage par zéro de la variable $\dot{\phi}$ (figure 2.3).

En effet, lorsque $\dot{\phi}$ est positive, \bar{a}_2 prend la valeur 1 ; l'interrupteur étant fermé, la grandeur de sortie de A_{12} vaut : $-(0,404 - 0,202) = -0,202 = -0,202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}$

Si $\dot{\phi}$ est négative, \bar{a}_2 prend la valeur 0 ; l'interrupteur étant ouvert, la grandeur de sortie de A_{12} vaut : $-(-0,202) = 0,202 = -0,202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}$

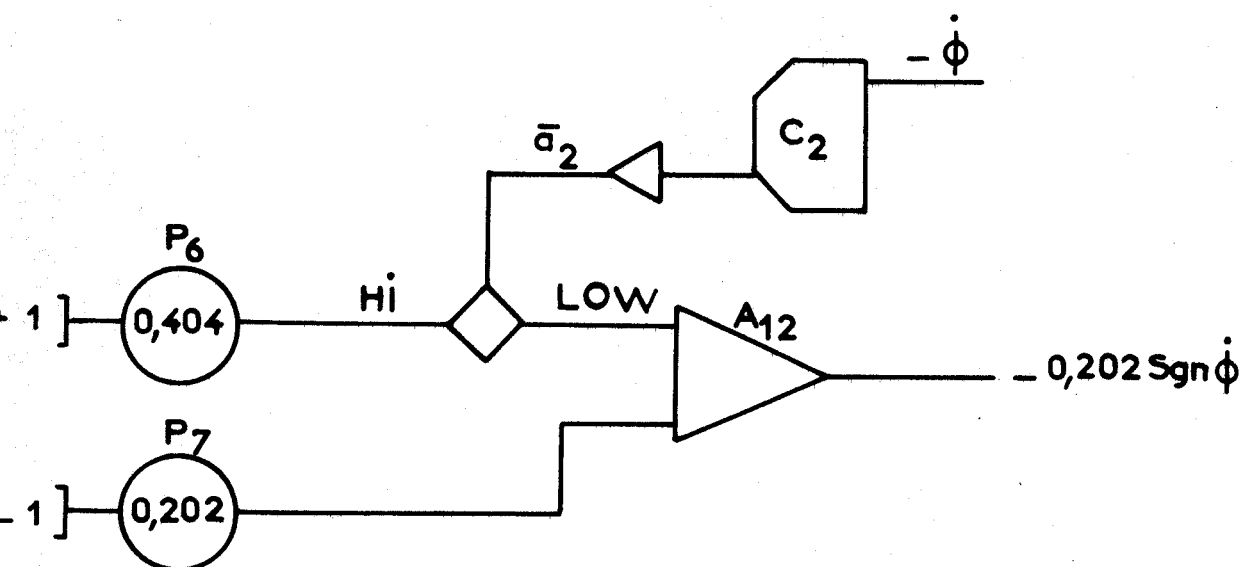


Figure 2.3. Simulation du frottement sec

2.6. Conditions initiales

Nous pouvons nous contenter de l'étude sur un seul pas si nous prenons soin, au moment de la commutation, de retrancher à la valeur atteinte par ϕ la quantité $\phi_p = 0,333$, ϕ gardant sa propre valeur. Cela explique l'utilisation de l'amplificateur A_{13} (figure 2.4) monté en suiveur : nous retrouvons, en condition initiale de A_4 , la quantité $-(\phi - 0,333)$. Cependant au début de l'étude, c'est à dire avant la première commutation, ϕ doit être égal à $\phi_0 = 0,167$; il est nécessaire d'imposer alors en condition initiale de A_{13} la quantité α telle que $-(\alpha - 0,333)$ soit égale à $-0,167$ soit $\alpha = 0,5$, valeur correspondant au potentiomètre P_9 . Cela est réalisé au moyen d'un interrupteur.

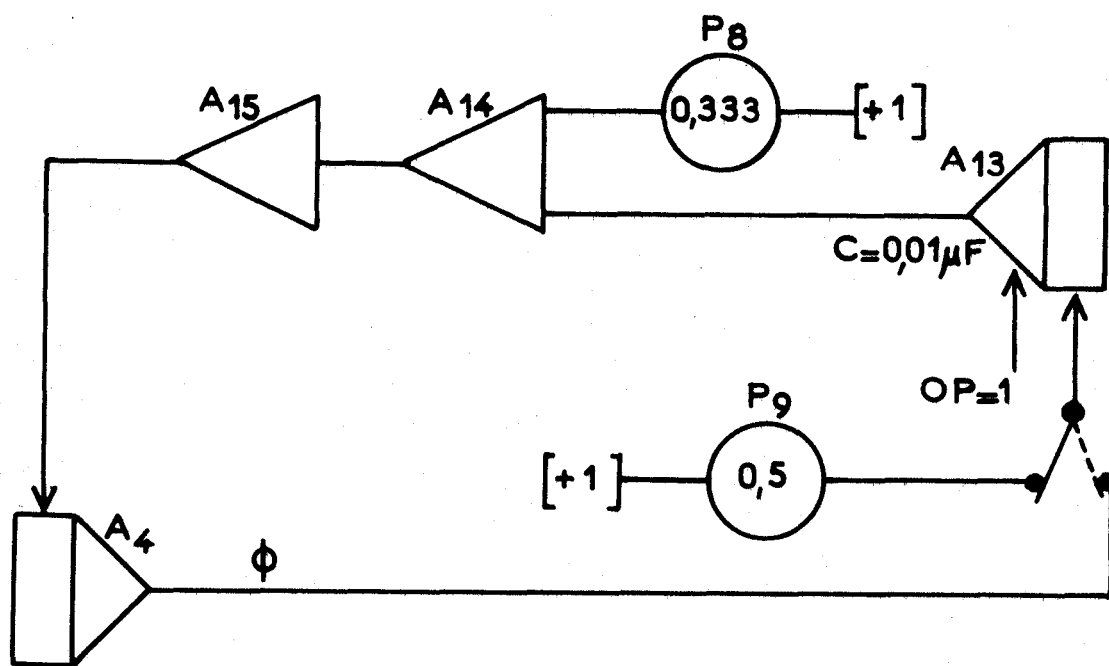


Figure 2.4. Introduction des conditions initiales

2.7. Temps d'évolution de la simulation sur un pas

Un comparateur C_3 détecte le passage par zéro du signal carré issu du générateur dont la fréquence est liée à n , exprimée en pas par seconde. Il délivre un signal \bar{a}_3 dont le front haut correspond au temps de travail T_1 , c'est à dire au temps pendant lequel le système évolue.

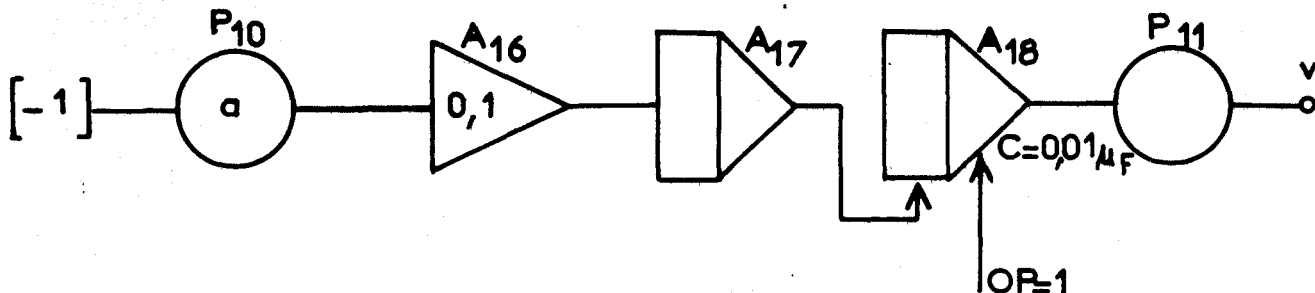


Figure 2.5. Dispositif simulant la mise en vitesse

Si T_1 est fixe, nous détectons la perte de pas à fréquence constante. Cette étude permet de déterminer les limites des zones de démarrage et d'entraînement pour une charge donnée.

Si T_1 diminue avec le temps, nous procédons alors à la mise en vitesse du moteur. Nous utilisons un générateur wobulé par la tension v issue du montage représenté à la figure 2.5. Les potentiomètres P_{10} et P_{11} servent à régler respectivement la vitesse de wobulation et la fréquence maximale des impulsions imposées au moteur et liée à n_f , n_0 étant fixée par le générateur. Les amplificateurs A_{17} et A_{18} doivent bloquer la rampe en dehors du temps de travail T_1 . Cela correspond au chronogramme de la figure 2.6.

2.8. Mode de fonctionnement des intégrateurs

Il s'agit des intégrateurs autres que A_5 , A_6 et A_8 commandés en mode répétitif rapide.

Nous commandons le début de l'étude par un interrupteur correspondant au signal logique \bar{S}_1 , c'est à dire qu'il ne pourra y avoir évolution du problème tant que S_1 restera égal à 1.

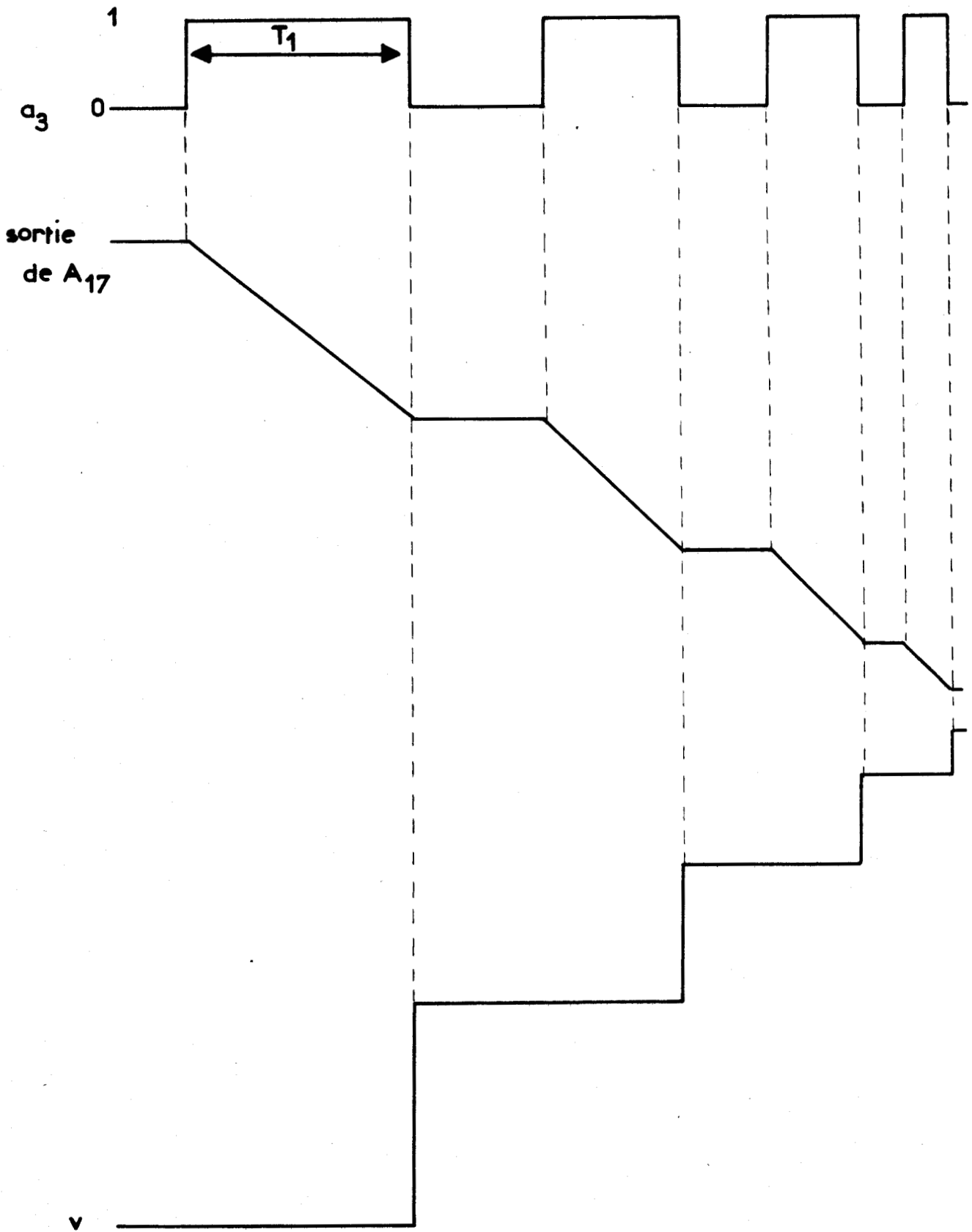


Figure 2.6. : Chronogramme correspondant à la mise en vitesse



Examinons les différents cas possibles :

. $\bar{S}_1 = 0$

Quelle que soit la valeur de \bar{a}_3 , tous les intégrateurs sont en position "condition initiale". En particulier, la condition initiale de A_{13} est fixée à 0,5.

. $\bar{S}_1 = 1$ et $\bar{a}_3 = 0$

La condition initiale de A_{13} est fixée définitivement à ϕ au moyen de l'interrupteur (figure 2.4).

Le système ne doit pas évoluer car $\bar{a}_3 = 0$ correspond au front bas du signal \bar{a}_3 .

A_4 est en position "condition initiale" pour que l'on puisse retrancher la quantité $\phi_p = 0,333$ à la valeur atteinte au moment de la commutation. Il en est de même pour A_{18} qui doit prendre, en condition initiale, la grandeur de sortie de A_{17} .

Tous les autres intégrateurs, à savoir A_2 , A_{13} , et A_{17} sont en position "gel", car les variables de sortie correspondantes doivent garder leurs valeurs atteintes à la fin de l'évolution du système.

. $\bar{S}_1 = 1$ $\bar{a}_3 = 1$

Le système évolue pendant le temps T_1

A_2 , A_4 et $A_{16,17}$ sont en position "calcul".

A_{13} est en position "condition initiale" pour suivre l'évolution de ϕ .

A_{18} est en position "gel" pour garder, pendant le temps T_1 , la valeur atteinte précédemment.

Cela donne le chronogramme de la figure 2.7. et la table de vérité suivante :

		A_2		A_4		A_{13}		A_{17}		A_{18}	
S_1	\bar{a}_3	OP	R	OP	R	OP	R	OP	R	OP	R
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1

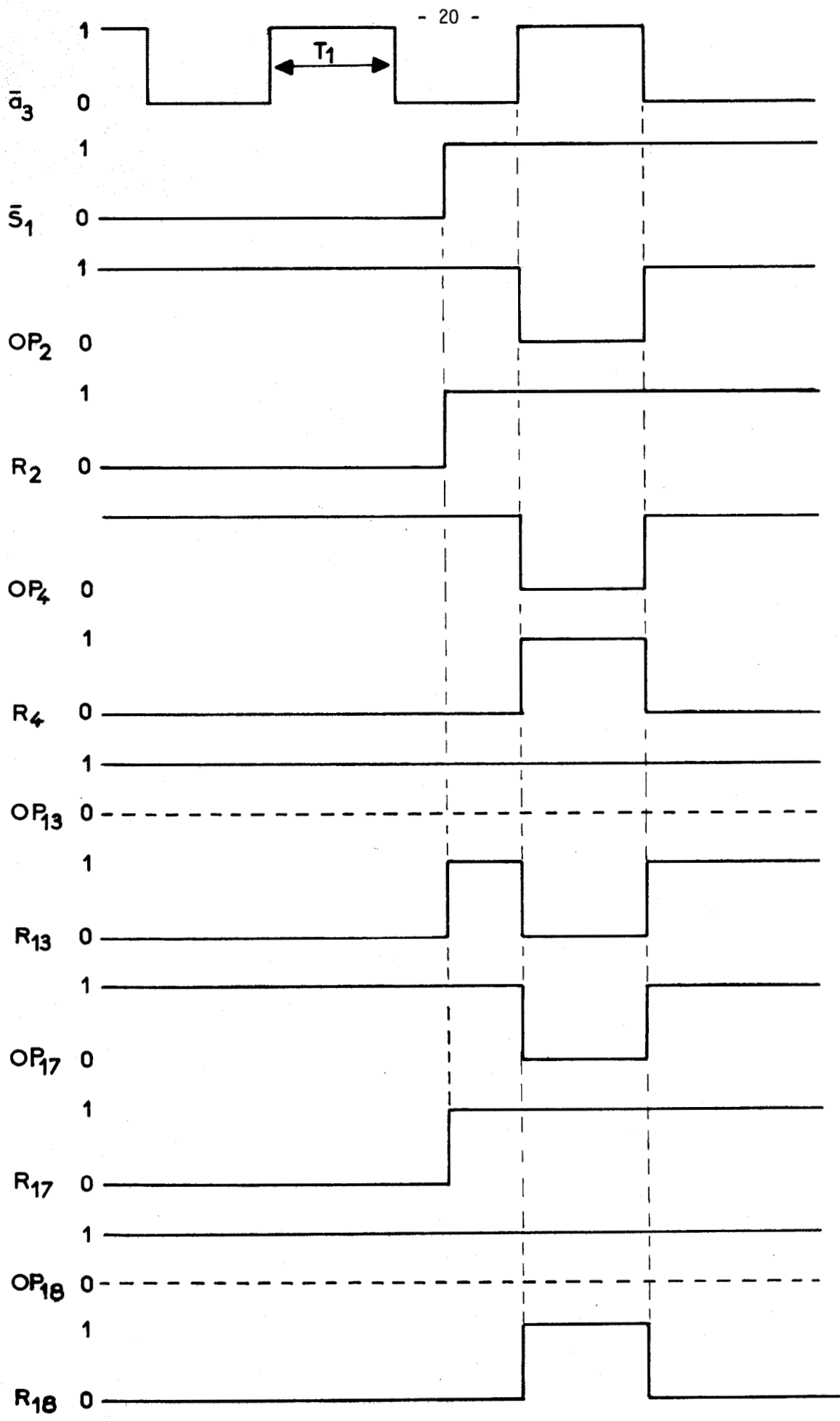


Figure 2.7. Commande logique des intégrateurs



Nous en déduisons les équations logiques régissant le fonctionnement des intégrateurs :

$$OP_2 = OP_4 = OP_{17} = \overline{a_3 \bar{S}_1}$$

$$OP_{13} = OP_{18} = 1$$

$$R_2 = R_{17} = \bar{S}_1$$

$$R_4 = R_{18} = \bar{a}_3 \bar{S}_1$$

$$R_{13} = a_3 \bar{S}_1$$

Ces relations correspondent au montage de la figure 2.8.

La lampe L_1 joue le rôle de voyant-témoin : si elle est allumée, il y a évolution du problème. Si nous voulons changer les conditions de fonctionnement du moteur, nous devons effectuer les manoeuvres correspondantes (passage de $\bar{S}_1 = 0$ à $\bar{S}_1 = 1$; inversion de l'interrupteur qui fixe les conditions initiales de A_{13} pendant qu'elle est éteinte.)

Le schéma complet correspond à la figure 2.9. et aux listings donnés en annexe.

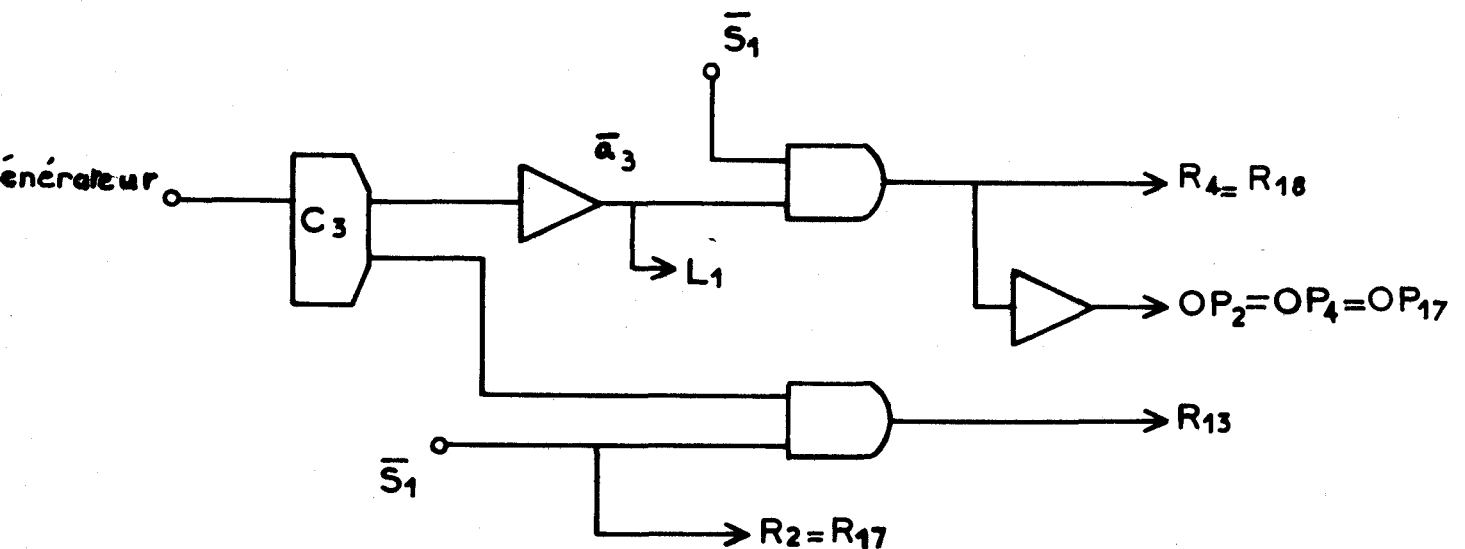


Figure 2.8 : Dispositif permettant la commande logique des intégrateurs.

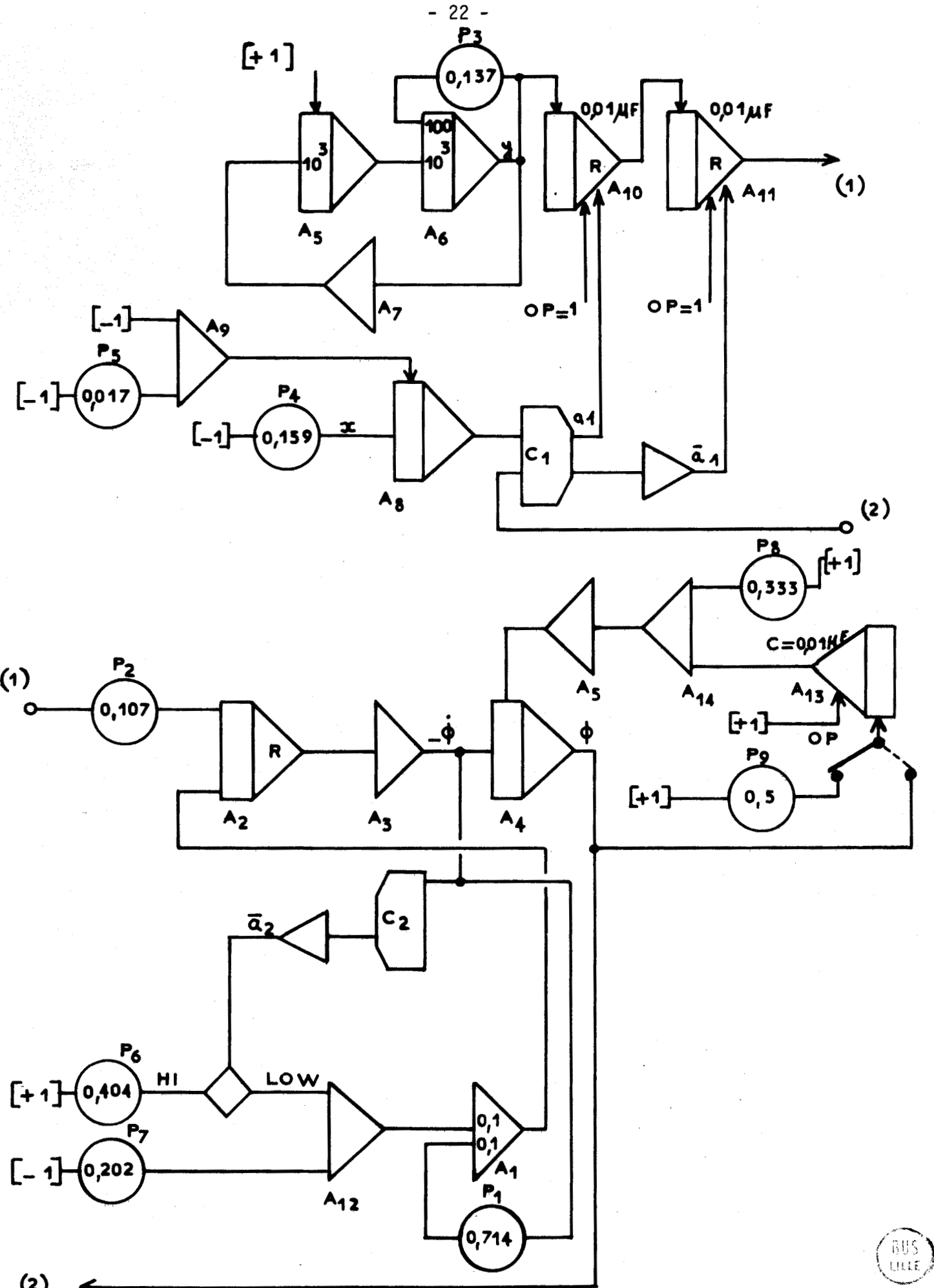


Figure 2.9. Schéma complet de simulation (sans les dispositifs de mise en vitesse et de commande logique des intégrateurs)



2.9. Détermination de la fréquence de rotation du moteur

Un fréquencesmètre nous permet de mesurer T_1 correspondant à l'intervalle de temps t_1 séparant deux commutations successives, t_1 et T_1 étant liés par la relation (2.14) définissant le changement d'échelle des temps :

$$T_1 = 90 t_1$$

Le nombre de pas effectués en une seconde, c'est à dire la fréquence de rotation est :

$$n = \frac{1}{t_1}$$

soit :

$$(2.16) \quad n = \frac{90}{T_1}$$

2.10. Temps de mise en vitesse lors de l'accélération

Le moteur doit atteindre une fréquence n_f située dans la zone d'entraînement ; n_f est déterminée par le temps T_1 lu au fréquencesmètre à partir de la relation (2.16). Nous affichons le potentiomètre P_{11} (figure 2.5) à une valeur b telle que, lors de l'évolution du système ($\bar{S}_1=1$; $\bar{a}_3 = 1$) quand les amplificateurs A_{17} et A_{18} arrivent à saturation, le temps T_1 corresponde alors à la fréquence n_f souhaitée. Ainsi, la tension v ne variant plus, T_1 reste fixe et la fréquence de rotation du moteur garde la valeur constante n_f .

Le schéma de la figure 2.5. nous permet d'écrire :

$$0,1 \text{ a } T = 1,281$$

car la tension de sortie de l'amplificateur A_{18} lorsqu'il est saturé est de 12,81 volts.

Cela nous donne :

$$0,1 \text{ a } \times 90t = 1,281$$

soit :

$$t = \frac{1,281}{0,1a \times 90}$$

ou encore

$$(2.17) \quad t = \frac{0,142}{a}$$

En particulier, si on prend la valeur maximale a_{\max} qui autorise une accélération de n_i à n_f sans perte de pas, le temps t_m de mise en vitesse est alors :

$$(2.18) \quad t_m = \frac{0,142}{a_{\max}}$$

2.11. Conclusion

Le schéma de simulation de la figure 2.9 et les relations (2.16) et (2.17) vont nous permettre d'étudier le fonctionnement du moteur :

- dans sa zone de démarrage,
- lors d'une accélération linéaire, la fréquence de rotation passant d'une valeur n_i à une valeur n_f , n_i et n_f correspondant respectivement à des points de la zone de démarrage et d'entraînement,
- lors du ralentissement successif à cette mise en vitesse, la fréquence de rotation variant de n_f à n'_f , située également dans la zone de démarrage.

CHAPITRE III

ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU MOTEUR

DANS LA ZONE DE DEMARRAGE

Dans cette étude, la fréquence des impulsions est fixe, donc T_1 garde une valeur constante. Le comportement du moteur dans la zone de démarrage est d'abord illustré par divers enregistrements relevés sur le modèle de simulation. Les résultats obtenus sont ensuite retrouvés en utilisant la méthode du plan de phase. [11]

3.1. Résultats numériques obtenus

Pour les caractéristiques du moteur et de la charge définies au paragraphe 1.9., la moteur peut démarrer brutalement tant que T_1 reste supérieur à 1,92s, ce qui correspond à n inférieure à 46 pas par seconde.

Dans cette zone de démarrage, on peut fixer la limite d'arrêt sur le pas : elle correspond à $T_1 = 12,7s$ et donc à $n = 7$ pas par seconde. Si la fréquence des impulsions est inférieure à cette valeur, θ tend vers 0° ($\theta_1 = 45^\circ$) et la vitesse $\dot{\theta}$ est alors nulle au moment de la commutation.

Si n est comprise entre 7 et 46 pas par seconde, θ tend encore vers 0° , mais la vitesse n'est plus nulle au moment de la commutation.

Si n est supérieure à 46 pas par seconde, θ tend vers -90° ($\theta_1 = -45^\circ$) et il y a perte de pas.

3.2. Utilisation de la méthode des isoclines

La méthode des isoclines permet de tracer la courbe représentant la trajectoire de phase dans le plan $(\phi, \dot{\phi})$

Les équations régissant le fonctionnement du moteur s'écrivent :

$$(3.1.) \quad \frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi}$$

$$(3.2.) \quad \frac{d\dot{\phi}}{dt} = 0,107 \sin 2\pi\phi - 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi} - 0,0714 \dot{\phi}$$

L'isocline relative à la pente m des trajectoires de phase est définie par :

$$(3.3.) \quad m = \frac{d\dot{\phi}}{d\phi} = \frac{0,107 \sin 2\pi\phi - 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}}{\dot{\phi}} - 0,0714$$

Son équation est donc :

$$(3.4.) \quad \dot{\phi} = \frac{0,107 \sin 2\pi\phi - 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}}{m + 0,0714}$$

Deux cas sont à considérer :

a) $\dot{\phi}$ est positive :

L'équation de l'isocline correspondant à la pente m est :

$$(3.5.) \quad \phi_1 = \frac{0,107 \sin 2\pi\phi - 0,0202}{m + 0,0714}$$

b) $\dot{\phi}$ est négative :

L'équation précédente devient :

$$(3.6.) \quad \phi_2 = \frac{0,107 \sin 2\pi\phi + 0,0202}{m + 0,0714}$$

Les isoclines ont été tracées pour différentes valeurs simples de m à l'aide d'un calculateur numérique et sont représentées à la figure 3.1. Leurs formes amènent certaines remarques que nous récapitulons dans le tableau I.

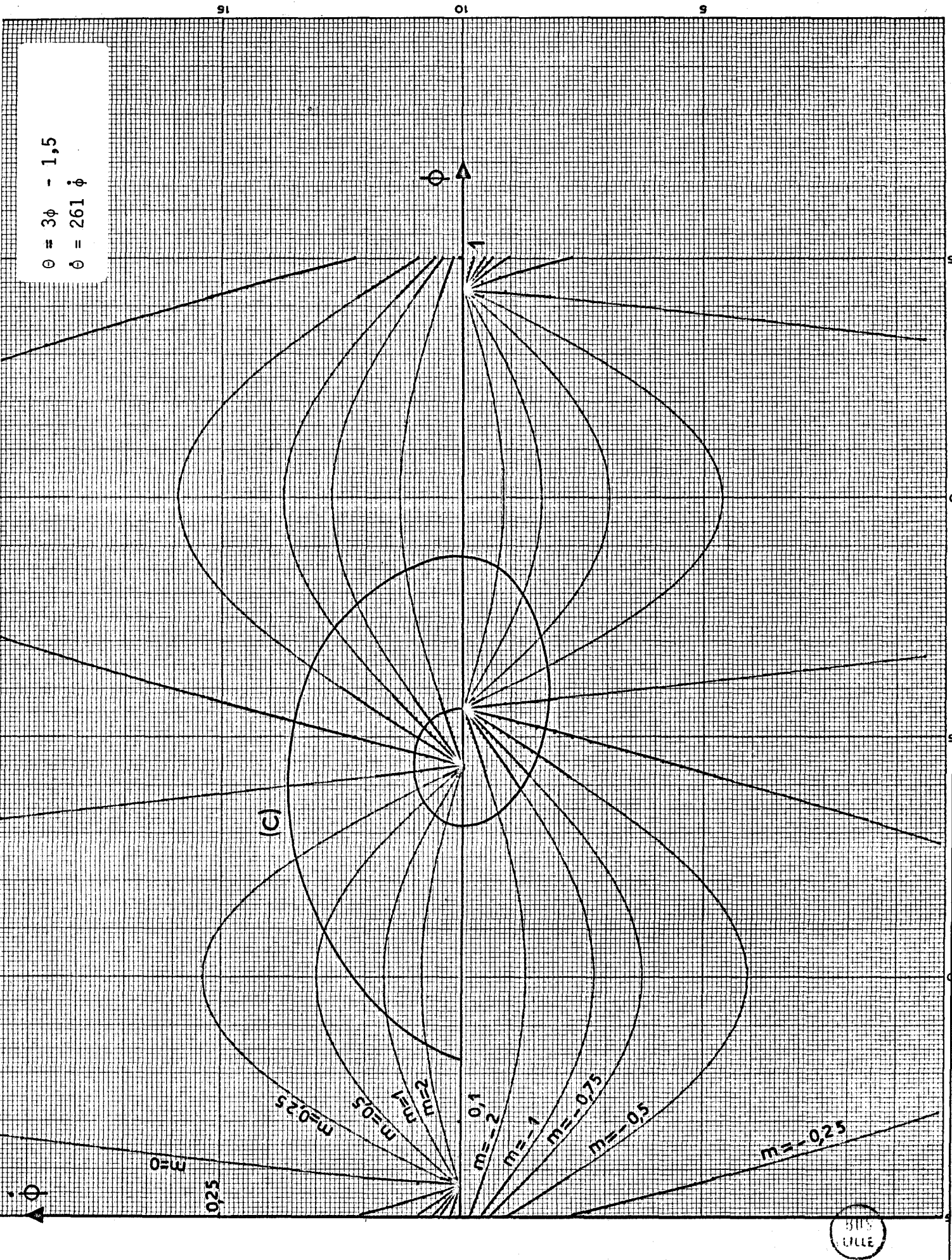


Figure 3.1. : Tracé des isoclines

Intervalle de variation de ϕ	m > 0		m < 0		Valeur prise en compte	Signe de $\dot{\phi}_1$	Signe de $\dot{\phi}_2$	Signe de $\dot{\phi}_1$	Signe de $\dot{\phi}_2$	Valeur prise en compte
	Variation de $0,107 \sin 2\pi\phi$	Signe de $\dot{\phi}_1$	Signe de $\dot{\phi}_2$	Signe de $\dot{\phi}_1$						
$0 < \phi < 0,03$	$0 < 0,107 \sin 2\pi\phi < 0,0202$	-	+	-	aucune	+	-	+	-	$\dot{\phi}_1$ et $\dot{\phi}_2$
$0,03 < \phi < 0,47$	$0,107 \sin 2\pi\phi > 0,0202$	+	+	+	$\dot{\phi}_1$	+	+	-	-	$\dot{\phi}_2$
$0,47 < \phi < 0,5$	$0 < 0,107 \sin 2\pi\phi < 0,0202$	-	+	+	aucune	+	-	+	-	$\dot{\phi}_1$ et $\dot{\phi}_2$
$0,5 < \phi < 0,53$	$-0,0202 < 0,107 \sin 2\pi\phi < 0$	-	+	+	aucune	+	+	+	-	$\dot{\phi}_1$ et $\dot{\phi}_2$
$0,53 < \phi < 0,97$	$0,107 \sin 2\pi\phi < -0,0202$	-	-	-	$\dot{\phi}_2$	+	-	+	+	$\dot{\phi}_1$
$0,97 < \phi < 1$	$-0,0202 < 0,107 \sin 2\pi\phi < 0$	-	+	+	aucune	+	+	+	-	$\dot{\phi}_1$ et $\dot{\phi}_2$

Tableau I



Nous avons deux cas à distinguer :

. $m > - 0,0714$, c'est à dire en fait m positive, étant données les différentes valeurs choisies pour m .

. $m < - 0,0714$, soit $m < 0$

Appelons ϕ_A la valeur de ϕ déterminée par la relation

$$0,107 \sin 2\pi\phi_A = 0,0202$$

soit $2\pi\phi_A = 0,19$ ou $2,95$

c'est à dire $\phi_A = 0,03$ ou $0,47$

Comme nous le remarquons sur la figure 3.1., il existe des intervalles où aucun point ne correspond ni à $\dot{\phi}_1$, ni à $\dot{\phi}_2$, et des intervalles où $\dot{\phi}_1$ et $\dot{\phi}_2$ ont des valeurs compatibles avec les équations (3.5) et (3.6) simultanément.

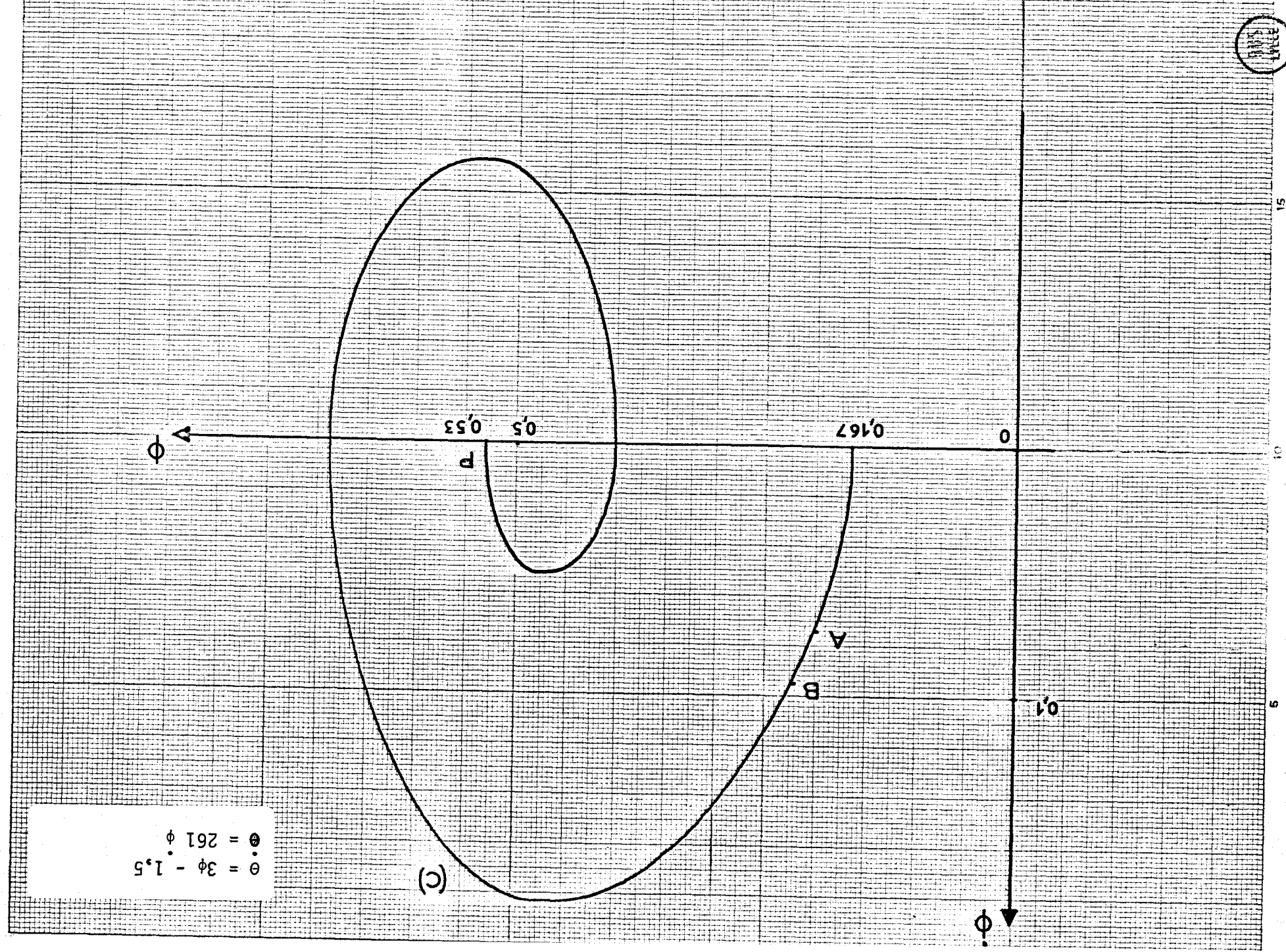
A l'aide de ces isoclines, nous traçons, dans le plan $(\phi, \dot{\phi})$, la trajectoire (c) décrivant le franchissement d'un pas jusqu'à l'arrêt (figure 3.1.). Cette courbe peut être obtenue directement à partir du modèle analogique en imposant au système, non plus un créneau de durée T_1 , mais un échelon de durée suffisante pour aboutir à l'arrêt ; il suffit, pour cela, lorsque \bar{T}_1 et \bar{a}_3 ont pris la valeur 1 - la lampe témoin L_1 est allumée - d'enlever le fil de commande, c'est à dire le fil reliant le générateur au comparateur C_3 (figure 2.8). L'enregistrement est représenté à la figure 3.2.

En fait, nous constatons que ϕ ne prend pas la valeur escomptée $\phi = \phi_0 + \phi_p$ soit $\phi = 0,167 + 0,333 = 0,5$ et qu'il existe une erreur statique que nous allons justifier.

Nous pouvons donner une première explication à partir de la méthode des isoclines, car P est un point singulier. La courbe atteint le point P dans une zone où $\dot{\phi}$ est positive, et le changement de signe de $\dot{\phi}$ bloque le moteur si le couple moteur n'est plus suffisant pour vaincre le frottement sec. Les coordonnées du point P sont donc les solutions du système d'équation déterminé à partir de (3.1) et (3.2) :

$$\dot{\phi} = 0$$

$$\text{et } 0,107 \sin 2\pi\phi + 0,0202 - 0,0714 \dot{\phi} = 0$$



$\dot{\theta} = 3\dot{\phi} - 1,5$
 $\theta = 261 \dot{\phi}$

(c)

Figure 3.2 : Trajectoire décrivant le franchissement d'un pas jusqu'à l'arrêt.

Cela nous donne :

$$0,107 \sin 2\pi\phi = - 0,0202$$

soit $\sin 2\pi\phi = - 0,19$

Les coordonnées du point P sont donc $\phi = 0,53$ et $\dot{\phi} = 0$ en accord avec l'enregistrement de la figure 3.2. ; Elles correspondent à $\theta_1 = 47,7$ degrés et $\dot{\theta}_1 = 0$, ou encore à $\theta = 2,7$ degrés et $\dot{\theta} = 0$. L'erreur statique est donc de 2,7 degrés.

Nous pouvons arriver directement à ce résultat en écrivant que le rotor cesse de se mouvoir si le couple résistant devient supérieur au couple moteur. L'arrêt s'exprime donc par la relation :

$$|C| = C_R$$

soit $0,38 \sin 4\theta = 0,072$

d'où $\theta = 2,7^\circ$ et $\theta_1 = 47,7$ degrés avec $\dot{\theta}_1 = 0$

3.3. Enregistrements

Les figures 3.3., 3.4., et 3.5. représentent les courbes de phase lorsque la fréquence de commutation est respectivement égale à 10,25 et 45 pas par seconde, les explorations se faisant sur plusieurs commutations; le début de ces courbes est confondu avec la trajectoire (C) définie au paragraphe précédent. Le retrait de la quantité $\phi_p = 0,333$ de ϕ est visible sur chacune de ces courbes.

Les figures 3.6., 3.7., 3.8. et 3.9. montrent l'évolution de ϕ et $\dot{\phi}$ en fonction du temps T lorsque la fréquence de commutation est de 25 pas par seconde. Pour ces enregistrements, on utilise comme base de temps l'amplificateur A_{20} commandé comme A_{17} , précédé d'un amplificateur de gain 0,1 pour éviter que A_{20} ne sature trop vite. Cela donne le montage de la figure 3.10.

Ainsi, les temps pendant lesquels il n'y a pas évolution du système (lampe témoin L_1 éteinte) n'apparaissent pas sur les enregistrements.

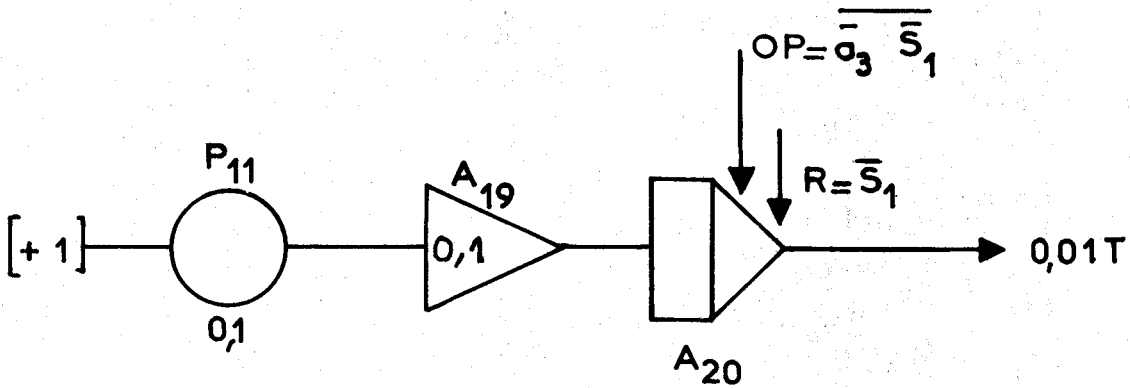


Figure 3.10 : Elaboration de la base de temps

Rappelons que, d'après le paragraphe (2.10), nous déterminons n , fréquence de rotation du moteur à partir du temps T_1 correspondant, lu au fréquencemètre, en s'appuyant sur la relation (2.16) :

$$n = \frac{90}{T_1}$$

D'autre part, les unités des différentes grandeurs mises en jeu ont été définies une fois pour toutes au chapitre 2 ; nous rappelons pour chaque tracé, la relation entre les grandeurs réelles et les grandeurs machine, les angles étant exprimés en pas et les temps en secondes (on se reportera, à cet effet, à la remarque mise en additif à ce chapitre).

$$\dot{\theta}(n) = 3\dot{\phi} + n - 2,5$$

$$\theta = 261\dot{\phi}$$

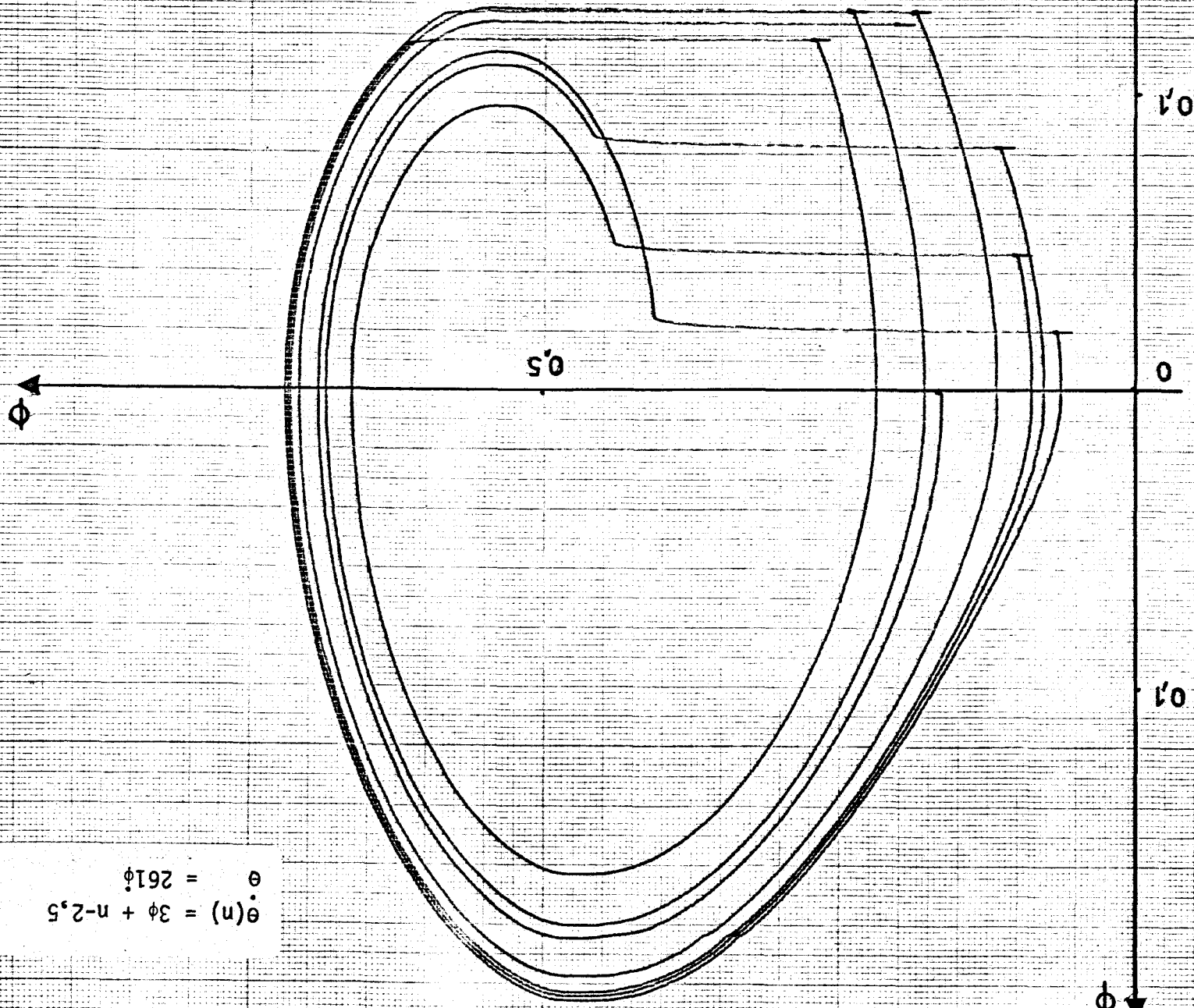


Figure 3.3. : Réponse du moteur soumis à plusieurs commutation, à la fréquence de 10 pas par seconde.

$$\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$$
$$\dot{\theta} = 261\dot{\phi}$$

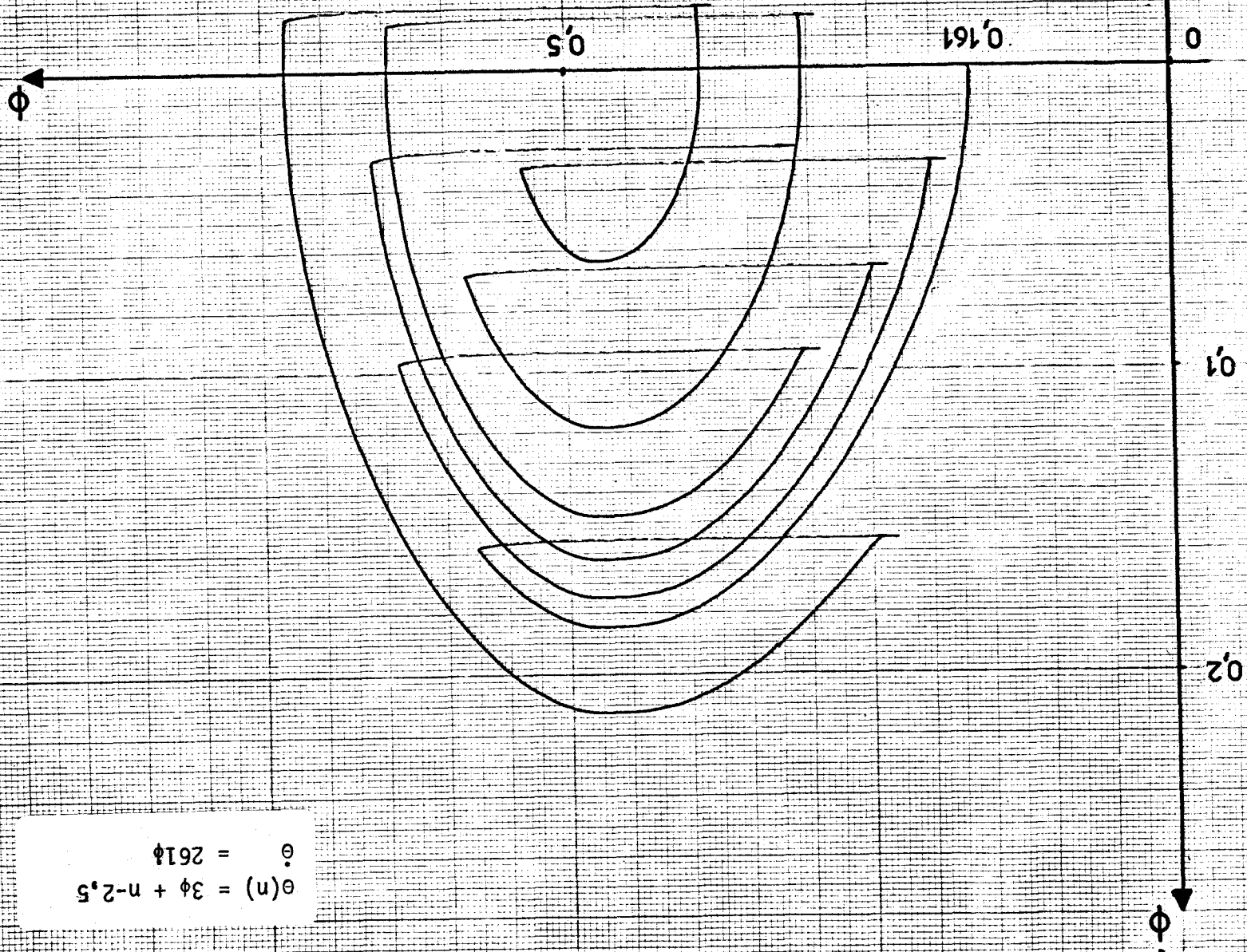


Figure 3.4.: Réponse du moteur (fréquence = 25 pas par seconde).

$$\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$$
$$\theta = 261\phi$$

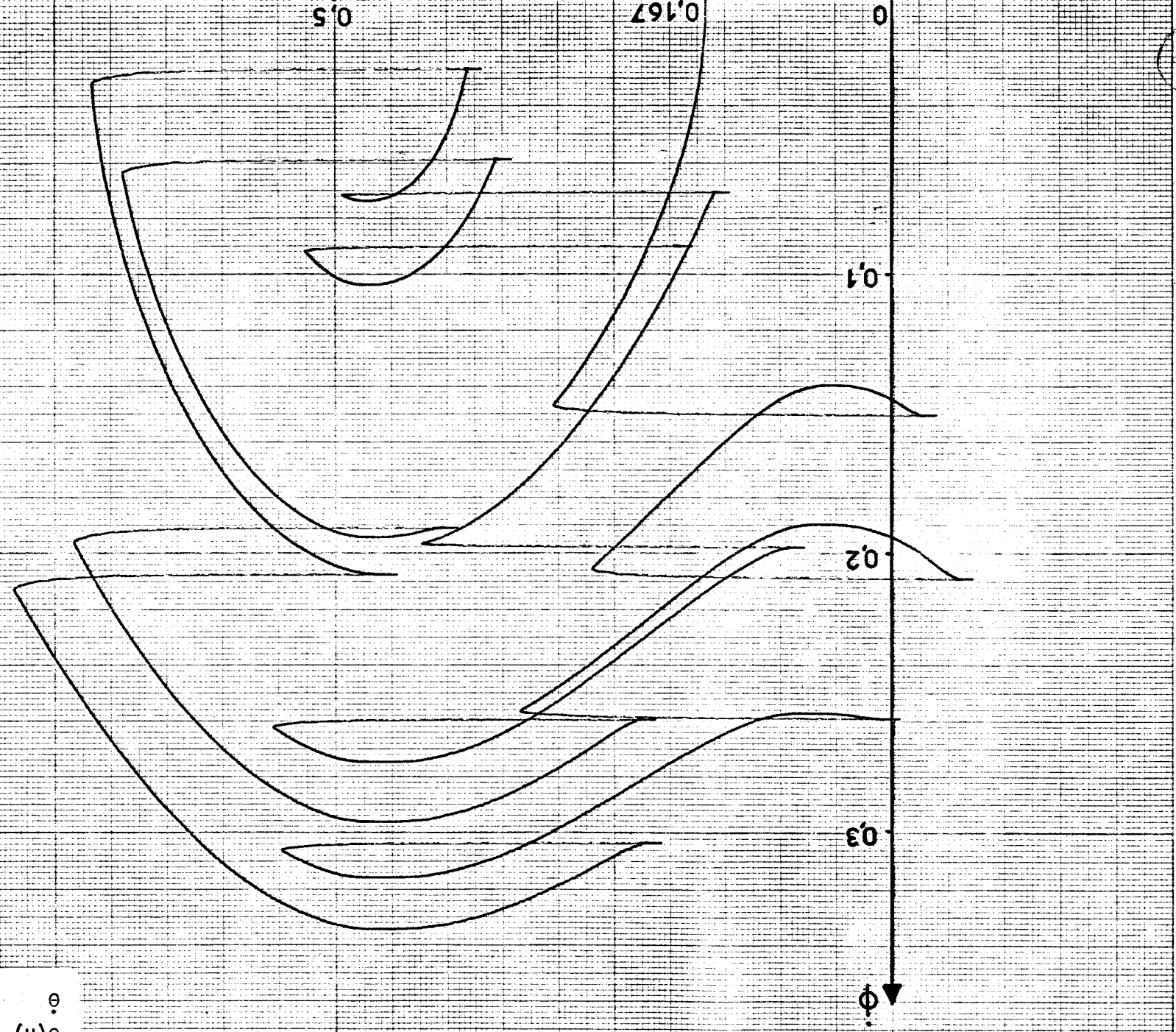
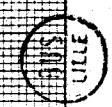


Figure 3.5. : Réponse du moteur (fréquence = 45 pas par seconde).



Figure 3.6. : Evolution de ϕ à la fréquence de 25 pas par seconde



$$t = 0,011 T$$

$$\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$$

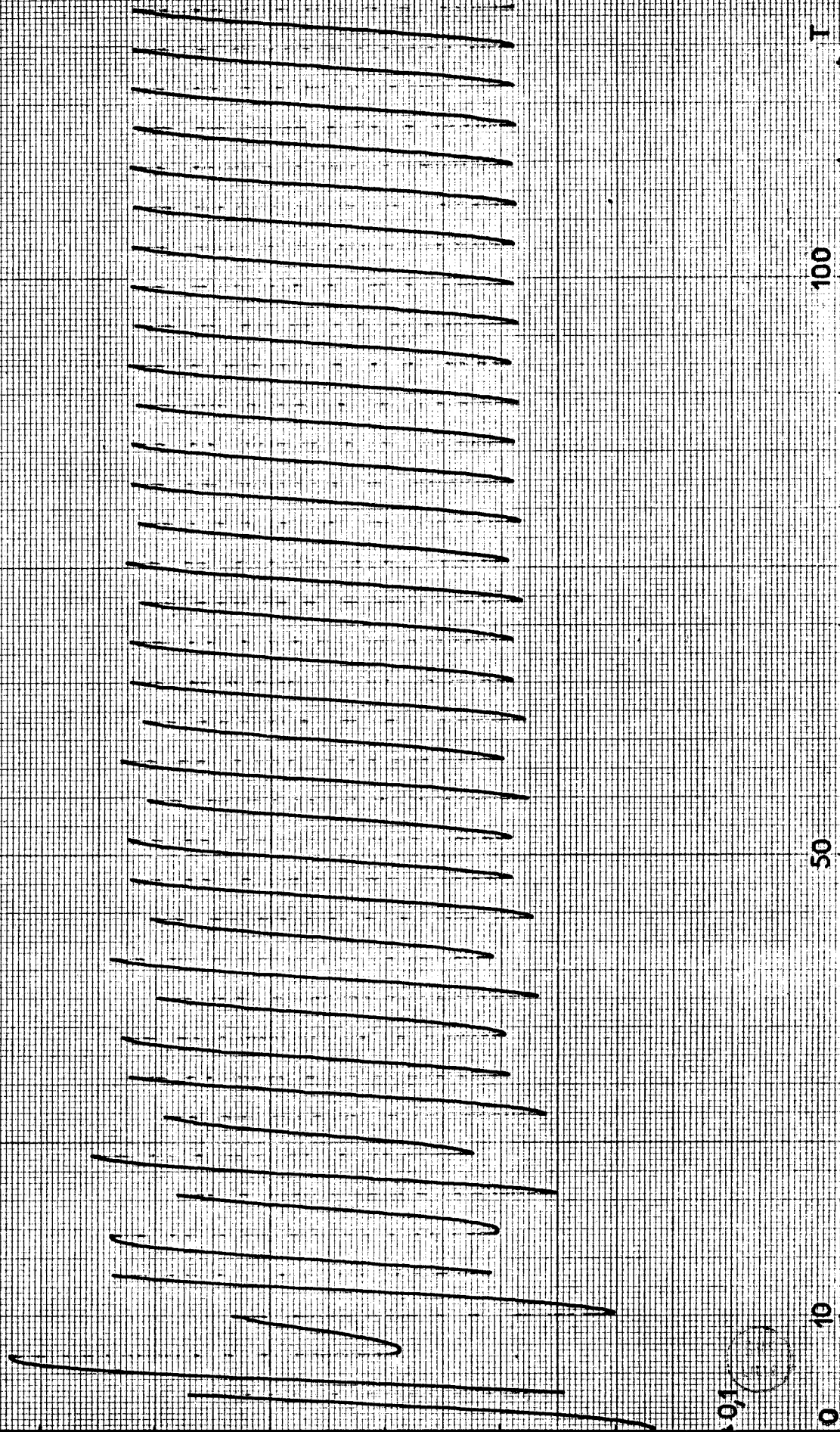
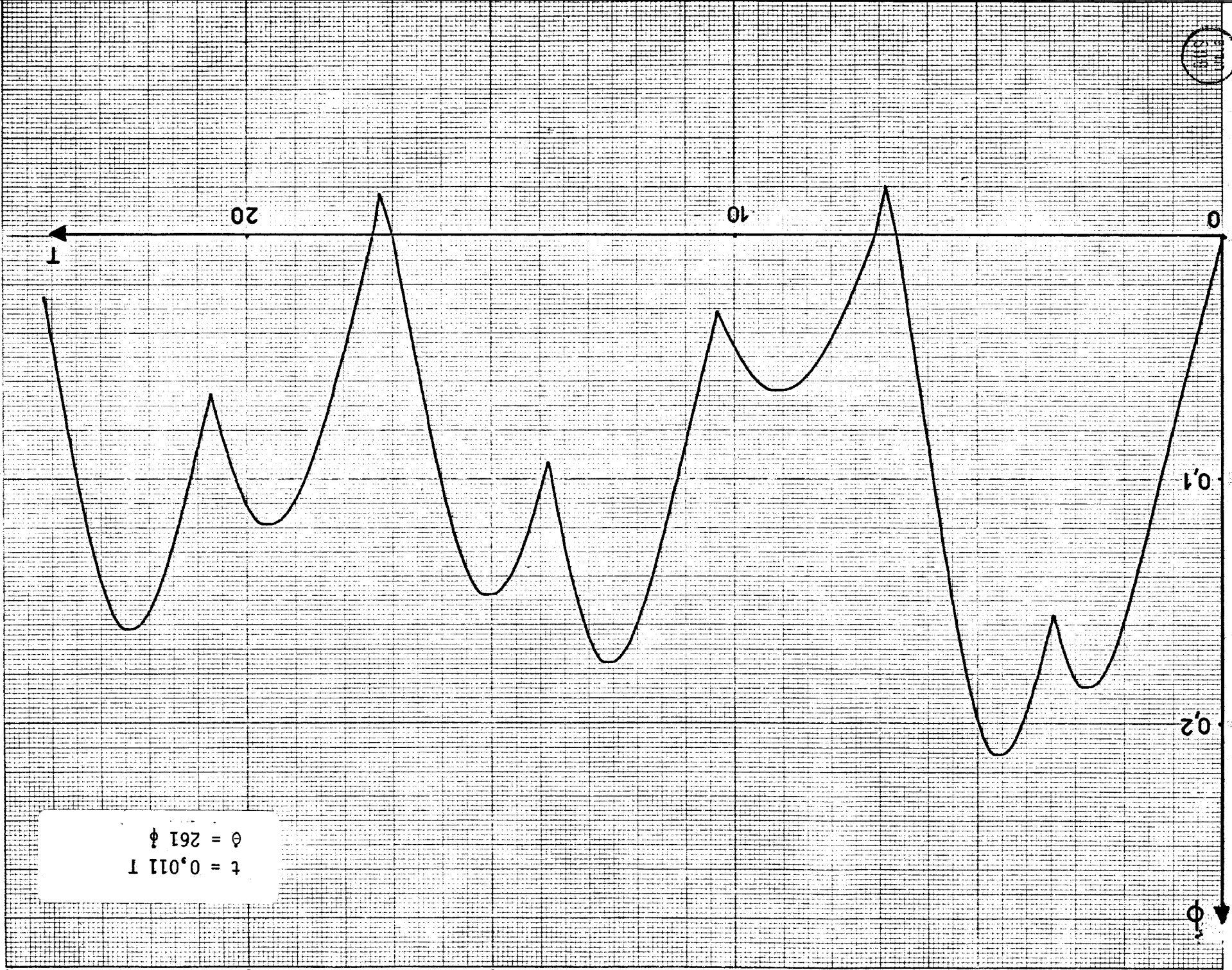
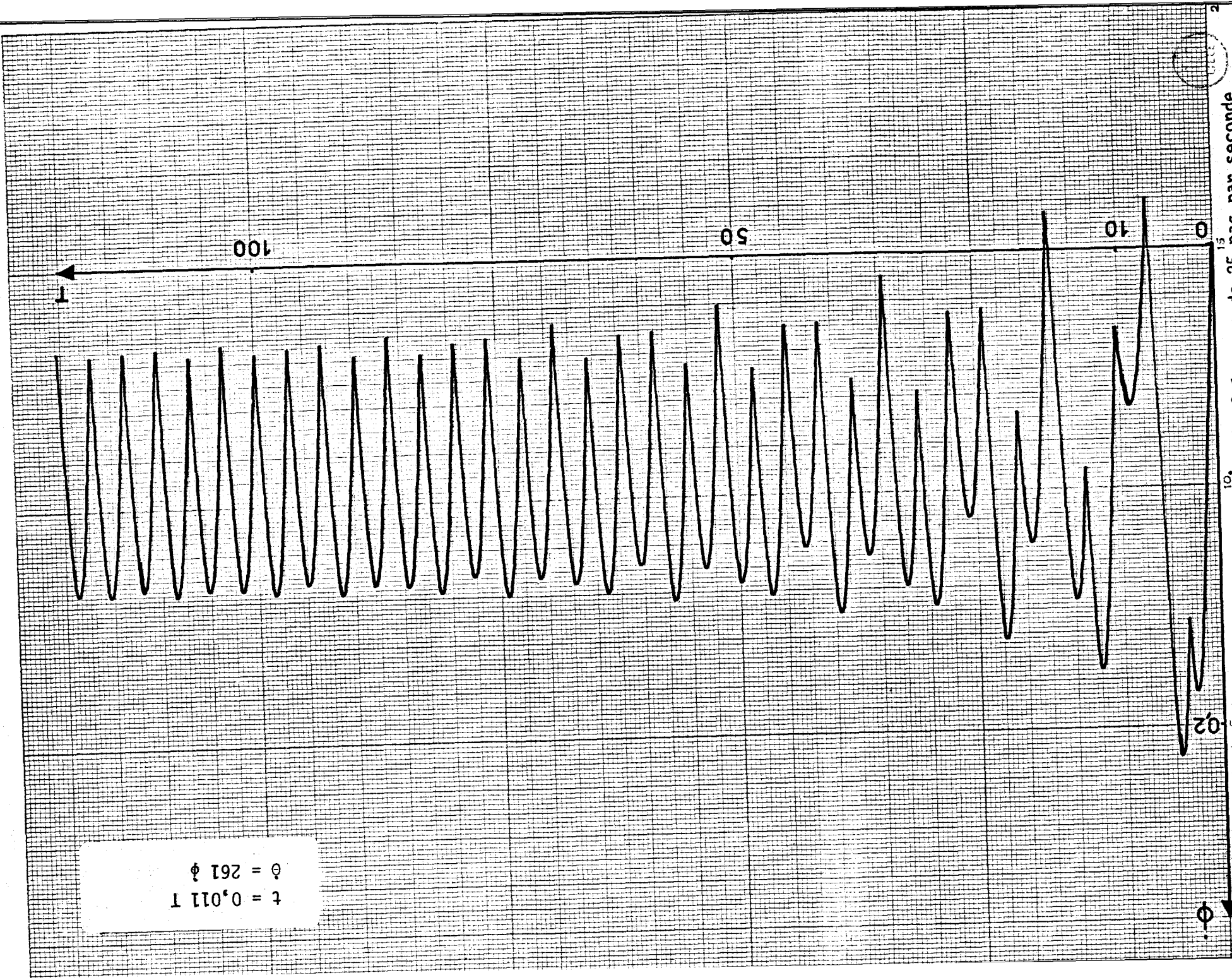


Figure 3.7. : Evolution de ϕ à la fréquence de 25 pas par seconde.



38

Figure 3.8. : Evolution de ϕ à la fréquence de 25 pas par seconde



$t = 0,011 \phi$
 $\phi = 261 t$

Figure 3.9. : Evolution de ϕ à la fréquence de 25 pas par seconde.

3.4. Justification théorique de la limite d'arrêt sur le pas

Il est possible de graduer en temps la courbe (C) représentée à la figure 3.2. En effet, si nous considérons une zone où ϕ reste de même signe, et pour une petite variation de ϕ entre deux points A et B de la courbe représentée à la figure 3.2. nous pouvons écrire [9] :

$$T_B - T_A = \int_{T_A}^{T_B} dT = \int_{\phi_A}^{\phi_B} \frac{d\phi}{\frac{d\phi}{dT}}$$

soit :

$$(3.7) \quad T_B - T_A \approx |\phi_B - \phi_A| \times \frac{1}{\frac{\dot{\phi}_A + \dot{\phi}_B}{2}}$$

Les résultats numériques sont consignés dans les tableaux joints en annexe. La fréquence maximale pour laquelle il y a arrêt sur le pas ($\phi = 0$) correspond au point P, c'est à dire à un temps T de 13,078s : elle vaut donc $n = \frac{90}{13,078}$ soit 7 pas par seconde, ce qui est conforme au résultat expérimental, compte tenu du fait que n ne peut prendre que des valeurs entières.

Si n est inférieure à 7 pas par seconde, nous obtenons la courbe (C). Cela s'explique aisément en disant que lorsque le point P est atteint, le couple moteur n'est plus supérieur au couple résistant et le moteur s'arrête, bien qu'il reste sous tension comme le prouve la lampe L_1 qui demeure allumée pendant un temps $T = \frac{90}{n}$, supérieur à $\frac{90}{7}$ s, alors que le point P correspond pratiquement, comme nous l'avons vu, à $T = \frac{90}{7}$ s

3.5. Considérations sur l'accélération

Le montage de la figure 3.11 nous permet de mesurer $\ddot{\phi}$ à tout instant. Nous constatons que le moteur perdra des pas si l'accélération $\ddot{\phi}_2$

au début du second train d'impulsions est inférieure à la valeur $- 0,052s^{-2}$

Or, sur la courbe (C), A_0 correspond au départ ($\phi_0 = 0,167$; $\dot{\phi}_0 = 0s^{-1}$), A_1 à l'arrêt après un certain nombre de commutation des phases, A_2 au point de départ avant le second train d'impulsions. ($\phi_2 = \phi_1 - \frac{1}{3}$ et $\dot{\phi}_2 = \dot{\phi}_1$)

Conformément à la relation (2.15) nous pouvons écrire :

$$\ddot{\phi}_2 = - 0,107 \sin 2\pi\phi_2 + 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}_2 + 0,0714 \dot{\phi}_2$$

soit :

$$\ddot{\phi}_2 = - 0,107 \sin 2\pi \left(\phi_1 - \frac{1}{3}\right) + 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}_1 + 0,0714\dot{\phi}_1$$

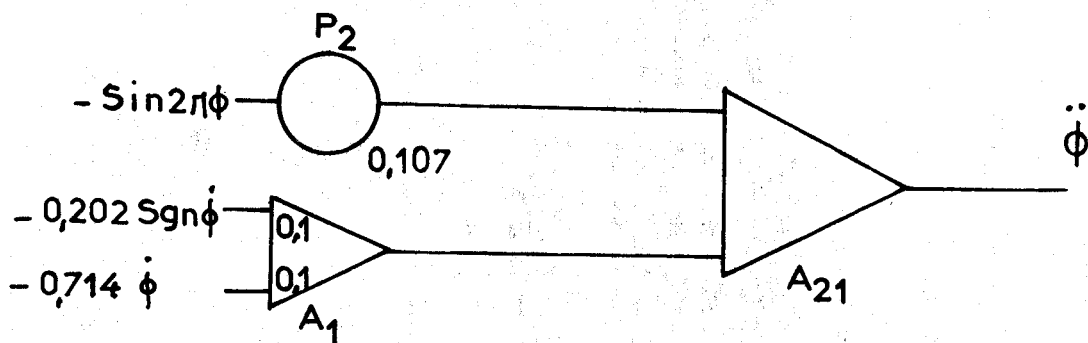


Figure 3.11. Montage permettant la mesure de $\ddot{\phi}$

Si A_1 correspond à la limite de la zone de démarrage, la fréquence de commutation correspond au temps $T_1 = 1,92s$, valeur qui selon le tableau de l'annexe 2 conduit à $\phi_1 = 0,3$ et $\dot{\phi}_1 = 0,144s^{-1}$. D'où la valeur de $\ddot{\phi}_2$:

$$\ddot{\phi}_2 = - 0,107 \sin 2\pi(0,3 - 0,333) + 0,0202 + (0,0714 \times 0,144)$$

soit $\ddot{\phi}_2 = - 0,052$, valeur conforme au résultat expérimental.

3.6. Conclusion

Le schéma de simulation sur calculatrice hybride nous permet de connaître les performances du moteur pas à pas dans sa zone de démarrage. Nous pouvons affirmer qu'il s'avère satisfaisant car les résultats obtenus coïncident avec des interprétations théoriques, issues notamment de l'étude du système dans le plan de phase.

Nous allons donc l'utiliser de nouveau pour essayer d'améliorer les performances du moteur pas à pas, et, en particulier, de l'amener progressivement, sans perte de pas, dans sa zone d'entraînement.

Remarque : relations entre les grandeurs-machine et les grandeurs réelles

Examinons les différentes variables mises en jeu :

I. le temps

D'après ce qu'il a été convenu au paragraphe 3.3., la relation entre le temps réel et le temps-machine T est :

$$t = \frac{T}{90}$$

$$(3.8) \quad \underline{t = 0,011 T}$$

où t et T sont exprimés en secondes.

2. La position angulaire

La position angulaire θ peut être déterminée à partir de la relation :

$$(2.1) \quad \phi = \frac{N_R}{2} \theta_1$$

où θ_1 correspond au changement de variables imposé en 1.4. :

$$\theta_1 = \theta + \frac{\pi}{4}$$

θ et θ_1 s'expriment en radians ; ϕ est un nombre sans dimensions. Nous pouvons donc écrire, avec N_R égal à 4 :

$$\theta \text{ (rad)} = \frac{\pi}{2} \phi - \frac{\pi}{4}$$

ou encore

$$(3.9) \quad \underline{\theta \text{ (pas)} = 3\phi - 1,5}$$

Après la première commutation, ϕ varie de ϕ^0 à ϕ^1 et l'expression de θ est alors :

$$\theta(1) = 3\phi - 1,5$$

Si on étudie par exemple le franchissement d'un seul pas :

$$\phi^0 = \frac{1}{6} \quad \text{d'où} \quad \theta^0 = -1$$

$$\phi^1 = 0,53, \text{ valeur qui correspond à :}$$

$$\theta^1 = (3 \times 0,53) - 1,5 = 0,09 \text{ pas soit } 2,7^\circ,$$

résultat conforme à l'étude faite au paragraphe 3.2.

Après la seconde commutation, ϕ varie de $\phi^1 - \frac{1}{3}$ à ϕ^2 , et l'expression de θ devient :

$$\theta(2) = 1 + 3\phi - 1,5$$

si l'on tient compte du fait que, pour étudier le fonctionnement du moteur sur calculatrice analogique, on effectue sur le modèle, avant chaque nouvelle commutation, le retrait d'un pas. Pour pouvoir déterminer la valeur de la position angulaire θ , il faut tenir compte de ce retrait, d'où la présence du terme "1" dans l'expression de $\theta(2)$ qui s'écrit donc :

$$\theta(2) = 3\phi - 0,5$$

De même, après la $n^{\text{ième}}$ commutation, ϕ varie de $\phi^{n-1} - \frac{1}{3}$ à ϕ^n ; θ prend la forme :

$$\theta(n) = (n-1) + 3\phi - 1,5$$

la quantité "n-1" correspondant aux différents retraits successifs, d'où

$$(3.10) \quad \underline{\theta(n) = 3\phi + n - 2,5}$$

3. Vitesse angulaire

Nous pouvons écrire :

$$\frac{d\theta}{dT} = \frac{d\theta}{d\phi} \times \frac{d\phi}{dT} \times \frac{dT}{dT}, \quad \text{d'où}$$

$$\frac{d\theta}{dT} = 3 \times \dot{\phi} \times 90$$

soit :

$$(3.11) \quad \underline{\dot{\theta}(\text{pas/s}) = 270 \dot{\phi}}$$

expression dans laquelle $\dot{\phi}$ s'exprime en s^{-1}

4. Distance parcourue après n commutations

A la fin de la $n^{\text{ième}}$ commutation, ϕ prend la valeur ϕ^n qui correspond à :

$$\theta^n = 3\phi^n + n - 2,5$$

La distance parcourue est alors $d_n = \theta^n - \theta^0$, soit

$$d_n = 3\phi^n + n - 2,5 - (3\phi^0 - 1,5)$$

ou :

$$(3.12) \quad \underline{d_n = 3(\phi^n - \phi^0) + (n-1)}$$

CHAPITRE IV

ETUDE DE LA MISE EN VITESSE DU MOTEUR

Nous sommes ainsi confrontés au problème suivant :
imposer au moteur, sans perte de pas, une fréquence de rotation élevée de n_f pas par seconde à partir d'une fréquence de rotation initiale de n_i pas par seconde. Les points I et F correspondants (figure 4.1) sont alors situés respectivement dans les zones de démarrage et d'entraînement.
Il s'agit donc de chercher le temps minimal pour aller de I à F,

En fait, nous allons imposer au moteur une loi de mise en vitesse linéaire de telle sorte que le temps t_1 de franchissement d'un pas soit inversement proportionnel au temps : la vitesse $\frac{1}{t_1}$ de franchissement d'un pas varie donc linéairement en fonction du temps. La pente maximale de la rampe obtenue sans perte de pas définit la mise en vitesse optimale.

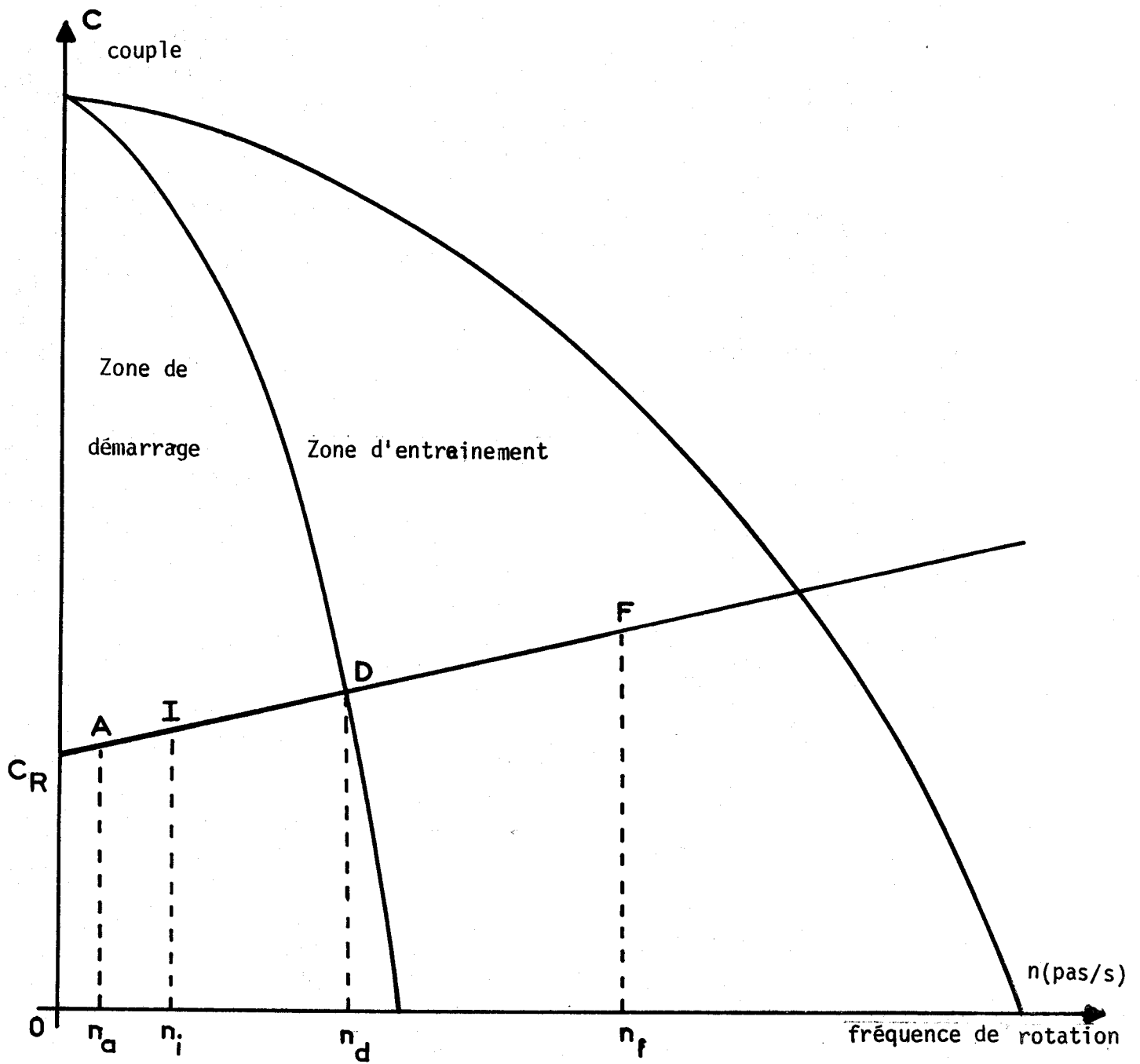


Figure 4.1. : Caractéristiques statiques d'un moteur pas à pas et de sa charge.

4.1. Résultats obtenus pour une mise en vitesse donnée

4.1.1. Loi de mise en vitesse

Nous imposons une fréquence n_i de rotation du moteur égale à 25 pas par seconde, supérieure à n_a , mais inférieure à n_d (n_a et n_d sont, pour le système étudié, respectivement égales à 7 et 46 pas par seconde). Le moteur tourne donc à fréquence constante, en avance continue, sans perdre de pas. Nous l'accélérons jusqu'à la fréquence n_f de 125 pas par seconde, cela d'une façon linéaire par le dispositif de wobulation décrit à la figure 2.5.

En effet, la tension v introduite à l'entrée du générateur est égale à :

$$v = (10)(0,1 a T)(b)$$

soit :

$$v = abT$$

Traçons la courbe d'étalonnage du générateur, c'est à dire la courbe représentant la fréquence du signal de sortie en fonction de la tension d'entrée V . Il est d'ailleurs préférable d'indiquer les variations de n , exprimée en pas par seconde à partir de la formule :

$$(2.16) \quad n = \frac{90}{T_1}$$

où T_1 est la valeur lue au fréquencemètre.

La figure 4.2. correspond aux courbes d'étalonnage pour $n_i=15$ et 30 pas par seconde. Nous obtenons des droites parallèles. Nous pouvons écrire :

$$(4.1) \quad n = n_i + 34,2V$$

Dans le cas de la wobulation, V prend la valeur v et

$$(4.2) \quad n = n_i + 34,2 abT$$

soit, en tenant compte de la relation entre le temps machine et le temps réel :

$$(4.3) \quad n = n_i + 3078 abt$$

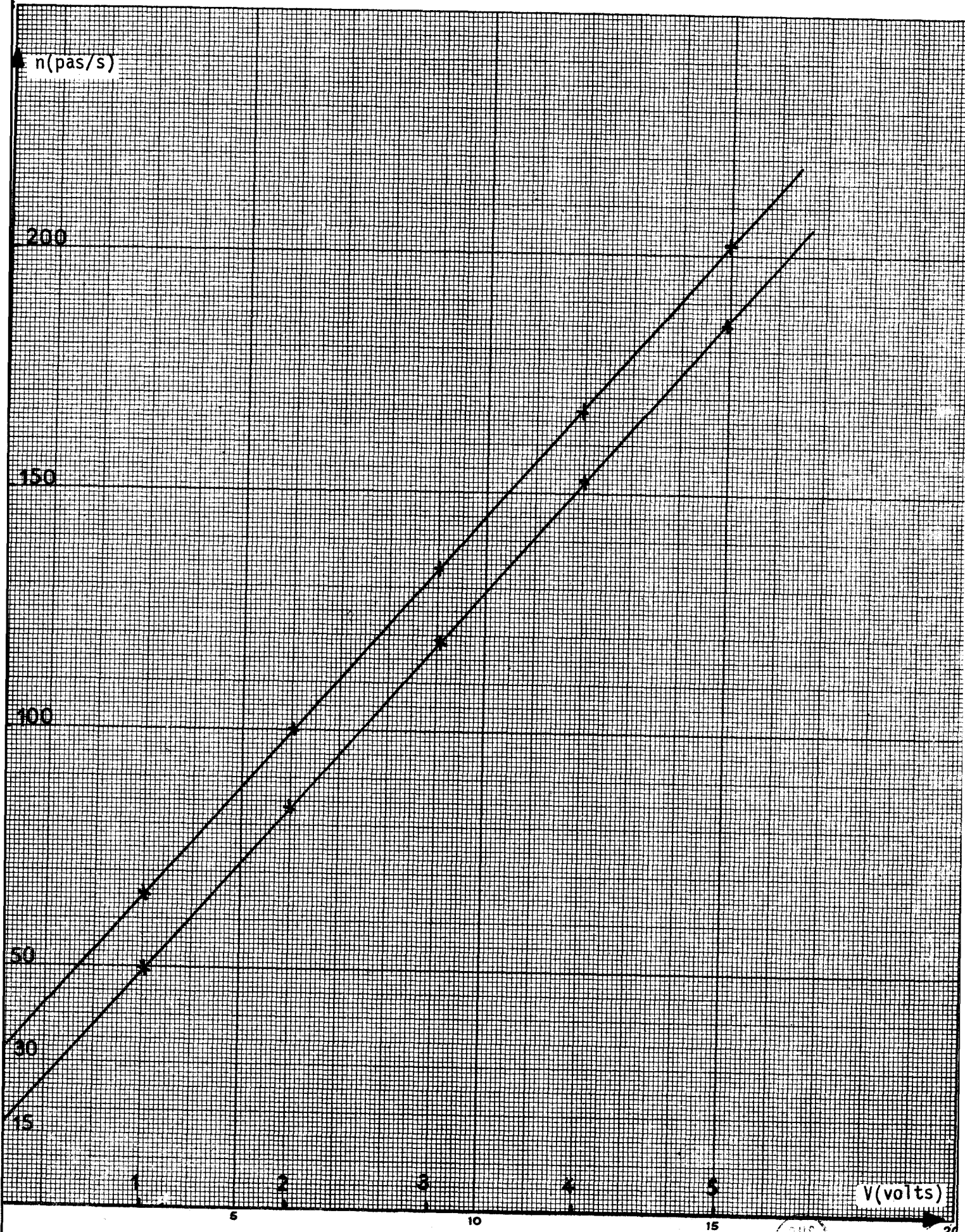


Figure 4.2. : Courbes d'étalonnage du générateur



En fait, n évolue par paliers de durées de plus en plus brèves et la relation (4.3) n'est valable qu'aux instants où la tension v change brutalement de valeur, selon le chronogramme représenté à la figure 2.6. Cependant, n_i et n_f étant imposées à l'aide du générateur et du potentiomètre P_{11} (figure 2.5), comme cela a été expliqué en 2.8 et 2.10, cette relation (4.3) nous permet de calculer les temps successifs de franchissement d'un pas, c'est à dire les temps successifs pendant lesquels \bar{s}_1 et \bar{a}_3 prennent la valeur 1 (lampe L_1 allumée).

Ainsi, dans le cas où n_i et n_f sont respectivement égales à 25 et 125 pas par seconde, b prend la valeur 0,219 et nous pouvons choisir a égal à 1,24 pour que l'accélération se fasse sans perte de pas.

Le temps de franchissement du premier pas est $t_0 = \frac{1}{n_i}$ et la relation (4.3) nous donne :

$$n_1 = n_i \times \alpha t_0 = n_i + \frac{\alpha}{n_i}$$

avec

$$\alpha = 3078 \times 1,24 \times 0,219 = 835,9$$

Le temps de franchissement du second pas est donc :

$$t_1 = \frac{1}{n_1} = \frac{1}{n_i + \frac{\alpha}{n_i}}$$

De même le temps de franchissement du $k^{\text{ième}}$ pas est :

$$t_{k-1} = \frac{1}{n_{k-1}}$$

avec

$$(4.4) \quad n_{k-1} = n_{k-2} + \alpha t_{k-2} = n_{k-2} + \frac{\alpha}{n_{k-2}}$$

et ainsi de suite jusqu'à ce que les temps de franchissement deviennent égaux à :

$$t_f = \frac{1}{n_f}$$

cù n_f est égale à :

$$n_f = n_{n-1} + \alpha t_{n-1}$$

Le tableau II nous donne les valeurs des temps mesurés au fréquencesmètre lors de l'accélération et ceux qui sont calculés à partir des temps réels définis ci-dessus.

T_1 mesuré (s)	T calculé (s)
3,6	3,6
1,53	1,54
1,24	1,24
1,07	1,07
0,96	0,96
0,87	0,87
0,81	0,81
0,76	0,76
0,72	0,72

Tableau II

Les résultats expérimentaux coïncident avec ceux obtenus par le calcul. La figure 4.3. représente les variations de n en fonction de T ; Elle fait apparaitre les différents temps nécessaires au franchissement des pas successifs.

4.1.2. Résultats

Nous détectons la valeur de a maximale qui permette l'accélération de 25 à 125 pas par seconde sans perte de pas ; nous en déduisons le temps minimal t_m de mise en vitesse, à partir de la formule (2.18) :

$$t_m = \frac{0,142}{a_{\max}}$$

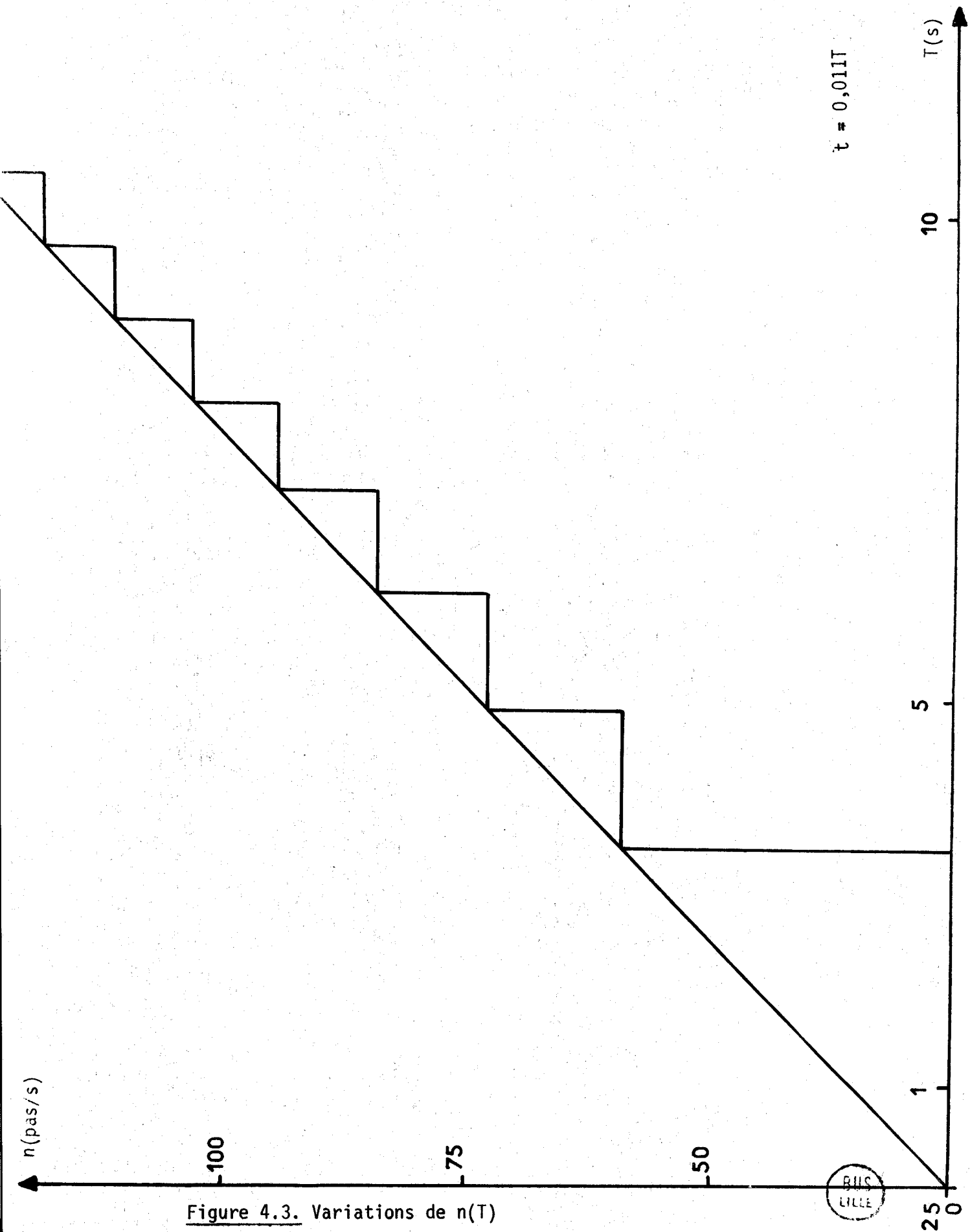


Figure 4.3. Variations de $n(T)$

a_{\max} est égal à 1,32 (on utilise alors l'entrée de gain 10 de l'amplificateur A_{17}), ce qui donne $t_m = 0,107s$. Nous avons enregistré la trajectoire de phase (figure 4.4) montrant la mise en vitesse pour ce régime optimal.

Les figures 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 montrent l'évolution de ϕ et $\dot{\phi}$ en fonction du temps lors de ce même régime.

Les figures 4.9 et 4.10 représentent les trajectoires de phase :

- la première pour $a = 0,8$, inférieure à a_{\max} ; le temps de mise en vitesse est alors de 0,178s
- la seconde pour $a = 1,5$ supérieure à a_{\max} : la perte de pas est mise en évidence.

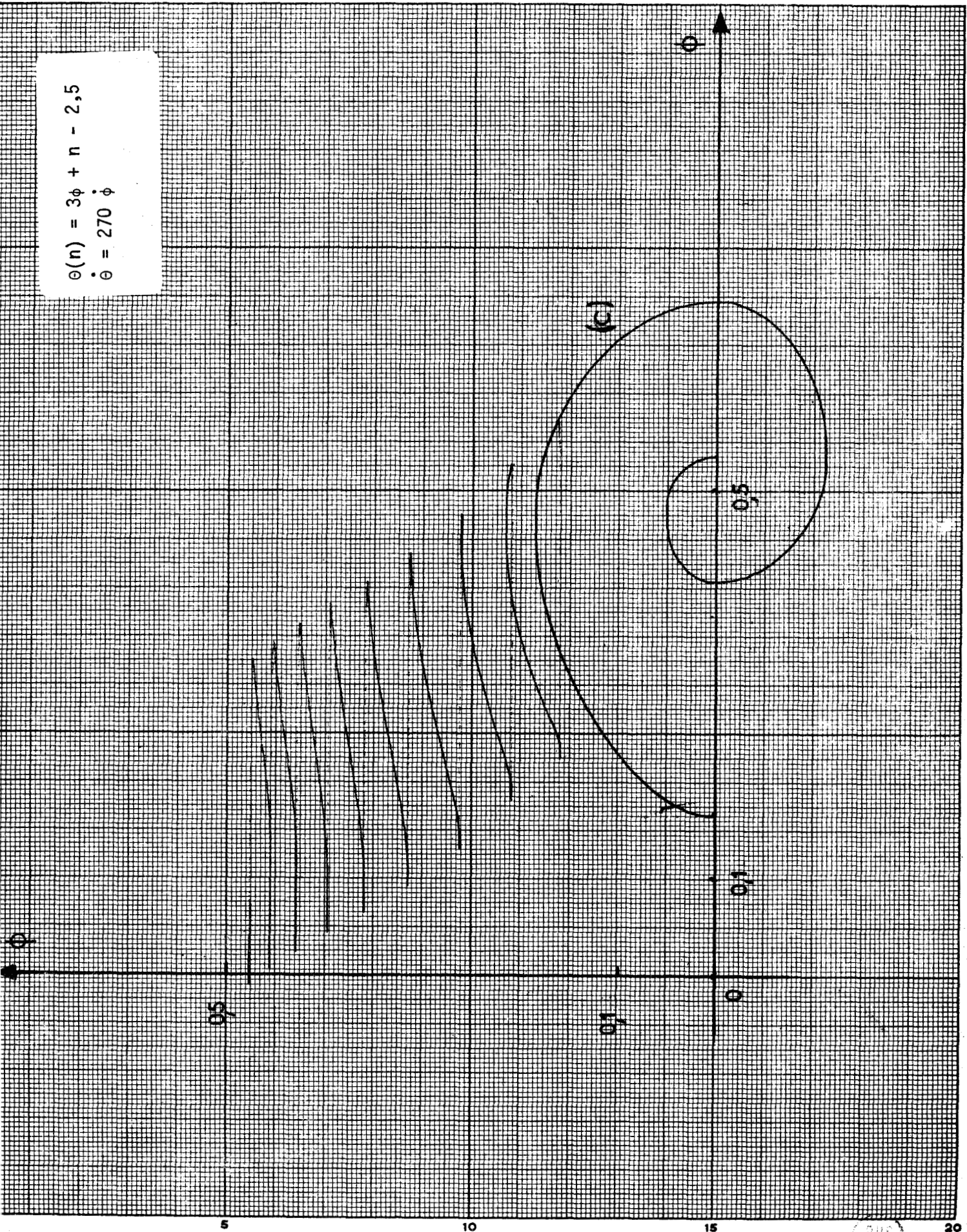
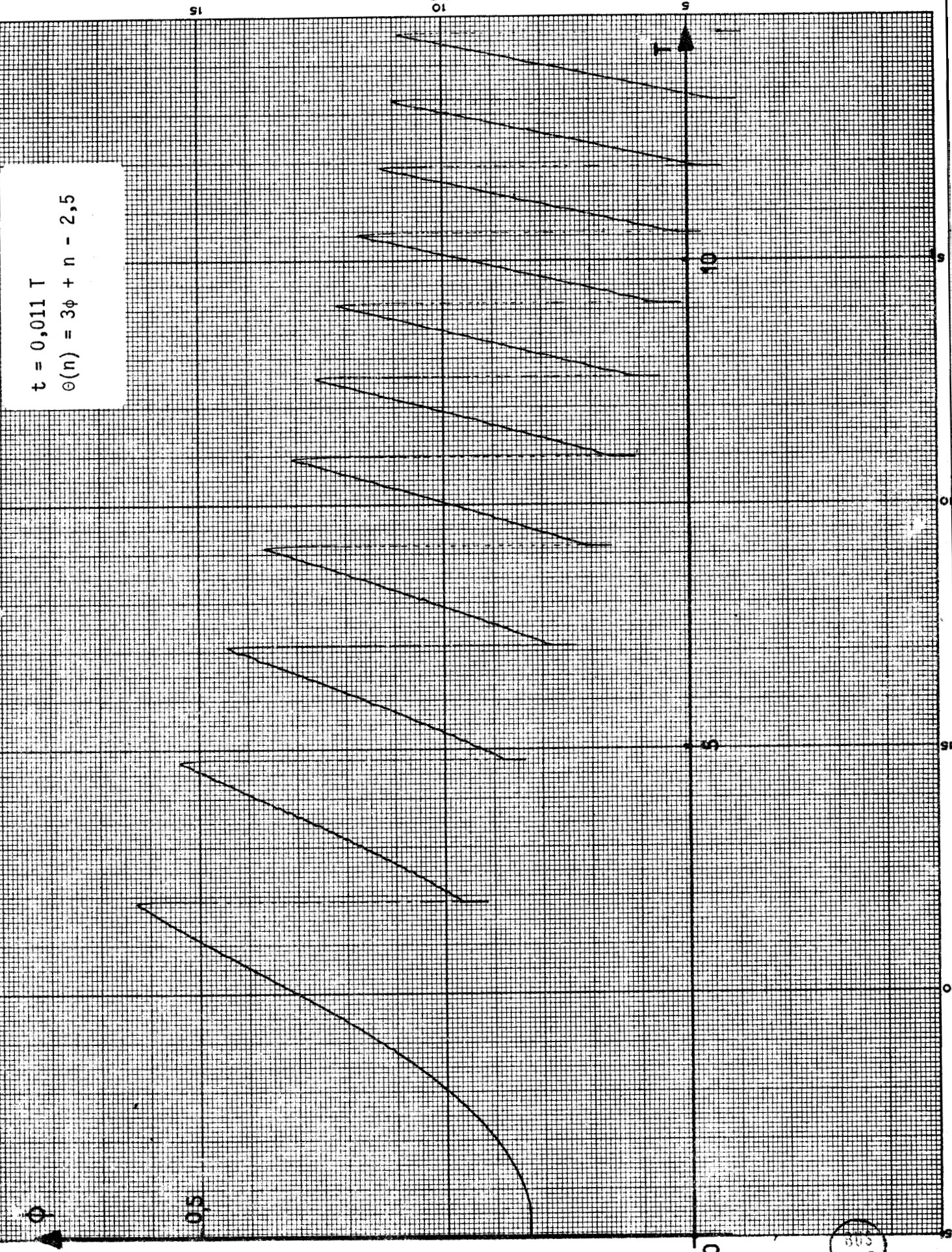


Figure 4.4. : Mise en vitesse optimale de 25 à 125 pas/s





$t = 0,011 T$
 $\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$

Figure 4.5 : $\phi(T)$ pour la mise en vitesse optimale



$$t = 0,011 T$$
$$\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$$

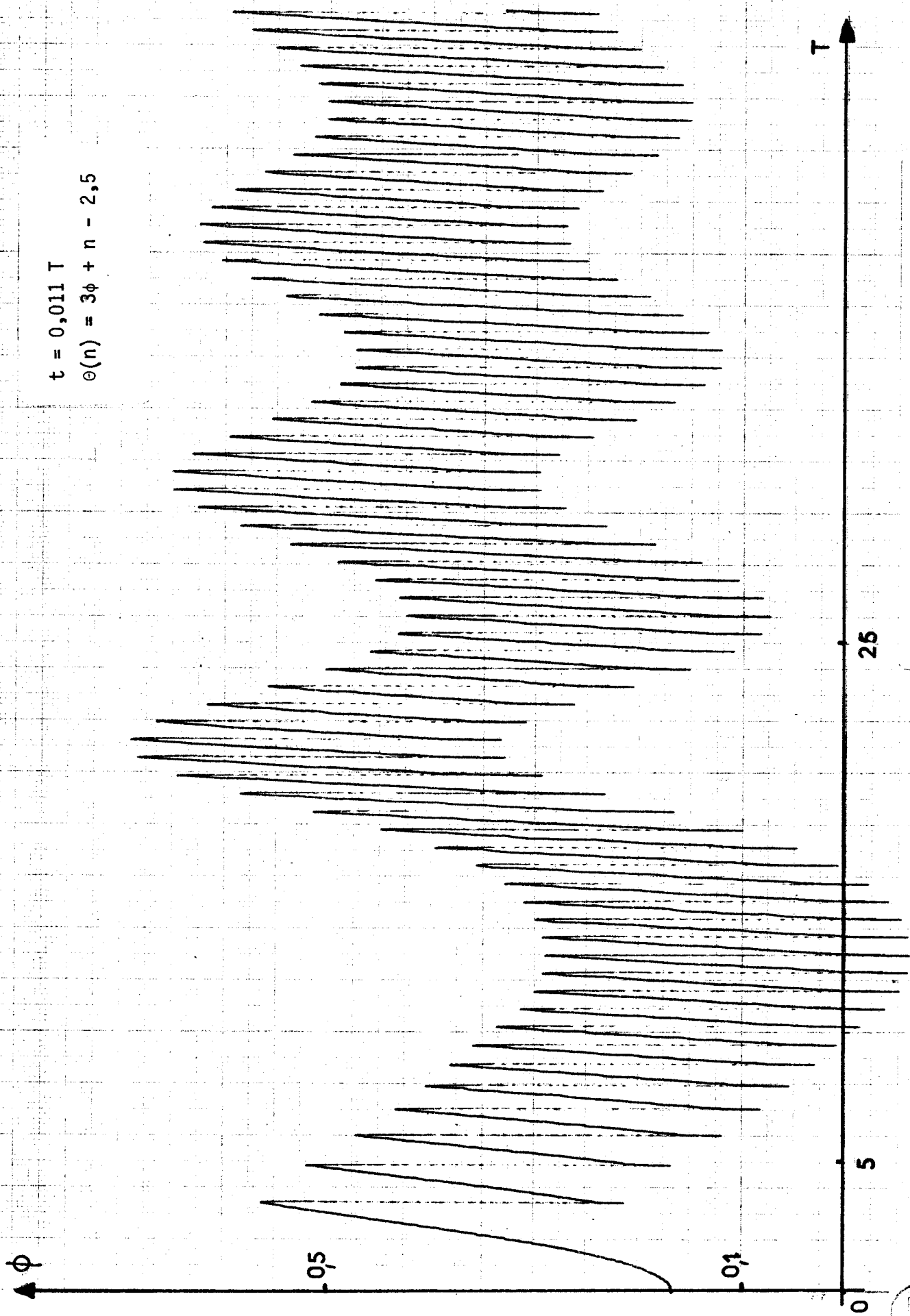


Figure 4.6 : $\phi(T)$ pour la mise en vitesse optimale



$t = 0,011 T$
 $\dot{\theta} = 270 \dot{\phi}$

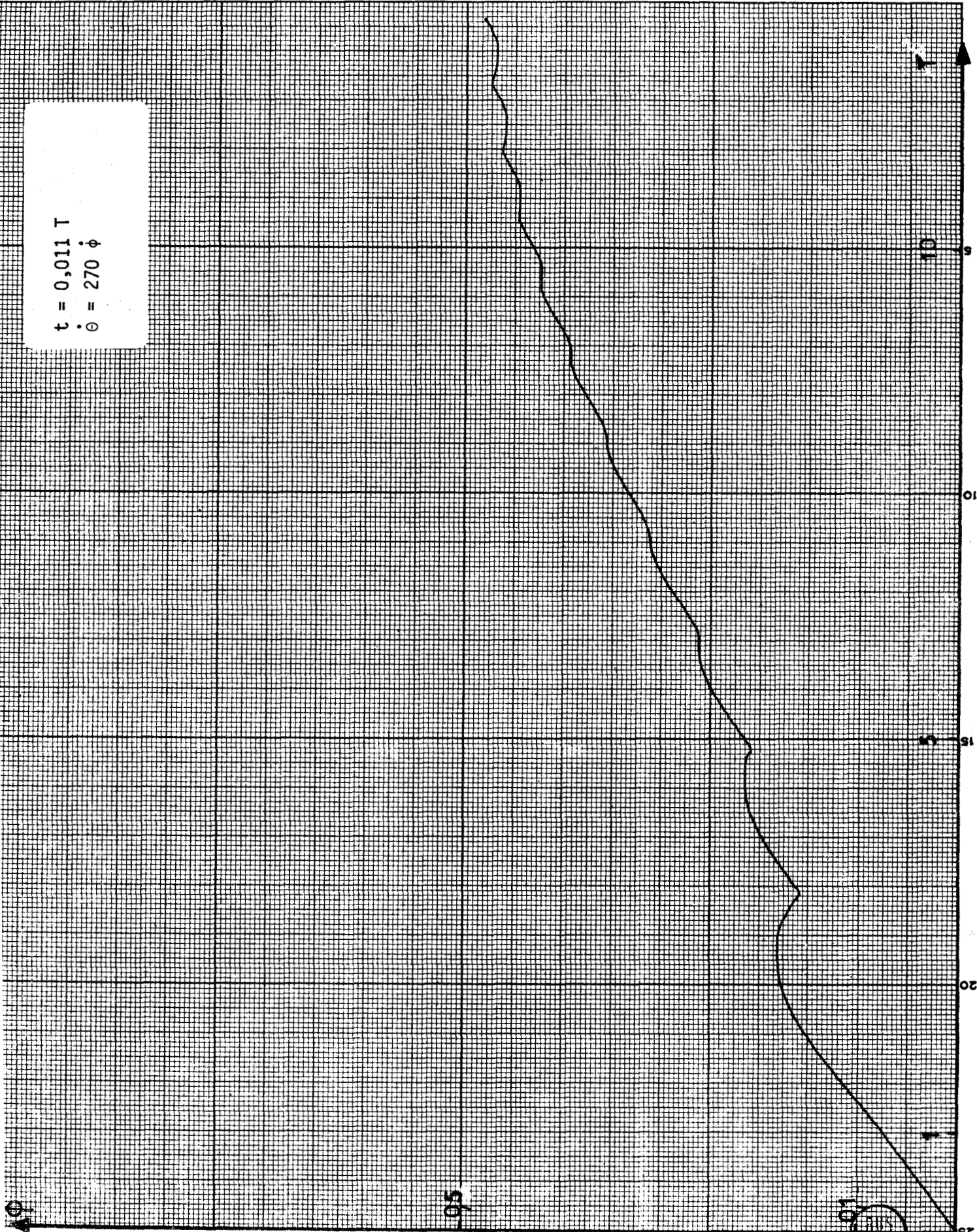


Figure 4.7. : $\phi(T)$ pour la mise en vitesse optimale

$t = 0,011 \tau$
 $\dot{\phi} = 270 \phi$

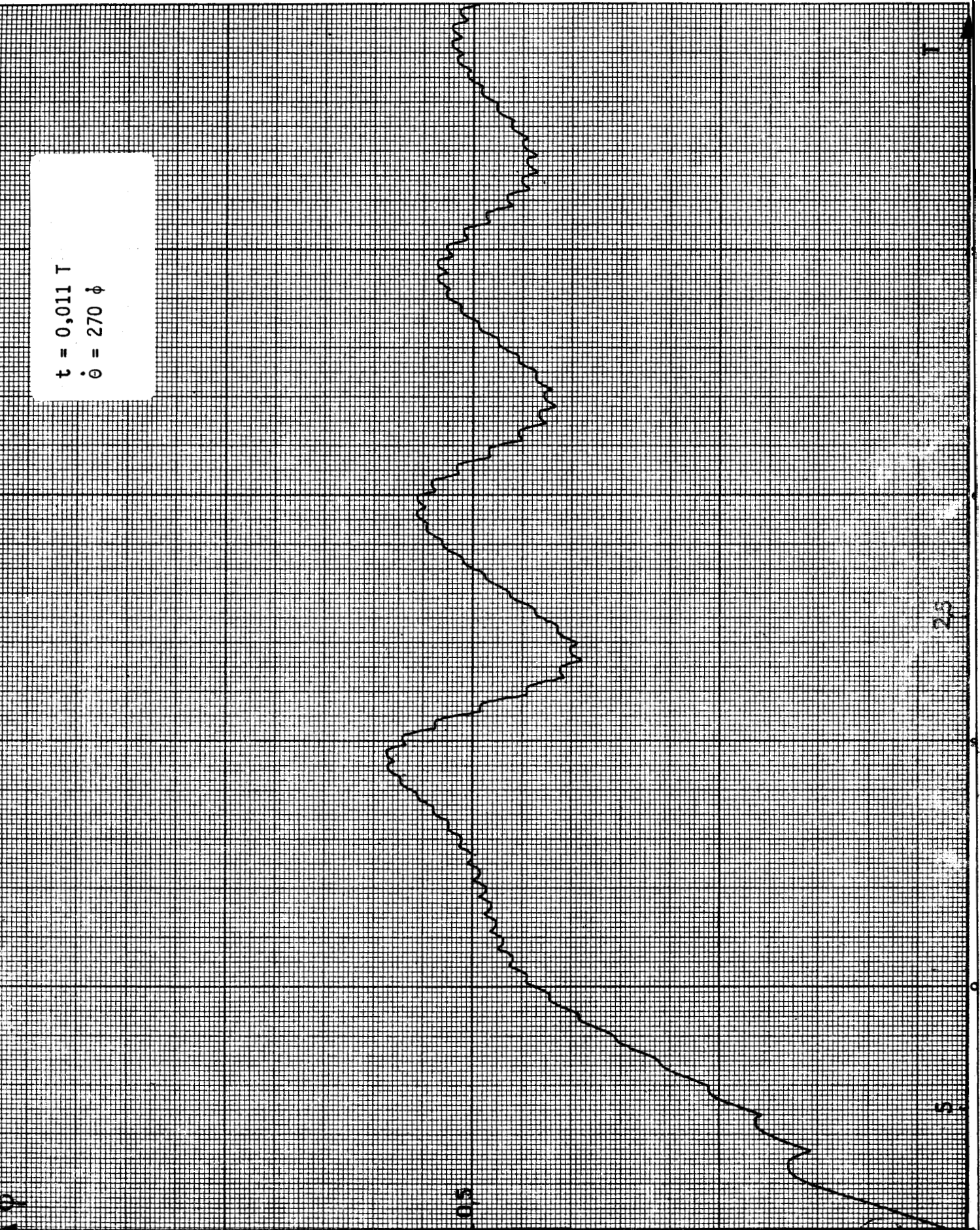


Figure 4.8. : $\phi(T)$ pour la mise en vitesse optimale



$$\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$$
$$\dot{\theta} = 270 \dot{\phi}$$

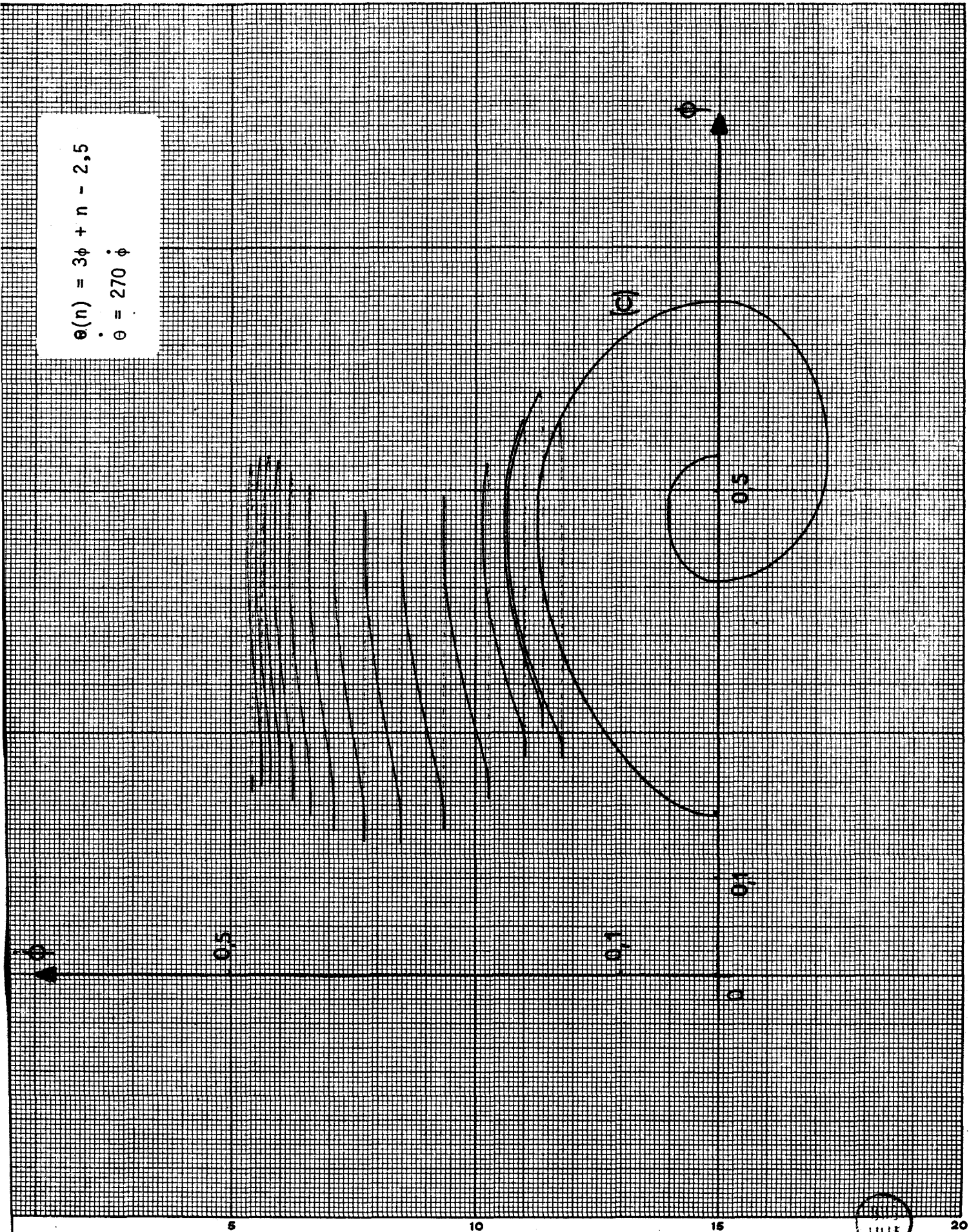


Figure 4.9. : Mise en vitesse avec $a < a_{\max}$

LILLE

$$\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$$

$$\dot{\theta} = 270 \dot{\phi}$$

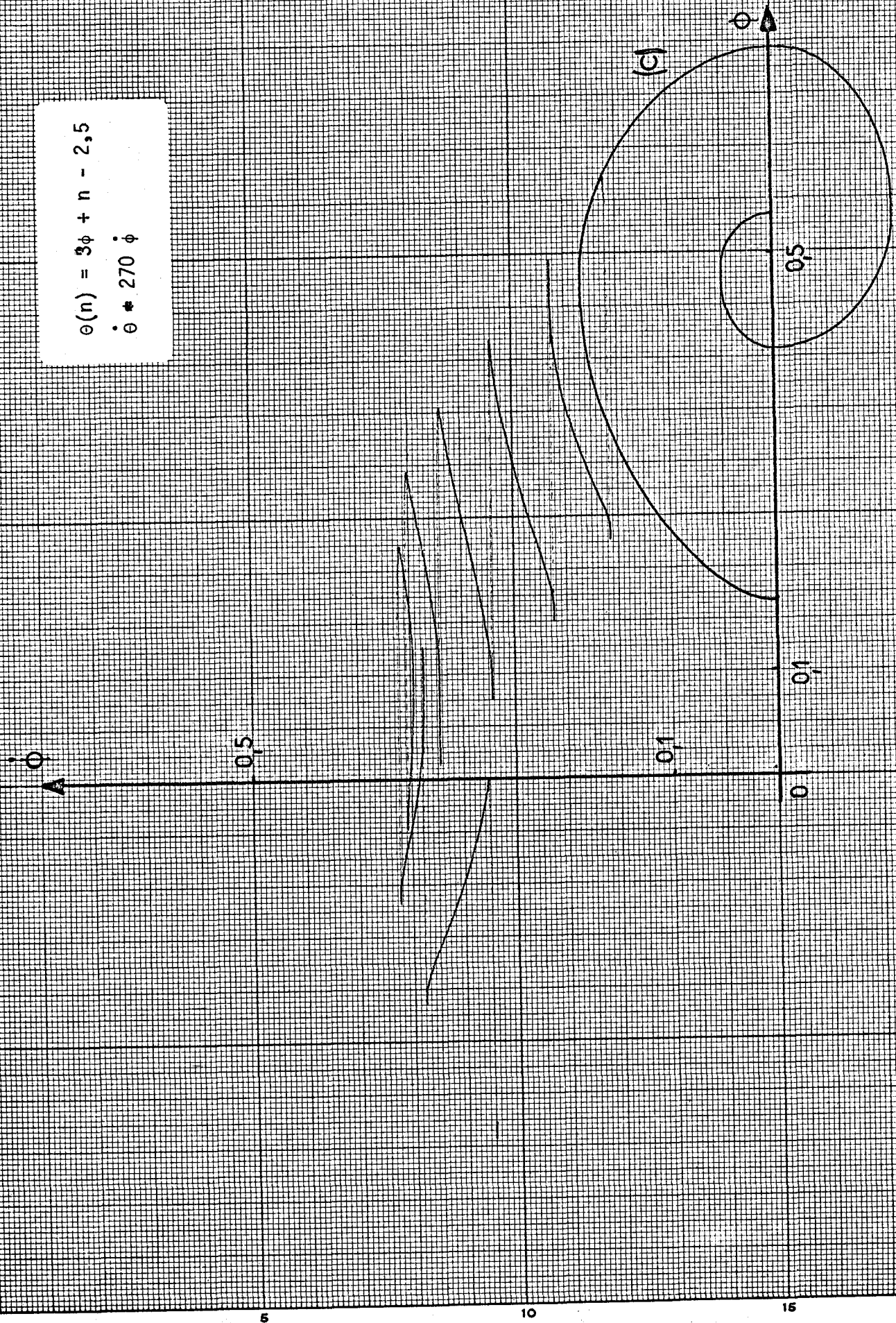


Figure 4.10 : Mise en vitesse avec $a \approx a_{\max}$

4.2. Généralisation de la mise en vitesse

4.2.1. Résultats des mesures effectuées

Un article précédent [12] a montré que, pour une valeur de n_f fixée, le temps t_m dépendait de n_i . Nous sommes donc amenés à explorer la zone de démarrage en faisant varier n_i et nous recherchons le temps t_m nécessaire pour atteindre différentes vitesses situées dans la zone d'entraînement. Cela correspond à des trajets IF distincts (figure 4.1) mais qui doivent toujours être parcourus dans un temps minimal, sans qu'il y ait perte de pas. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau III.

Nous constatons que même avec a très faible, on ne peut dépasser une vitesse de 220 pas par seconde, quelle que soit la valeur de n_i . Ce régime correspond donc à la limite de la zone d'entraînement pour la charge considérée.

Ces mesures ne présentent pas de difficultés en elles-mêmes, si ce n'est que certaines mises en vitesse sont très lentes. Comme il faut, pour chaque régime, détecter la valeur maximale de a , le résultat final est atteint, dans ces cas-là au bout d'un temps très long.

Nous récapitulons les résultats obtenus en représentant graphiquement t_m en fonction de n_f , pour différentes valeurs de n_i (figures 4.11, 4.12 et 4.13). Ce phénomène est d'autant mieux mis en évidence si l'on représente les variations de t_m en fonction de n_i , pour différentes valeurs de n_f (figure 4.14).

Tableau III

$n_i = 3 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,730
125	0,910
150	1,081
175	1,255
200	1,430

$n_i = 5 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
50	0,187
75	0,296
100	0,403
125	0,508
150	0,610
175	0,719
200	0,816
220	0,905

$n_i = 7 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,321
125	0,405
150	0,491
175	0,576
200	0,655

$n_i = 8 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,254
125	0,321
150	0,390
175	0,457
200	0,530



Tableau III (suite)

$n_i = 9 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,341
125	0,439
150	0,538
175	0,643
200	0,743

$n_i = 10 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
50	0,236
75	0,386
100	0,545
125	0,696
150	0,853
175	1,031
200	1,198
220	1,343

$n_i = 11 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,613
125	0,787
150	0,957
175	1,118
200	1,279

$n_i = 12 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,399
125	0,506
150	0,613
175	0,715
200	0,816



Tableau III (suite)

$n_i = 15 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
50	0,071
75	0,137
100	0,193
125	0,250
150	0,304
175	0,364
200	0,443
220	0,554

$n_i = 20 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
75	0,078
100	0,124
125	0,163
150	0,201
175	0,279
200	0,384
220	0,522

$n_i = 25 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,068
125	0,107
150	0,140
175	0,177
200	0,306
220	0,451

$n_i = 30 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
100	0,056
125	0,086
150	0,117
175	0,203
200	0,33
220	0,554

Tableau III (fin)

$n_i = 35 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
75	0,028
100	0,065
125	0,094
150	0,183
175	0,228
200	0,350
220	0,568

$n_i = 40 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
75	0,054
100	0,099
125	0,139
150	0,219
175	0,272
200	0,386
220	0,591

$n_i = 45 \text{ pas/s}$

$n_f(\text{pas/s})$	$t_m(\text{s})$
50	0,037
75	0,224
100	0,421
125	0,636
150	0,821
175	1,031
200	1,267
220	1,385



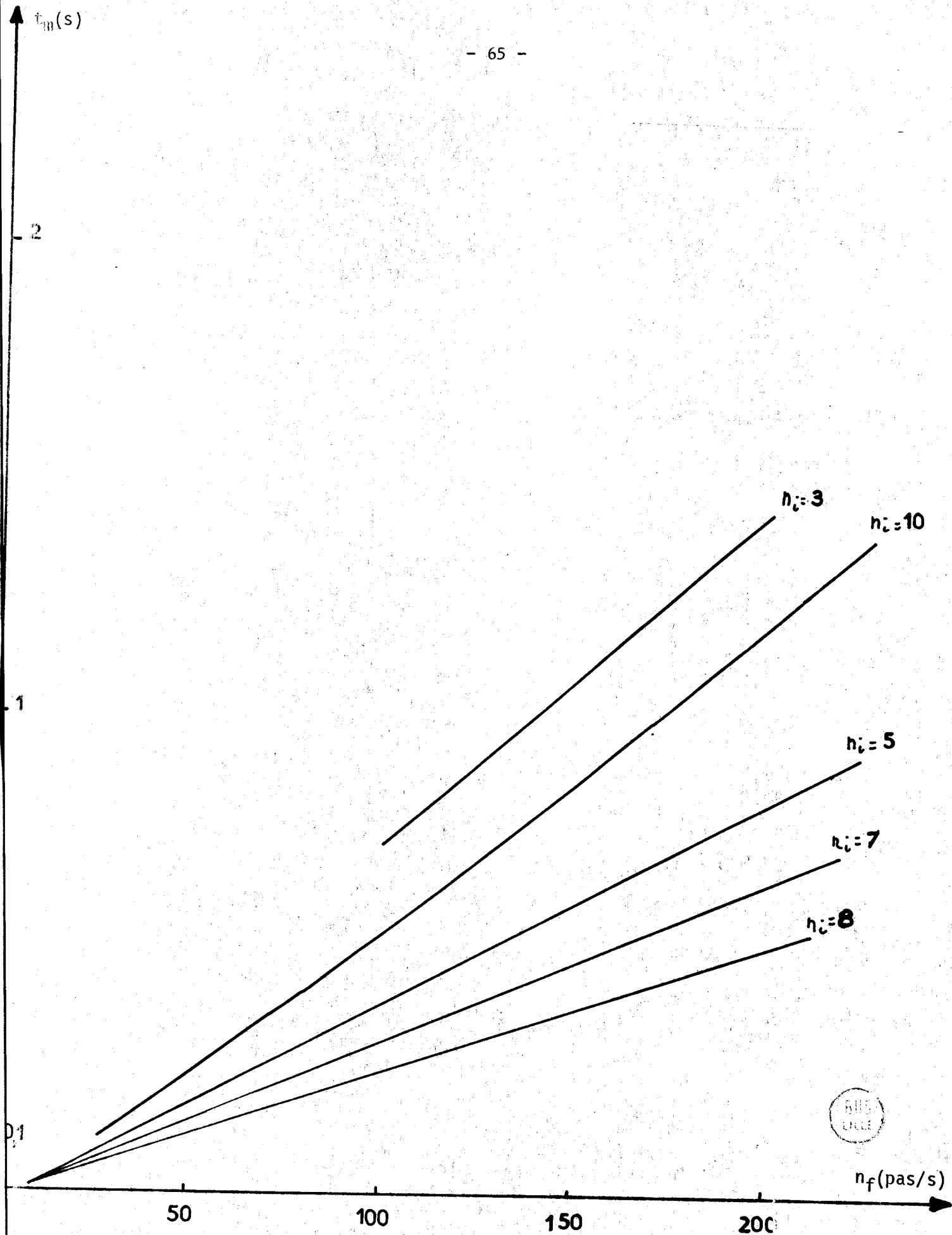


Figure 4.11: $t_m(n_f)$ pour $n_i = 3 ; 5 ; 7 ; 8$ et 10 pas/s

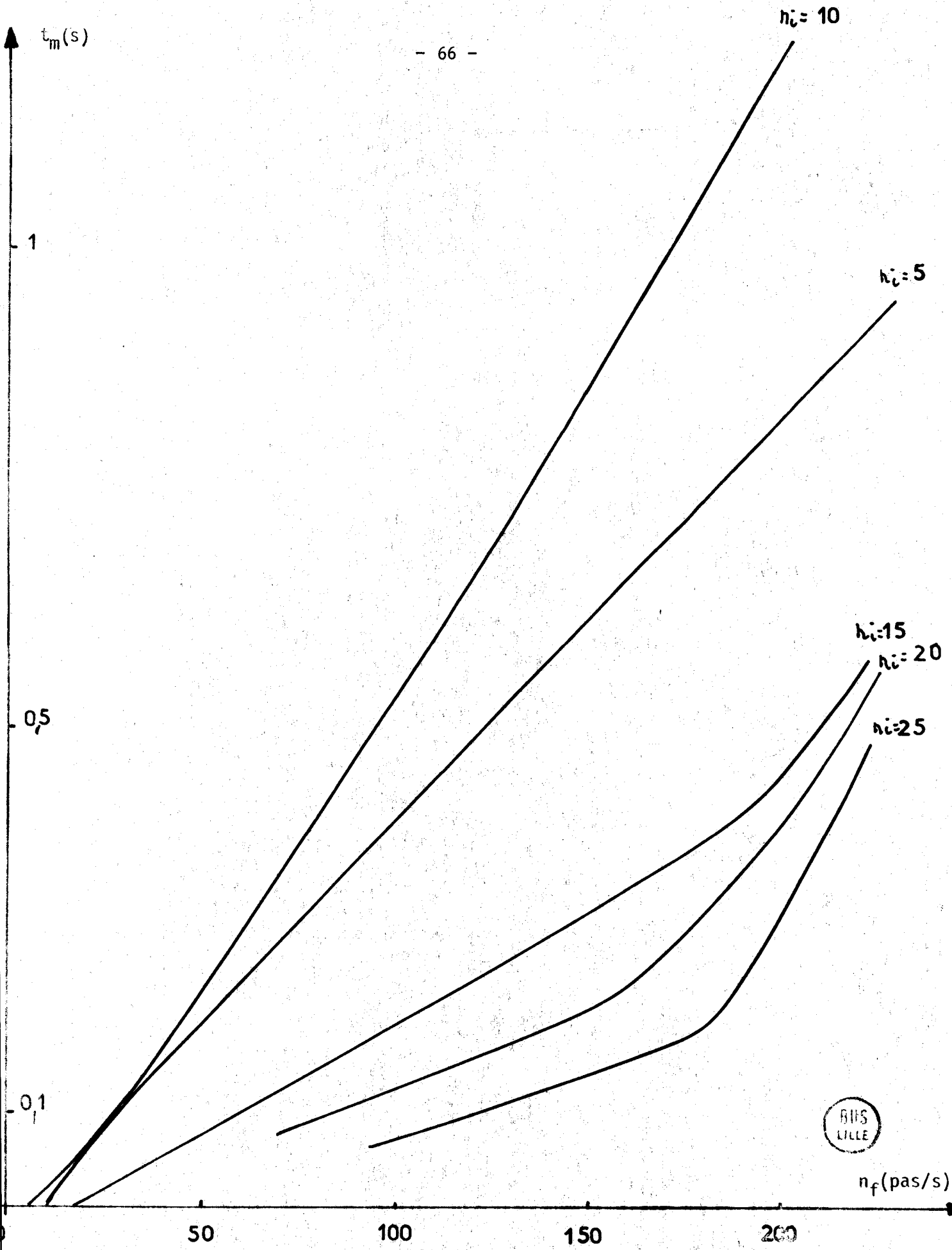


Figure 4.12 : $t_m(n_f)$ pour $n_i = 5, 10, 15, 20$ et 25 pas/s

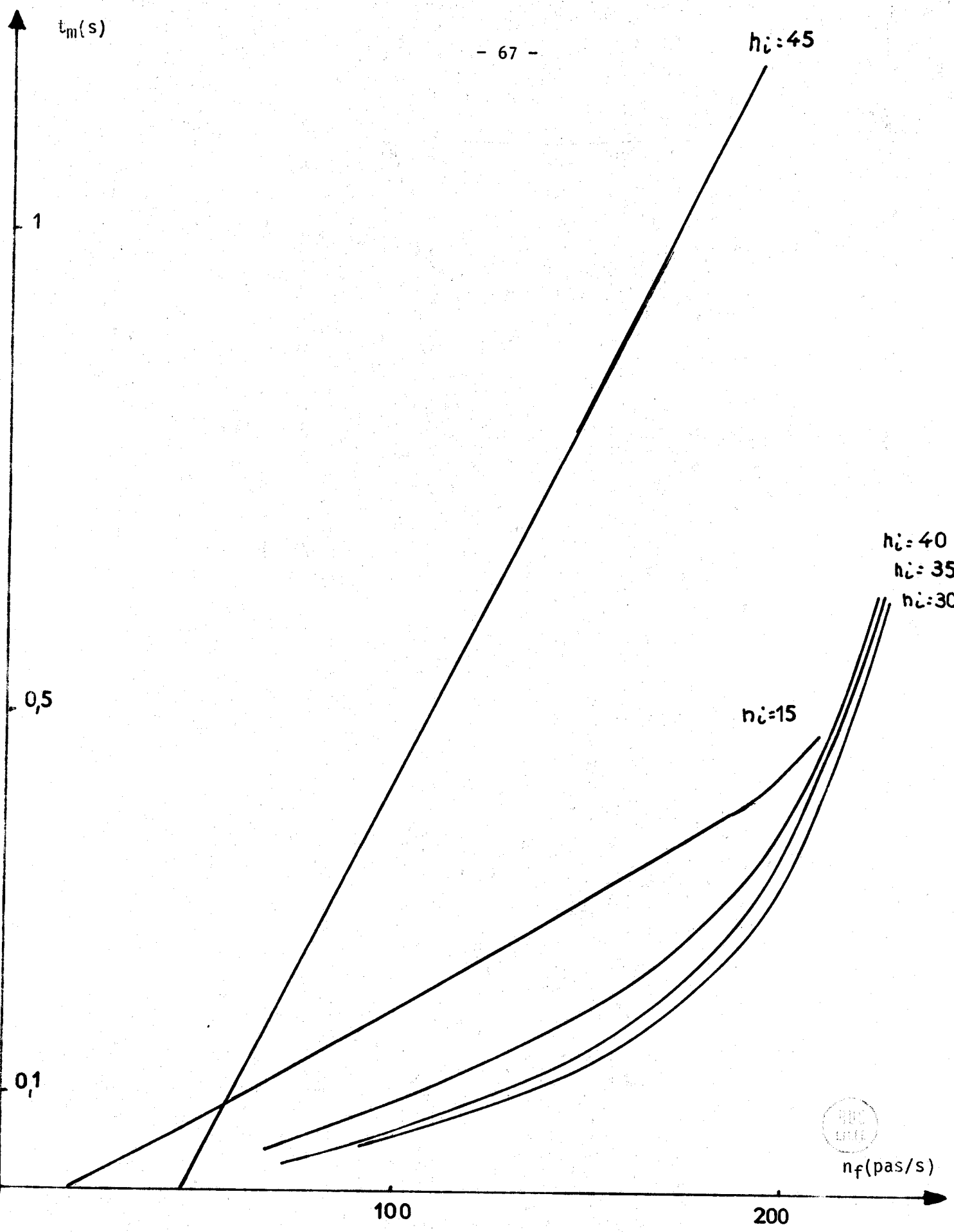


Figure 4.13 : $t_m(n_f)$ pour $m_i = 15, 30, 35, 40, 45$ pas/s

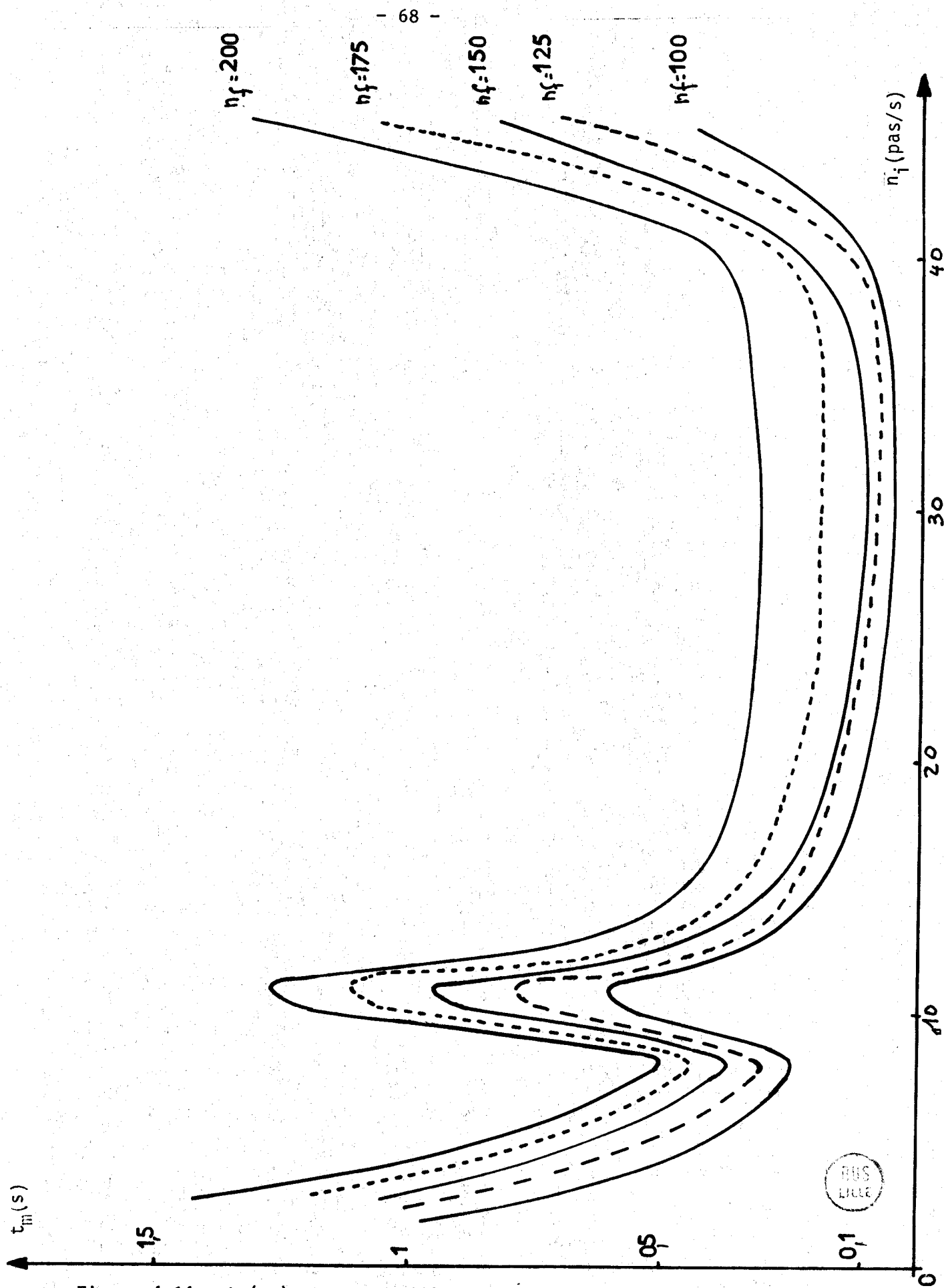


Figure 4.14 : $t_m(n_i)$ pour $n_f = 100, 125, 150, 175, 200$ pas/s

4.2.2. Conclusions

Nous obtenons des courbes d'allure semblable présentant les mêmes extrémums :

- un premier minimum correspondant à une fréquence de rotation n_{i_1} et un temps de mise en vitesse t_{m_1}
- un maximum défini par n_{i_2} et t_{m_2}
- un second minimum caractérisé par n_{i_3} et t_{m_3}

Les conclusions importantes de cette étude sont les suivantes :

- n_{i_1} , n_{i_2} et n_{i_3} sont indépendantes de n_f (pour le moteur étudié, n_{i_1} vaut 8 pas par seconde, n_{i_2} est voisine de 11 pas par seconde et n_{i_3} est sensiblement égale à 30 pas par seconde, valeur assez mal déterminée en raison du minimum qui s'étend sur une large zone).

- t_{m_1} , t_{m_2} et t_{m_3} augmentent avec n_f
- t_{m_3} est toujours inférieur à t_{m_1}

La mise en vitesse optimale qui correspond au temps t_m le plus court est alors défini par n_{i_3} et t_{m_3}

Il existe donc pour le moteur et la charge étudiés une fréquence optimale de démarrage qui vaut 30 pas par seconde.

4.3. Loi linéaire de mise en vitesse optimale pour un parcours donné effectué dans la phase d'accélération

4.3.1. Choix de la vitesse initiale

Nous choisissons trois valeurs de n_i :

- $n_i = 7$ pas par seconde, voisine de n_A , limite d'arrêt sur le pas ;
- $n_i = 45$ pas par seconde, proche de n_B , et donc à la frontière de la zone de démarrage ;
- $n_i = 30$ pas par seconde correspondant au régime optimal mis en évidence au paragraphe 4.2.

Considérons les courbes (figure 4.15) représentant les variations de t_m , temps de mise en vitesse correspondant à l'accélération maximale, en fonction de la fréquence finale n_f à atteindre, et cela pour les trois régimes envisagés. Il est bien évident que nous aurions pu illustrer notre exposé en prenant d'autres valeurs de n_i à condition toutefois de considérer le régime optimal de 30 pas par seconde ; les deux autres valeurs ont été choisies car elles illustrent les limites mises en évidence sur la figure 4.1

La figure 4.15 permet une comparaison des trois régimes étudiés. Il est intéressant d'en déduire les lois de mise en vitesse optimale lorsqu'on s'impose une valeur de n_f comprise entre 46 et 220 pas par seconde, donc une fréquence de rotation située dans la zone d'entraînement. Cela correspond à la figure 4.16, n_f étant égale à 150 pas par seconde : la loi de mise en vitesse optimale y apparait clairement.

4.3.2. Nombre de pas parcourus en un temps donné

La figure 4.15 permet de calculer le nombre de pas parcourus entre deux instants t_1 et t_2 , pour une des trois valeurs choisies pour n_i , n_f étant fixée à 150 pas par seconde

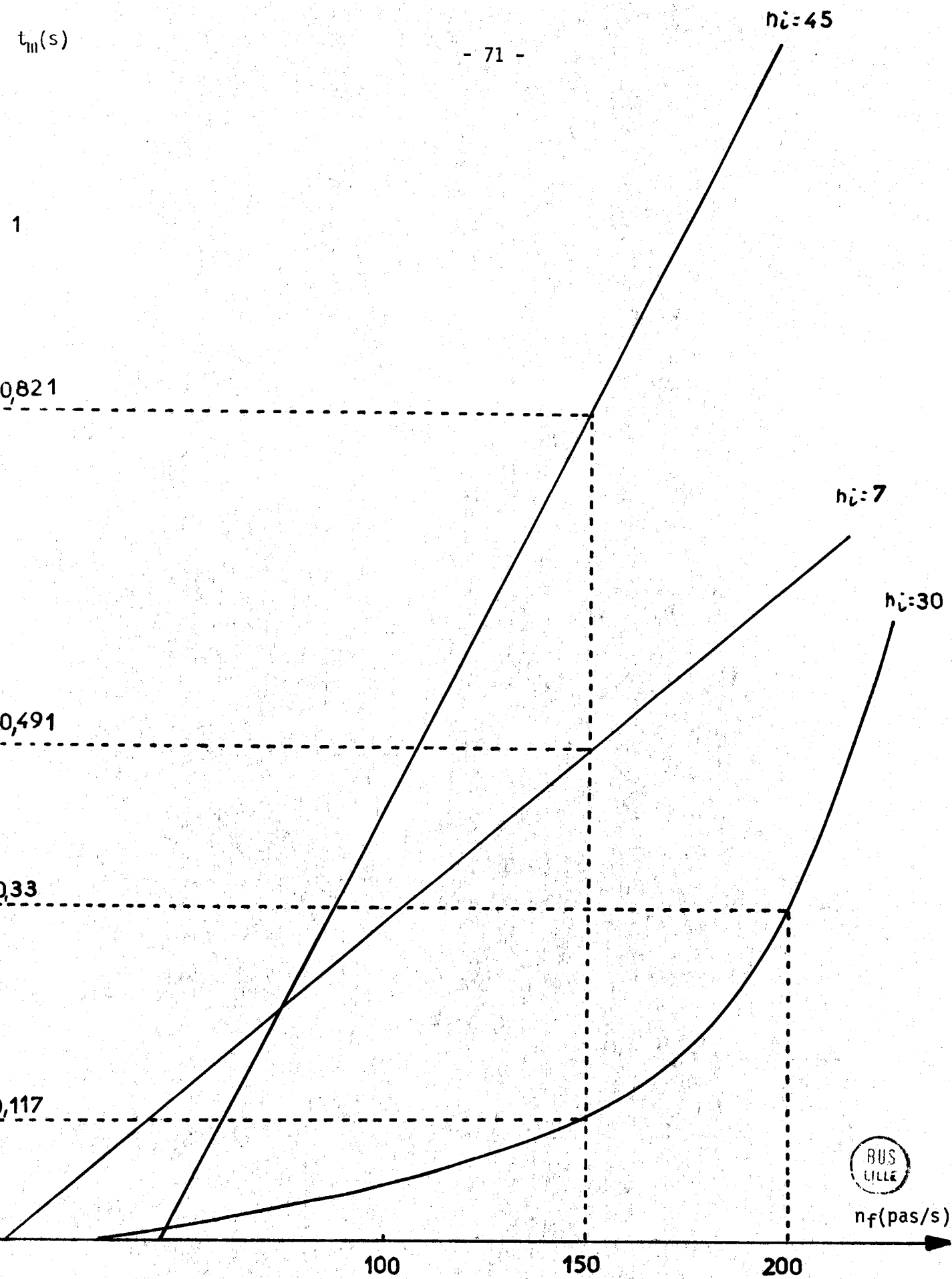


Figure 4.15. : $t_m(n_f)$ pour $n_i = 7, 30$ et 45 pas/s



\dot{n} (pas/s)

- 72 -

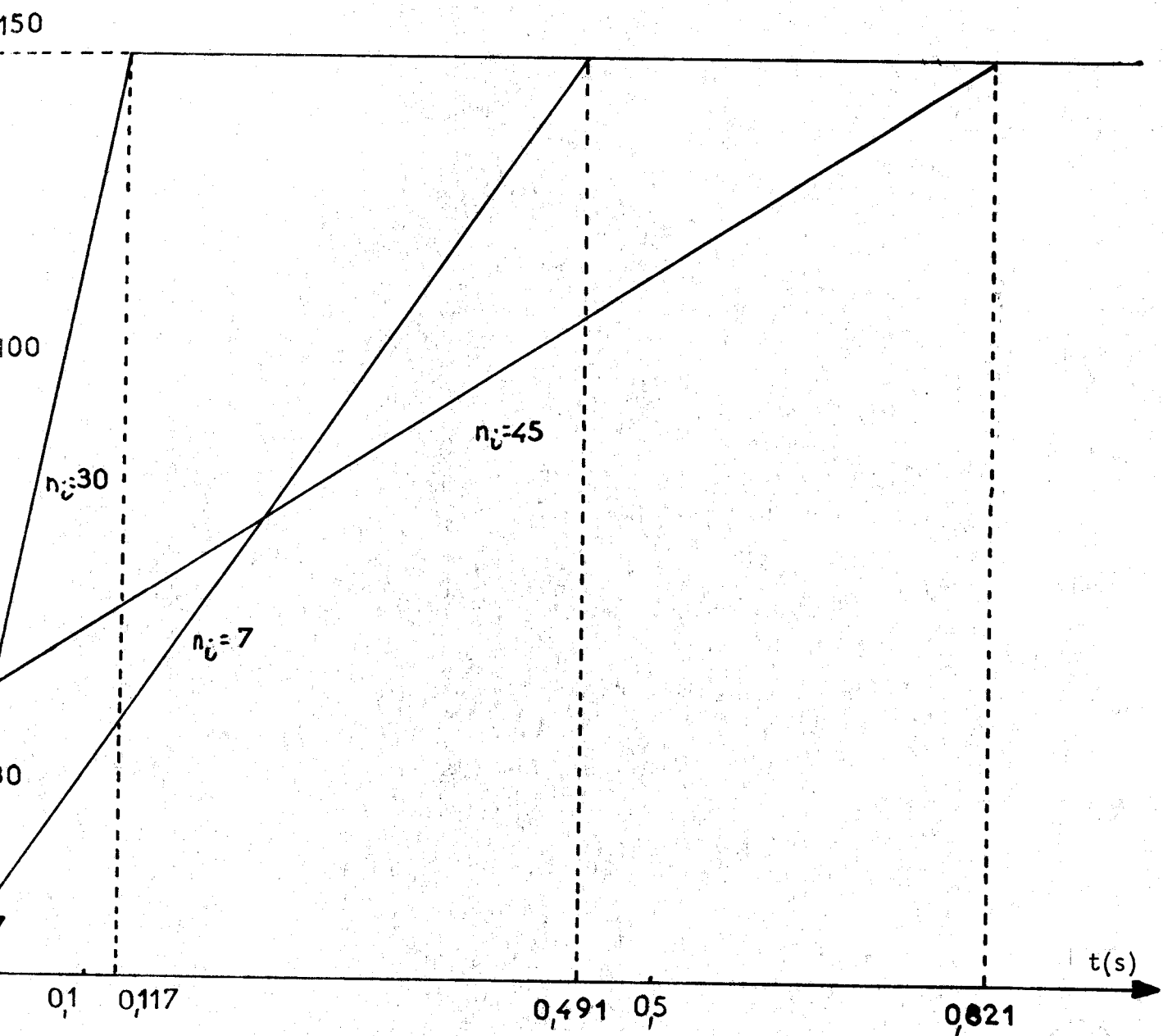


Figure 4.16 : Lois de mise en vitesse optimale pour $n_i = 7, 30$ et 45 pas/s et $n_f = 150$ pas/s

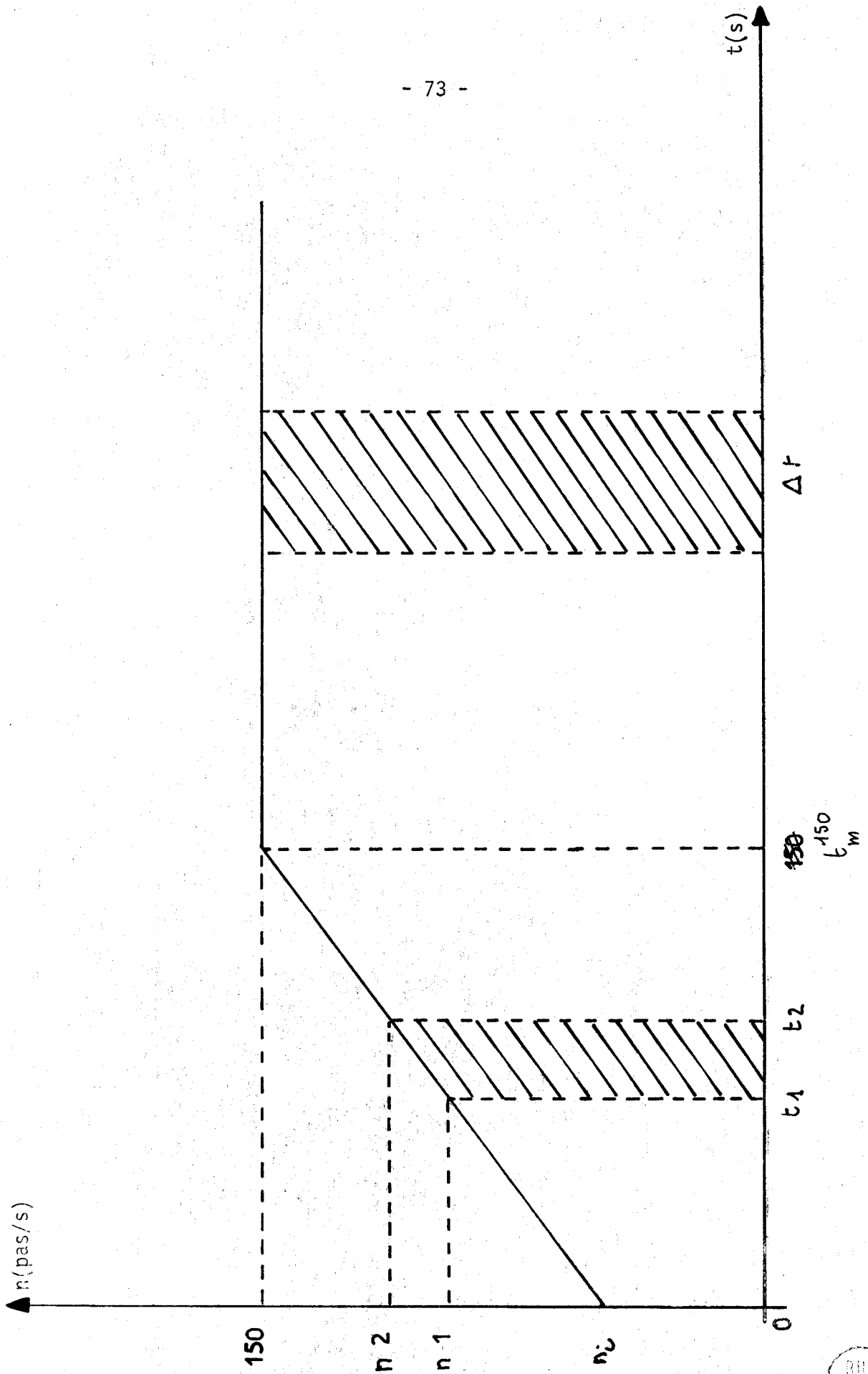


Figure 4.17 : loi de mise en vitesse pour $n_f = 150$ pas/s



Appelons t_m le temps minimal mis par le moteur pour atteindre la fréquence de rotation de 150 pas seconde (t_m^{150} dépend de la valeur n_i choisie).

Nous avons deux cas à distinguer :

- si t_1 et t_2 sont inférieurs à t_m^{150} , le nombre de pas parcourus entre les instants t_1 et t_2 est, d'après la figure 4.17 :

$$- N_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{1}{2} (n_1 + n_2)(t_2 - t_1)$$

- si t est supérieur à t_m^{150} , la vitesse est constante et égale à 150 pas par seconde et le nombre de pas parcourus pendant un intervalle de temps Δt est alors :

$$\Delta N = 150 \Delta t$$

Nous pouvons donc représenter graphiquement (figure 4.18) le nombre de pas parcourus en fonction du temps pour les trois régimes choisis. Nous mettons une nouvelle fois en évidence le régime optimal correspondant à $n_i = 30$ pas par seconde, car la valeur de N à l'instant t est maximale pour cette valeur particulière de n_i .

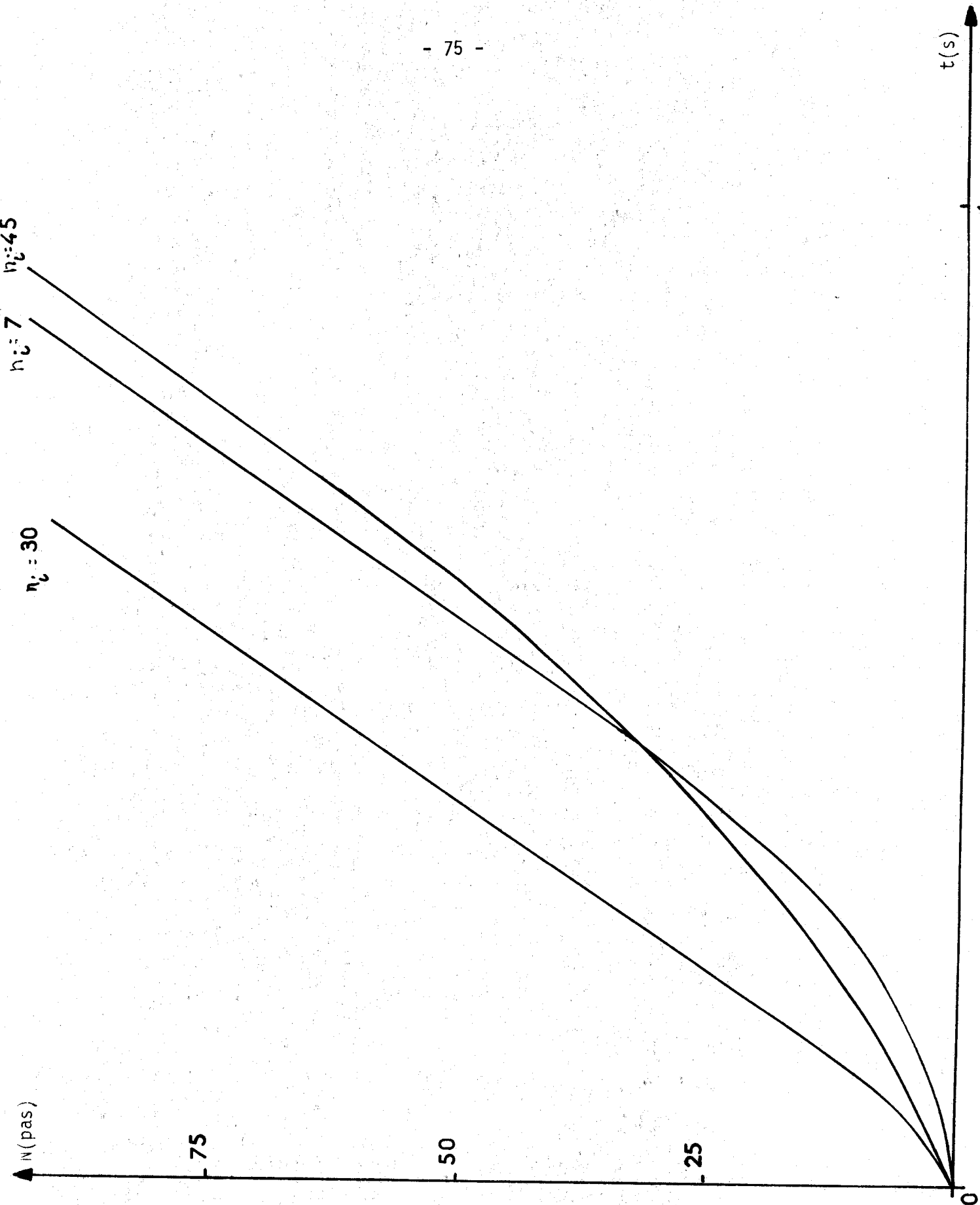


Figure 4.18 : $N(t)$ pour $n_i = 7,30$ et 45 pas/s



4.4. Généralisation

4.4.1. Lois de mise en vitesse à partir de la valeur optimale de n_i

La figure 4.19 représente différentes mises en vitesse, pour n_i fixée à 30 pas par seconde, n_f prenant les valeurs correspondant aux mesures citées au paragraphe 4.2.

Appelons t_m^{nf} le temps minimal mis par le moteur pour atteindre la fréquence de rotation n_f à partir de n_i .

Lorsque t est inférieur à t_m^{nf} , la droite représentant la loi de mise en vitesse a pour équation :

$$(4.5.) \quad n = 30 + \frac{(n_f - 30)}{t_m^{nf}} t$$

Il est donc facile de calculer les valeurs n_1 et n_2 correspondant aux temps t_1 et t_2 , et, par suite, le nombre de pas parcourus entre ces deux instants :

$$(4.6.) \quad N_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{1}{2} (n_1 + n_2)(t_2 - t_1)$$

Appelons N_{n_f} le nombre de pas parcourus jusqu'à l'instant t_m^{nf} ; n variant linéairement en fonction du temps entre 0 et t_m^{nf} , nous pouvons écrire :

$$(4.7.) \quad N_{n_f} = \frac{1}{2} (n_i + n_f) t_m^{nf}$$

Lorsque t devient supérieur à t_m^{nf} , le nombre de pas parcourus est proportionnel à l'intervalle de temps correspondant ; la courbe représentant N en fonction du temps est alors une droite d'équation :

$$(4.8.) \quad N = N_{n_f} + n_f(t - t_m^{nf})$$

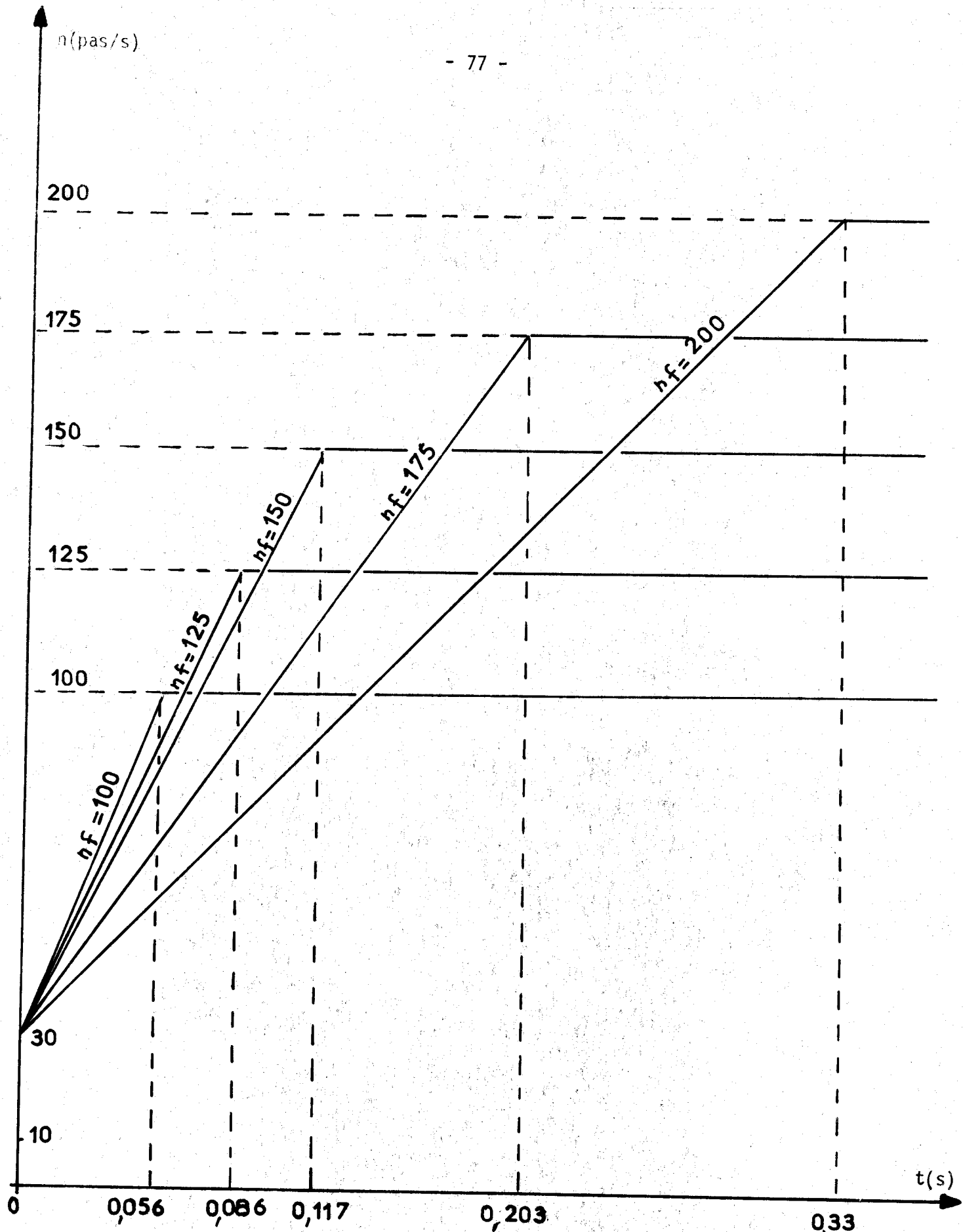


Figure 4.19 : Lois de mise en vitesse optimale pour $n_i = 30$ pas/s et $n_f = 100, 125, 150, 175$ et 200 pas/s



Les résultats ont été représentés graphiquement pour $n_f = 100, 125, 150, 200$ et 220 pas par seconde (figure 4.20 et 4.21). L'étude de ces courbes nous permet de définir le régime optimal d'accélération.

4.4.2. Choix du régime optimal suivant le nombre de pas à parcourir | 13 |

Ce régime optimal correspond à un nombre N maximal de pas parcourus pendant un temps donné. Les figures 4.20 et 4.21 montrent que :

- si N doit rester inférieur ou égal à 6 pas, nous devons fixer n_f à 100 pas par seconde
- si N doit être compris entre 7 et 10 pas, le régime optimal correspond à $n_f = 125$ pas par seconde
- si N doit être compris entre 11 et 39 pas, il faut fixer n_f à 150 pas par seconde
- si N doit être compris entre 40 et 80 pas, le régime optimal correspond à n_f égale à 175 pas par seconde
- si N doit être compris entre 80 et 217 pas, il faut fixer n_f à 200 pas par seconde et au delà de 217, n_f à 220 pas par seconde.

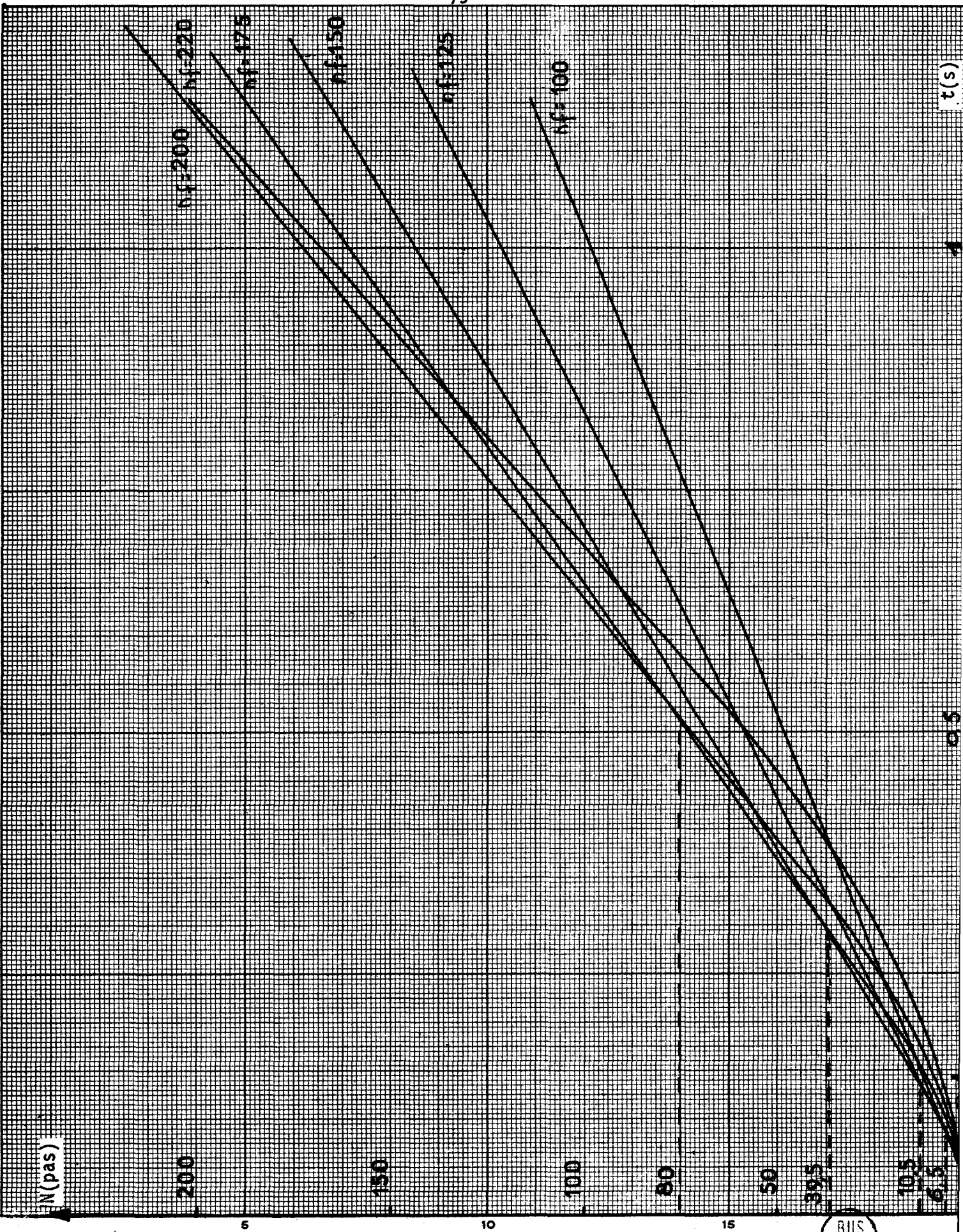


Figure 4.20 : $N(t)$ pour différentes valeurs de n_f

BUS
LILLE

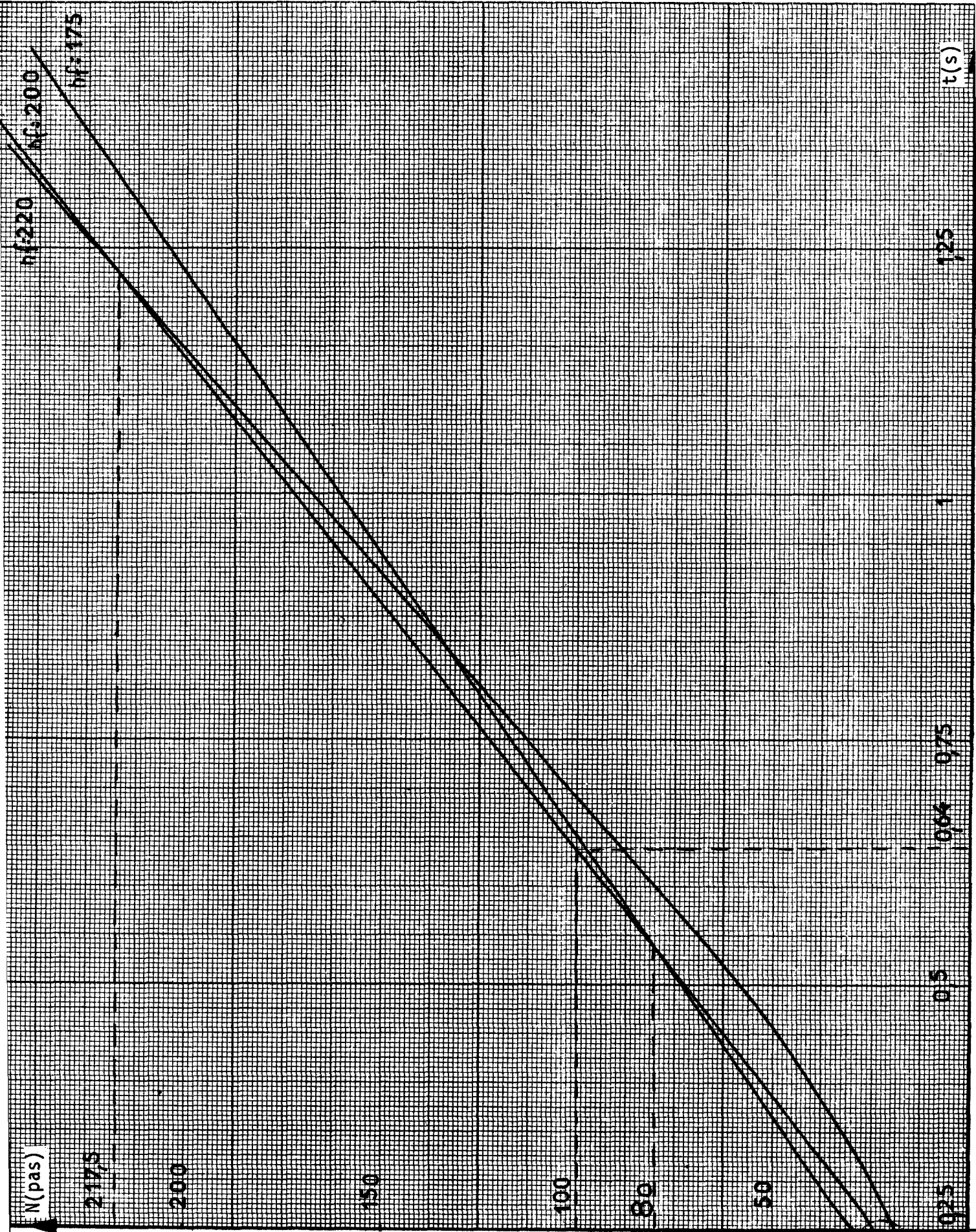


Figure 4.21 : $N(t)$ pour $n_f = 175, 200$ et 220 pas/s



Ces conclusions, très importantes, seraient plus précises si on avait fixé davantage de valeurs de n_f et donc obtenu plus de lois de mise en vitesse. Nous résumons ces résultats dans le tableau suivant :

<u>REGIME OPTIMAL D'ACCELERATION</u>	
$n_i = 30$ pas par seconde	
N (nombre de pas à parcourir)	n_f optimale (pas par seconde)
$N \leq 6$	100
$7 \leq N \leq 10$	125
$11 \leq N \leq 39$	150
$40 \leq N \leq 80$	175
$80 \leq N \leq 217$	200
$217 < N$	220

4.5. Application

Si nous désirons que le moteur tourne de 100 pas, le régime optimal consiste, d'après ce qui précède, à accélérer le moteur de n_i fixée à 30 pas par seconde à n_f égale à 200 pas par seconde. La figure 4.21 montre que le moteur aura parcouru 100 pas au bout de 0,64 seconde alors que le Tableau III et la figure 4.15 indiquent que le temps de mise en vitesse est de 0,33 seconde ; pendant 0,33 seconde le moteur accélère de 30 à 200 pas par seconde, puis tourne ensuite à la fréquence constante de 200 pas par seconde pendant 0,31 seconde.

Les figures 4.22 et 4.23 représentent l'évolution de $\phi(T)$ et $\dot{\phi}(T)$. Les 100 commutations sont atteintes au bout du temps $t = 0,62$ seconde, ce qui confirme le résultat précédent obtenu à partir du calcul du nombre de pas.

D'autre part, d'après la relation (3.12), la distance parcourue est :

$$d_{100} = 3(\phi^{100} - \phi^0) + (100 - 1)$$

soit

$$d_{100} = 3(0,462 - 0,167) + 99$$

ou

$$d_{100} = 99,9 \text{ pas}$$

La précision de ce résultat, obtenu à partir de l'enregistrement de la figure 4.22 et donc du modèle analogique, s'avère excellente.

Une méthode numérique [13] [14] permet de calculer d_{100} et aboutit à :

$$d_{100} = 100,1 \text{ pas.}$$

La coïncidence avec les valeurs précédentes est satisfaisante et permet donc de valider les résultats obtenus dans ce chapitre.

$t = 0,011 T$
 $\theta(n) = 3\phi + n - 2,5$

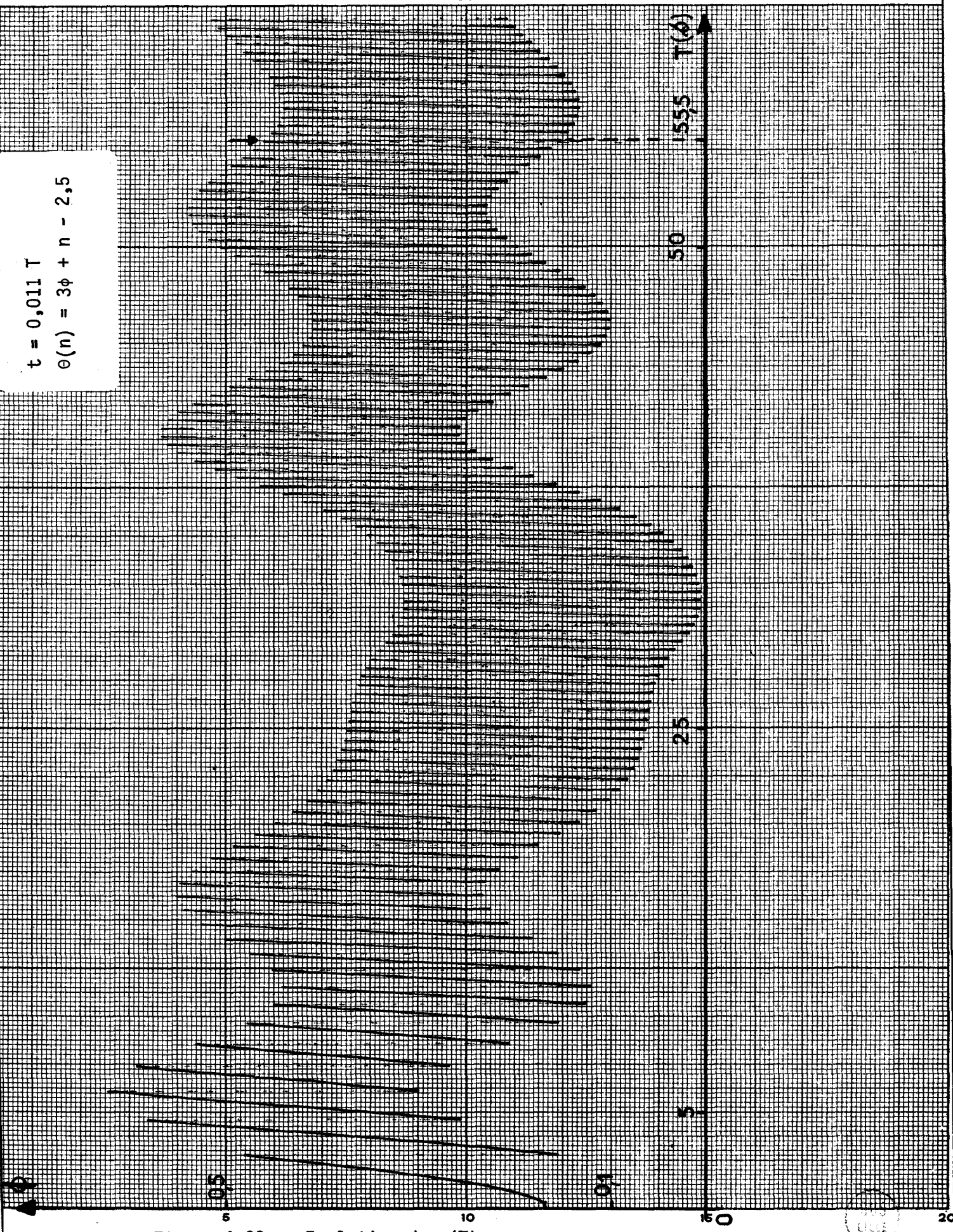


Figure 4.22 : Evolution de $\phi(\tau)$



$t = 0,011 T$
 $\dot{\phi} = 270 \dot{\phi}$

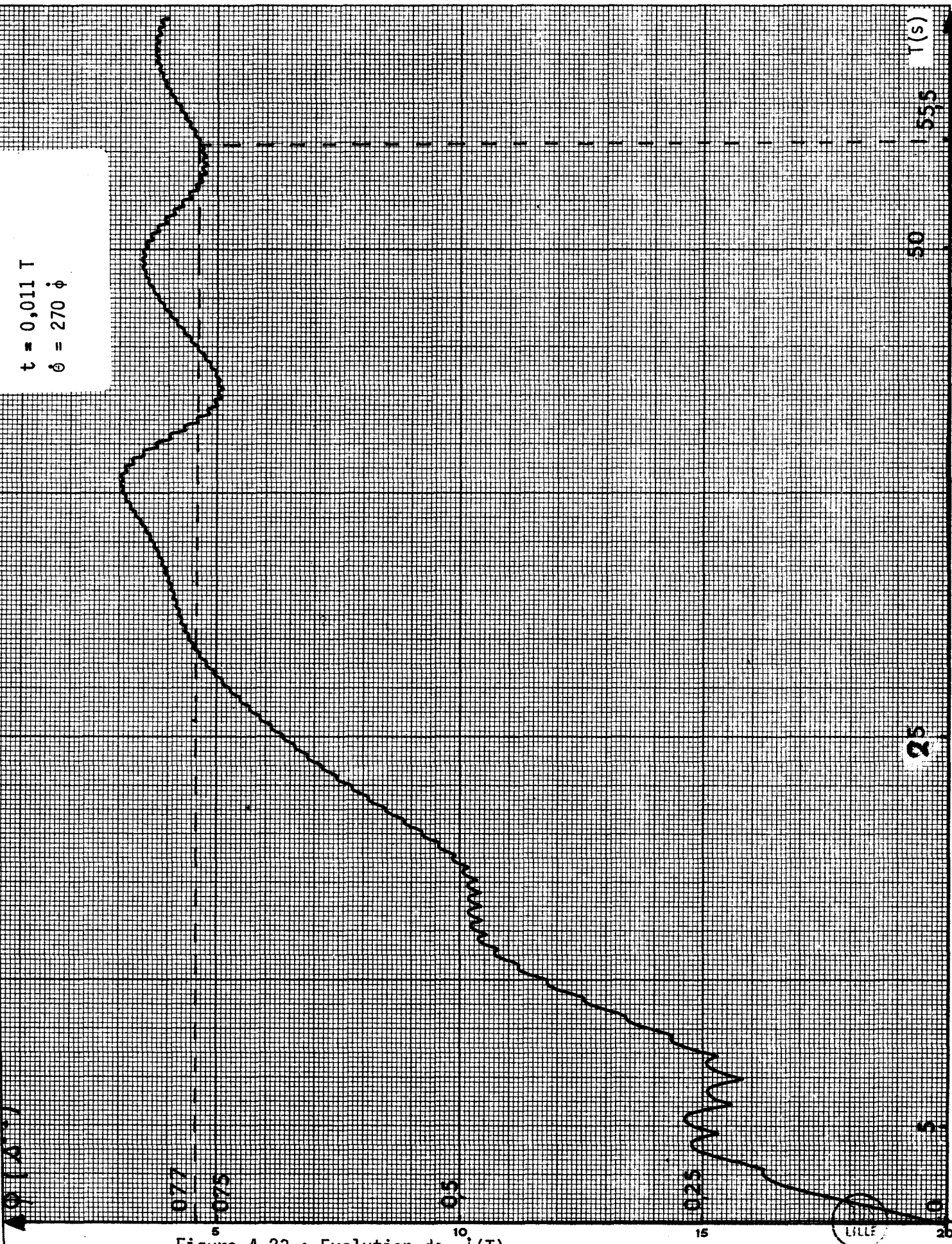


Figure 4.23 : Evolution de $\phi(T)$

4.6. Conclusion

Nous avons donc mis en évidence au régime optimal d'accélération caractérisé :

- par une fréquence optimale de démarrage
- par une fréquence d'entraînement liée au nombre de pas à franchir dans la phase d'accélération.

La distance parcourue l'est alors dans un temps minimal, et sans qu'il y ait perte de pas.

Il est impossible d'arrêter brusquement le moteur car sa fréquence de rotation se situe dans la zone d'entraînement. Il nous faut donc le ralentir jusqu'à une fréquence n_f située dans la zone de démarrage.

Pour une loi de décélération linéaire, le problème est double. Il faut, d'une part que la pente de la rampe de ralentissement ne soit pas trop élevée car il y aurait "gain de pas", le moteur tournant à une cadence plus rapide que la commutation des phases. D'autre part, il faut que cette pente soit telle que, lorsque le moteur a atteint la zone de démarrage, les valeurs de ϕ et $\dot{\phi}$ n'entraînent pas de perte de pas, la fréquence de rotation restant alors constante et égale à n_f .

Il y a donc lieu d'examiner l'influence de ces différents paramètres sur le temps mis par le moteur pour revenir dans la zone de démarrage.

CHAPITRE V

ETUDE DU RALENTISSEMENT DU MOTEUR

Nous nous proposons, dans un premier temps, de limiter la pente de décélération afin d'éviter le phénomène de "gain de pas", ce qui nous donnera une valeur limite a_{\max} que a ne devra pas dépasser.

Ensuite, le moteur étant revenu dans sa zone de démarrage, nous allons examiner son comportement pour différentes valeurs de a inférieures à a_{\max} , car celles-ci imposent certaines conditions au moment de l'entrée dans la zone à fréquence constante et, par suite, agissent sur la marche du moteur dans ce type de fonctionnement. Nous serons amenés à définir un facteur de régularité r lié aux valeurs de la position et de la vitesse à l'entrée dans la zone de démarrage, elles-même dépendant directement de a . Le choix de r imposera donc la valeur de a correspondant à un "bon fonctionnement" du moteur.

Ces éléments, combinés aux résultats du chapitre précédent, nous permettront enfin de choisir la commande et de déterminer le temps mis par le moteur pour parcourir un certain nombre de pas, correspondant à un positionnement donné.

5.1. Présentation de l'étude

La problème consiste à franchir un nombre total de pas donné que nous fixons, ici, à 200.

Le moteur a parcouru $N_1 = 100$ pas en 0,64s, sa fréquence de rotation passent de 30 à 200 pas par seconde en $t_1 = 0,33s$ puis restant constant et égale à 200 pas par seconde pendant $t_2 = 0,31s$. Après ces 100 commutations, la position et la vitesse du rotor sont caractérisées par $\phi^{100} = 0,462$ et $\dot{\phi}^{100} = 0,77s^{-1}$.

Le moteur ne peut s'arrêter brutalement car il est situé dans la zone d'entraînement et nous allons donc le soumettre à une courbe de décélération à partir de la vitesse initiale n_f de 200 pas par seconde et des conditions initiales :

$$(5.1.) \quad \phi^0 = 0,462 - 0,333 = 0,129$$

en raison du retrait de ϕ_p successif à chaque commutation et

$$(5.2.) \quad \text{et } \dot{\phi}^0 = 0,77s^{-1}$$

Il atteint ainsi une fréquence n'_f située dans la zone de démarrage après un temps t'_1 qui dépend de a et n'_f . Il lui reste donc un certain nombre de pas à parcourir à fréquence constante ; ils le seront pendant un temps t'_2 qui dépend de n'_f et du nombre de pas déjà franchis, lequel est lié aux différents éléments que nous venons de rappeler.

Le temps de parcours des 200 pas est, dans ces conditions, la somme :

$$(5.3.) \quad t_p = t_1 + t_2 + t'_1 + t'_2$$

5.2. Equation permettant d'observer le ralentissement

Pendant la phase de mise en vitesse, la grandeurs-machine ϕ reste comprise entre -1 et +1 s'il n'y a pas de perte de pas.

Pendant le ralentissement, ϕ peut dépasser la valeur +1 si le phénomène de gain de pas se produit et nous sommes donc obligés d'imposer un changement de variable tel que :

$$(5.4.) \quad \phi' = \phi - 0,5$$

L'équation (2.15) permettant la simulation du moteur devient :

$$- \ddot{\phi}' = -0,107 \sin (2\pi\phi' + \pi) + 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}' + 0,0714 \dot{\phi}'$$

soit :

$$(5.5) - \ddot{\phi}' = 0,107 \sin 2\pi\phi' + 0,0202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}' + 0,0714 \dot{\phi}'$$

Les conditions initiales sont alors :

$$(5.6.) \quad \phi'^0 = 0,129 - 0,5 = - 0,371$$

$$(5.7.) \quad \phi'^0 = 0,77 \text{ s}^{-1}$$

La formule (3.9) liant la position angulaire θ , exprimée en pas, à ϕ devient :

$$\theta = 3(\phi' + 0,5) - 1,5$$

soit :

$$(5.8) \quad \underline{\theta(\text{pas}) = 3\phi'}$$

Le raisonnement tenu en additif du chapitre 3 nous permet d'écrire la valeur de $\theta(n)$ atteinte après n commutations :

$$(5.9) \quad \underline{\theta(n) = (n-1) + 3\phi'}$$

De même, la distance parcourue après n commutations s'exprime par la relation :

$$(5.10) \quad \underline{d_n = (n-1) + 3(\phi'^n - \phi'^0)}$$

5.3. Schéma de simulation

Nous nous bornerons à indiquer les modifications apportées au montage utilisé lors de l'étude de la mise en vitesse.

5.3.1. Principe général

Les équations-machine (2.15) (utilisées pour l'accélération) et (5.5) (valable pour le ralentissement) ne diffèrent que par le signe du coefficient du terme $\sin 2\pi\phi$ ou $\sin 2\pi\phi'$. Pour générer $\sin 2\pi\phi'$ au lieu de $(-\sin 2\pi\phi)$, il suffit d'introduire en condition initiale de l'amplificateur A_5 , non plus $+1$ mais -1 , sans rien changer d'autre au montage de la figure 2.2. : la quantité $\sin 2\pi\phi'$ est alors accessible à la sortie de A_{11} .

5.3.2. Affichage des conditions initiales

Il faut introduire $-\dot{\phi}_0$ (qui n'est plus nulle) en conditions initiale de A_2 .

Pour ce qui est de ϕ_0 , nous allons changer le montage de la figure 2.4 car le mode opératoire d'affichage de ϕ_0 se décomposait en deux temps :

- $\overline{S_1} = 1$ et $\overline{a_3} = 0$: nous fixons alors la condition initiale de A_{13} à ϕ au moyen de l'interrupteur manuel ;
- $\overline{S_1} = 1$ et $\overline{a_3} = 1$: le système évolue pendant le temps T_1 et la lampe L_1 est allumée.

Or, comme la vitesse initiale n_f est élevée, T_1 est très court et il est impossible de commander pendant ce temps, et dans l'ordre voulu, les deux interrupteurs qui contrôlent $\overline{S_1}$ et les conditions initiales de A_{13} .

Nous nous affranchissons de la seconde manoeuvre en l'automatisant grâce à un interrupteur électronique conformément à la figure 5.1.

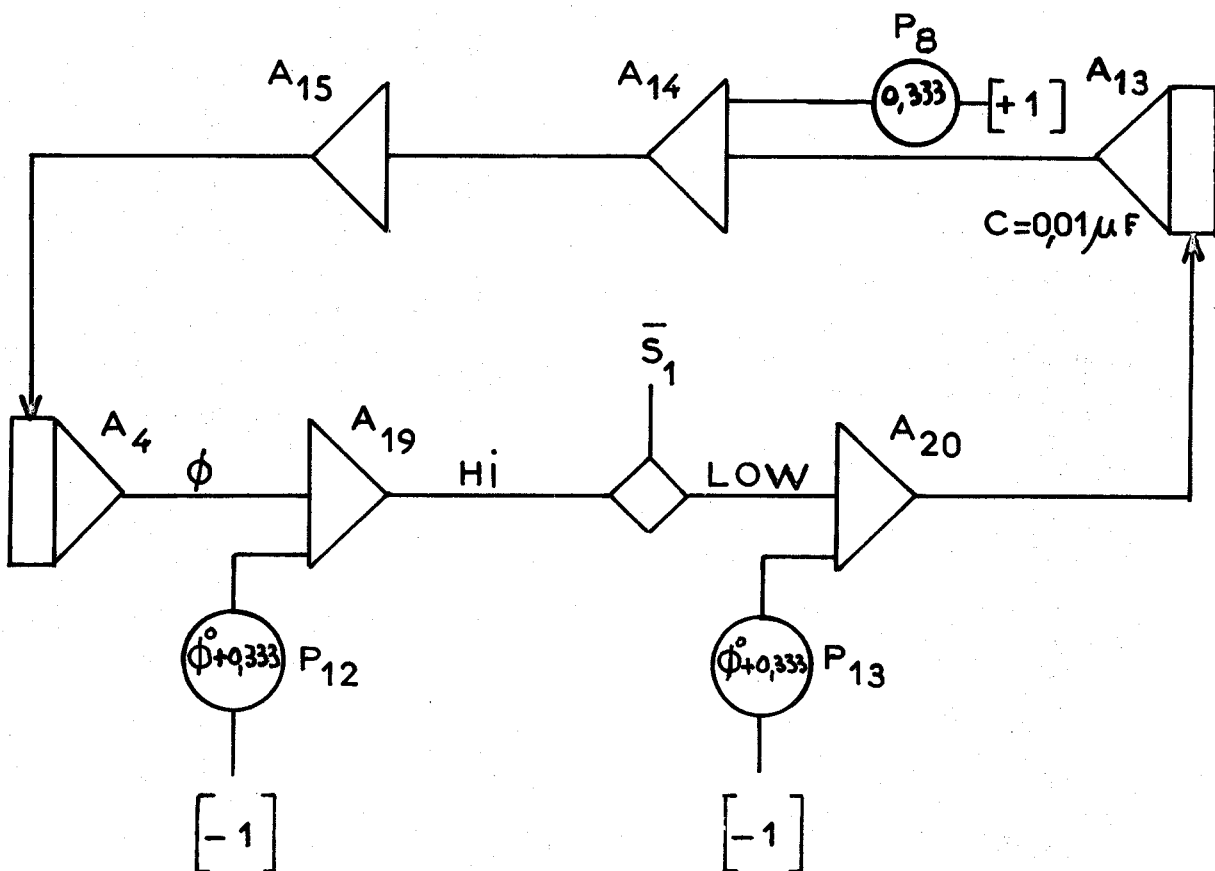


Figure 5.1. : Affichage des conditions initiales

Les commandes logiques des intégrateurs A_4 et A_{13} sont :

$$OP_4 = \overline{a_3} \overline{S_1}$$

$$R_4 = \overline{a_3} \overline{S_1}$$

$$OP_{13} = 1$$

$$R_{13} = a_3 \overline{S_1}$$

Indiquons les valeurs des grandeurs de sortie des différents amplificateurs :

a) pour $\overline{S_1} = 0$ (interrupteur ouvert), nous obtenons :

$$\phi^0 + 0,333 \text{ en } A_{20}$$

$$- \phi^0 - 0,333 \text{ en } A_{13}$$

$$\phi^0 + 0,333 - 0,333 = \phi^0 \text{ en } A_{14}$$

$$- \phi^0 \text{ en } A_{15}$$

Nous affichons ainsi ϕ^0 comme condition initiale de ϕ .

b) pour $\overline{S_1} = 1$ (interrupteur fermé), nous obtenons :

$$\phi \text{ en } A_4$$

$$-\phi + \phi^0 + 0,333 \text{ en } A_{19}$$

$$\phi - \phi^0 - 0,333 + \phi^0 + 0,333 = \phi \text{ en } A_{20}$$

$$- \phi \text{ en } A_{13}$$

$$\phi - 0,333 \text{ en } A_{14}$$

$$- \phi + 0,333 \text{ en } A_{15}$$

ce qui correspond bien au retrait de ϕ_p après chaque commutation.

Remarque : ce dispositif peut être utilisé également pour l'étude à fréquence constante ou celle de la mise en vitesse.

5.3.3. Dispositif simulant le ralentissement

Il est représenté à la figure 5.2.

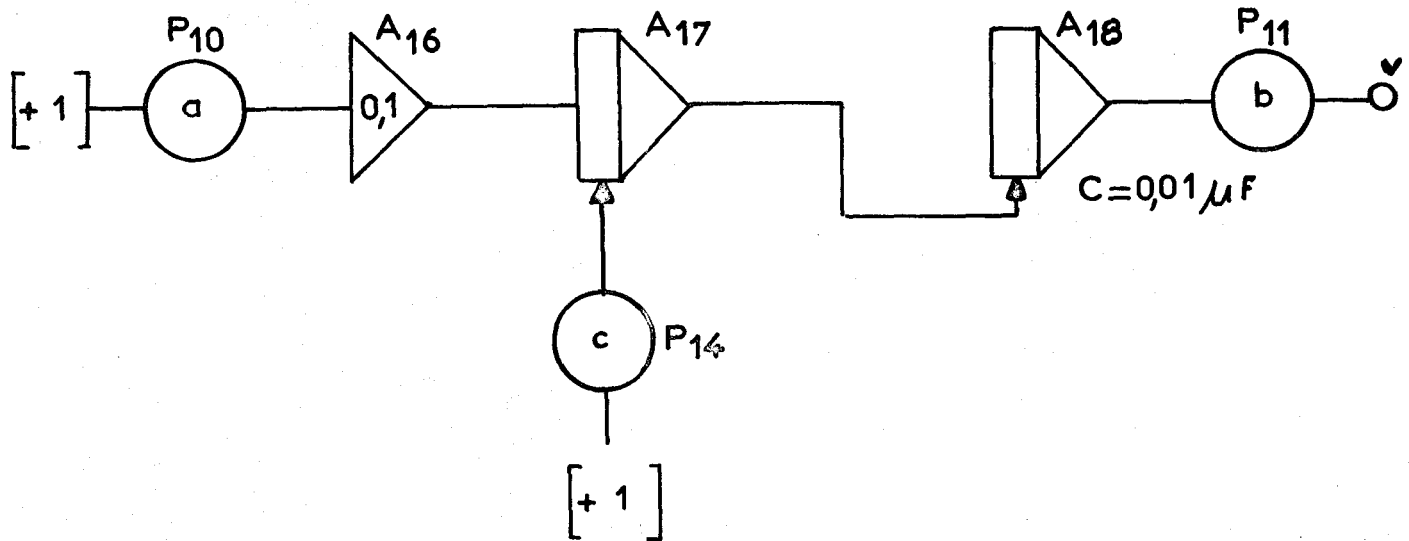


Figure 5.2. : Dispositif simulant la décélération

Les commandes logiques des intégrateurs A_{17} et A_{18} sont :

$$OP_{17} = \overline{a_3} \overline{S_1}$$

$$R_{17} = \overline{S_1}$$

$$OP_{18} = 1$$

$$R_{18} = \overline{a_3} \overline{S_1}$$

Nous avons un dispositif semblable à celui de la figure 2.5 ; en particulier, A_{17} et A_{18} fonctionnent comme lors de l'accélération. Le potentiomètre P_{14} permet un réglage facile de n_f et surtout l'étude de tout ralentissement : ainsi, n_f étant réglée à 200 pas par seconde comme l'exige le régime optimal de mise en vitesse, pour pouvoir étudier le ralentissement du moteur jusqu'à $n'_f = 45$ pas par seconde, il faut donner à c une valeur non nulle. Mais ce potentiomètre P_{14} , en imposant des conditions initiales en A_{17} et A_{18} nous amène à établir une relation entre a et le temps de ralentissement, différente de la relation (2.17).

5.4. Relation entre a et le temps t' de ralentissement

Etudions le ralentissement de 200 à 45 pas par seconde. Lorsque $\overline{S_1}$ vaut 0, la tension v doit être égale à $v_f = 1,65v$ (figure 5.3) pour que n_f soit égale à 200 pas par seconde (il est bien entendu que v_f dépend de la fréquence affichée au générateur) ; ce réglage se fait au moyen du potentiomètre P_{14} .

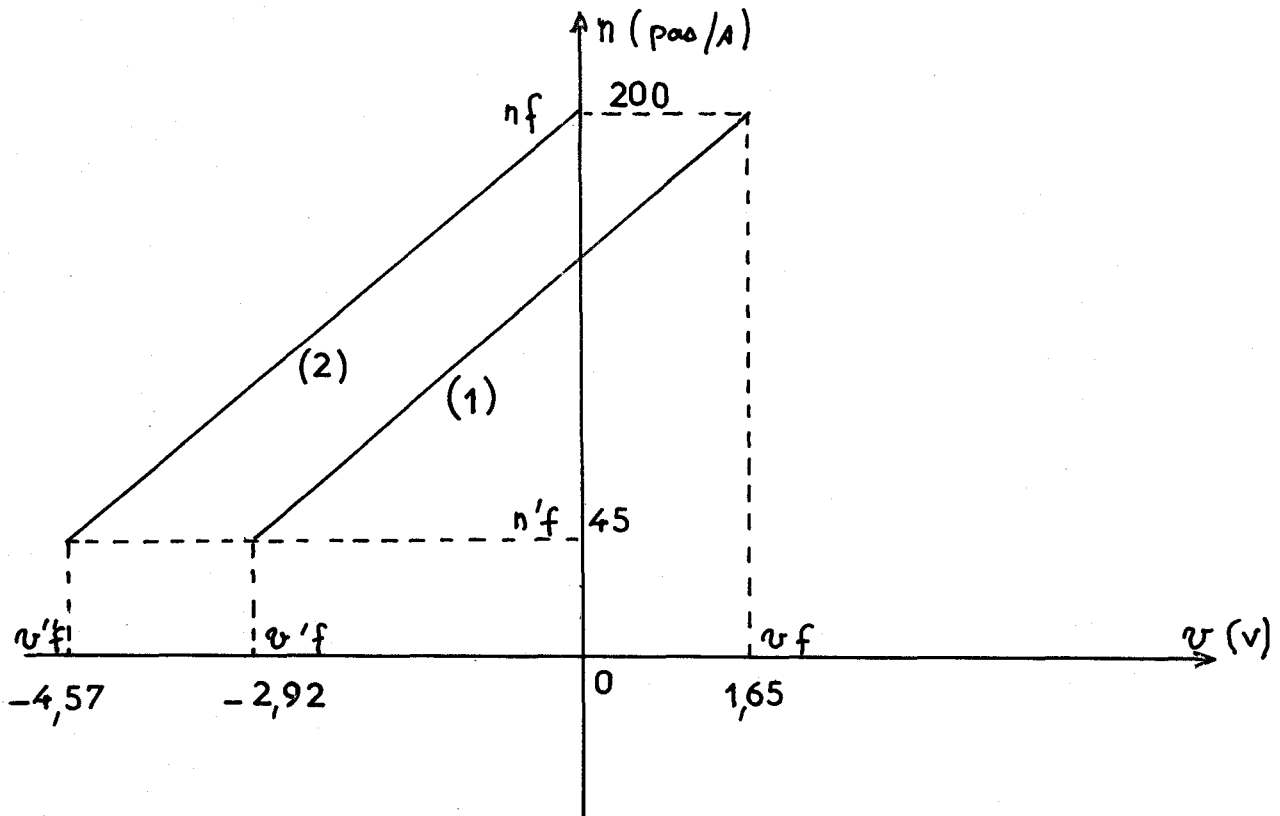


Figure 5.3. : Variation de n en fonction de v lors du ralentissement

Lorsque $\overline{S_1}$ et $\overline{a_3}$ sont fixés à 1, v doit prendre la valeur $v'_f = -2,92v$ pour que n'_f soit égale à 45 pas par seconde (les amplificateurs A_{17} et A_{18} sont alors saturés comme il a été expliqué au paragraphe 2.10) ; ce réglage se fait au moyen du potentiomètre P_{11} affiché à la valeur $b = 0,229$.

La courbe (1) de la figure 5.3. représente les variations de la fréquence de rotation en fonction de la tension imposée au générateur lors du ralentissement étudié ; elle est à rapprocher de la figure 4.2. Tout se passe comme si on avait fixé C à 0, v variant de 0 à :

$v''_f = -2,92 - 1,65$ soit $v''_f = -4,57v$, ce qui donne la représentation de la courbe (2).

v''_f correspondrait à une tension de sortie de l'amplificateur A_{18} égale à :

$$\frac{v''_f}{b} = - \frac{4,57}{0,229} = - 19,96v$$

Nous pouvons donc écrire, comme en 2.10 :

$$- 0,1 \text{ a } T' = -1,996$$

d'où :

$$t' = \frac{1,996}{0,1 \times 90} \times \frac{1}{a}$$

soit :

$$(5.11) \quad t' = \frac{0,222}{a}$$

relation analogue à (2.17), t' étant le temps de ralentissement correspondant au paramètre a .

Si a_{\max} est la valeur maximale permise pour a , le temps minimal pour que le moteur ralentisse de 200 à 45 pas/s est :

$$(5.12) \quad t'_m = \frac{0,222}{a_{\max}}$$

5.5. Régime sans gain de pas

Le montage correspondant à l'équation 5.5 permet de détecter le gain de pas. Nous cherchons donc la valeur maximale de a permise sans que ce phénomène ne se produise, n'_f prenant différentes valeurs correspondant à la zone de démarrage. Cela donne, en tenant compte de la relation (5.12) le temps minimal lors du ralentissement de 200 à n'_f pas par seconde. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant et représentés à la figure 5.4.

n'_f (pas/s)	$t'_m = \frac{0,222}{a_{\max}}$ (s)
45	0,050
40	0,054
35	0,057
30	0,060
25	0,063
20	0,066
15	0,069
10	0,072
5	0,075

En ce qui concerne ce régime, sans gain de pas, nous avons donc intérêt à choisir n'_f la plus grande possible dans la zone de démarrage, soit $n'_f = 45$ pas par seconde.



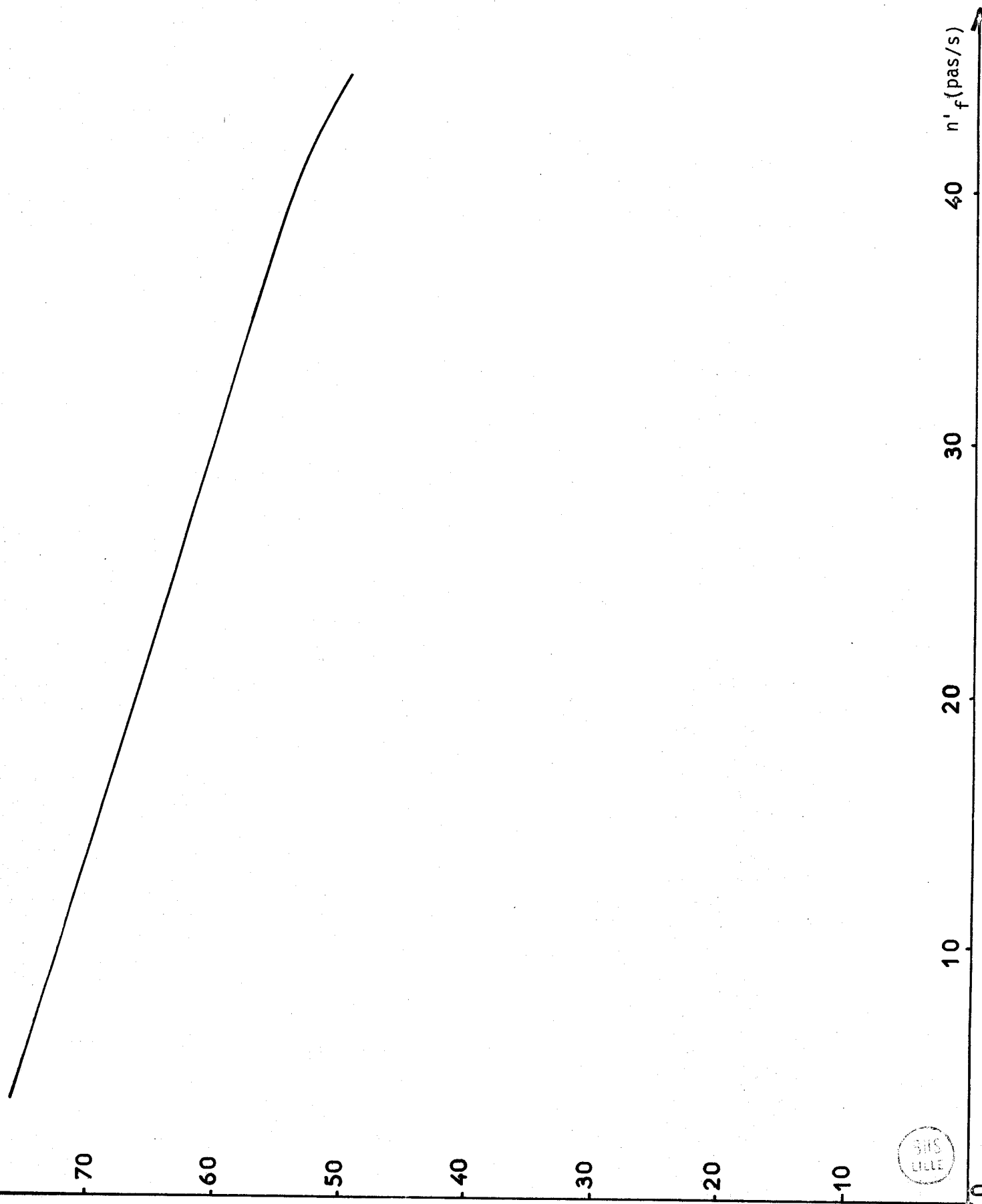


Figure 5.4. : Régimes de ralentissement de 200 à n'_f pas par seconde, sans gain de pas.

5.6. Définition du facteur de régularité

5.6.1. Enregistrements

Nous étudierons donc le ralentissement de 200 à 45 pas par seconde pour trois valeurs de a inférieures à la valeur a_{\max} correspondante. Les figures 5.5, 5.6. et 5.7. représentent la décélération pour $a = 3; 2,65$ et 2. Nous constatons des régimes troublés lorsque la fréquence de rotation est constante, c'est à dire quand le moteur est entré dans la zone de démarrage, alors que le ralentissement proprement dit ne présente pas d'anomalies. Cela est dû aux valeurs de la position et de la vitesse au moment de l'entrée dans la zone de démarrage. Or, celles-ci, pour des conditions initiales ϕ'^0 et $\dot{\phi}'^0$ données, sont liées à a .

Il nous faut donc définir un paramètre qui assure un bon fonctionnement du moteur dans cette zone et étudier ses variations en fonction de a .

5.6.2. Facteur de régularité

Si nous appelons $\overline{\phi'_{\min}}$ la plus petite variation et $\overline{\phi'_{\max}}$ la plus grande variation de ϕ' entre deux commutations seccessives, le moteur ayant atteint la zone de démarrage, nous définissons le facteur de régularité par :

$$(5.12.) \quad r = \frac{\overline{\phi'_{\min}}}{\overline{\phi'_{\max}}}$$

qui est encore égal, selon la relation (5.8) à :

$$(5.13) \quad r = \frac{\overline{\theta_{\min}}}{\overline{\theta_{\max}}}$$

où $\overline{\theta_{\min}}$ et $\overline{\theta_{\max}}$ représentent la plus petite et la plus grande variations de la position du rotor entre deux commutations successives, à fréquence constante.

$$t = 0,011 T$$
$$\Theta(n) = (n-1) + 3\phi'$$

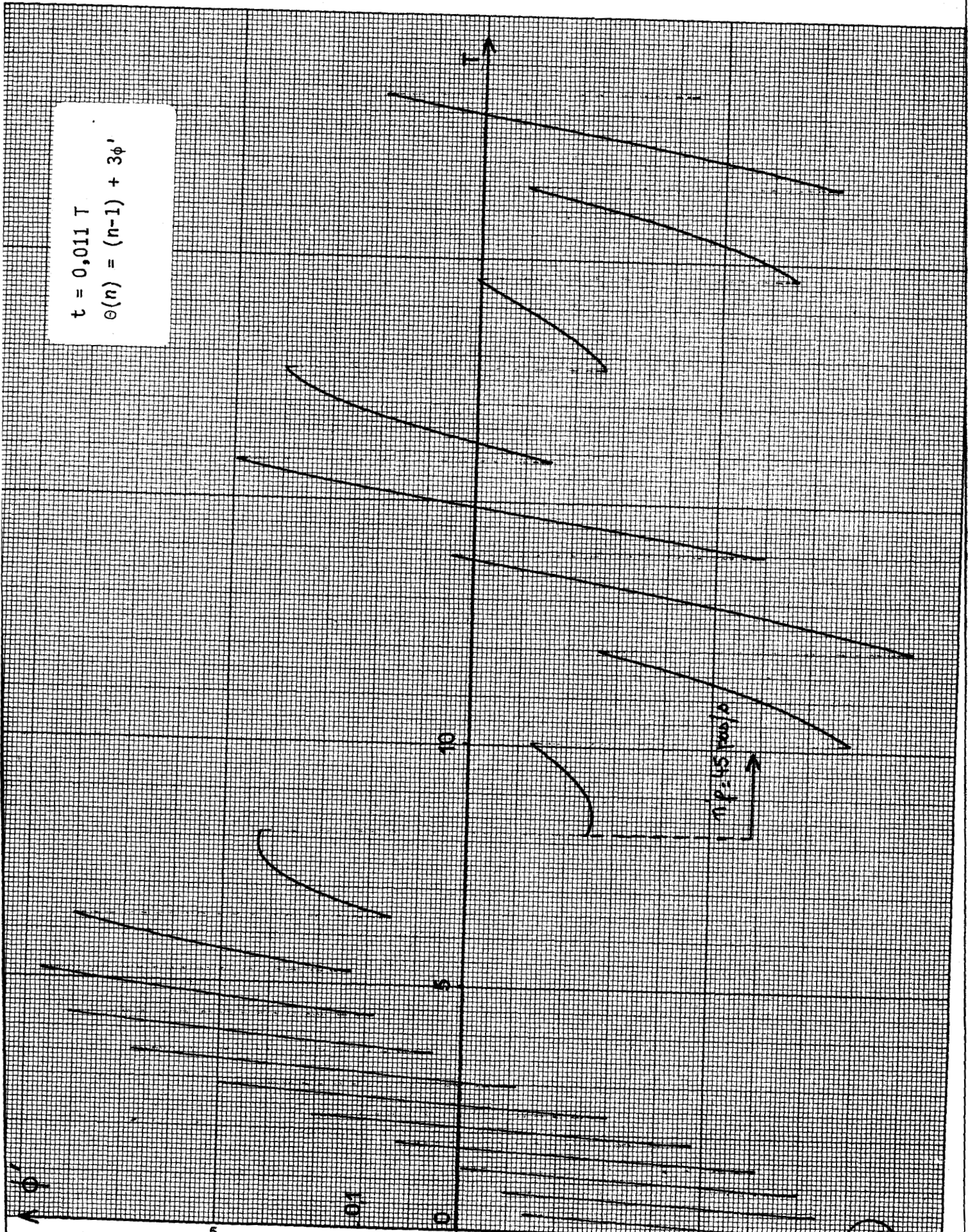


Figure 5.5. : $\phi'(t)$ lors du ralentissement pour $a = 3$



$t = 0,011 T$
 $\theta(n) = (n-1) + 3\phi'$

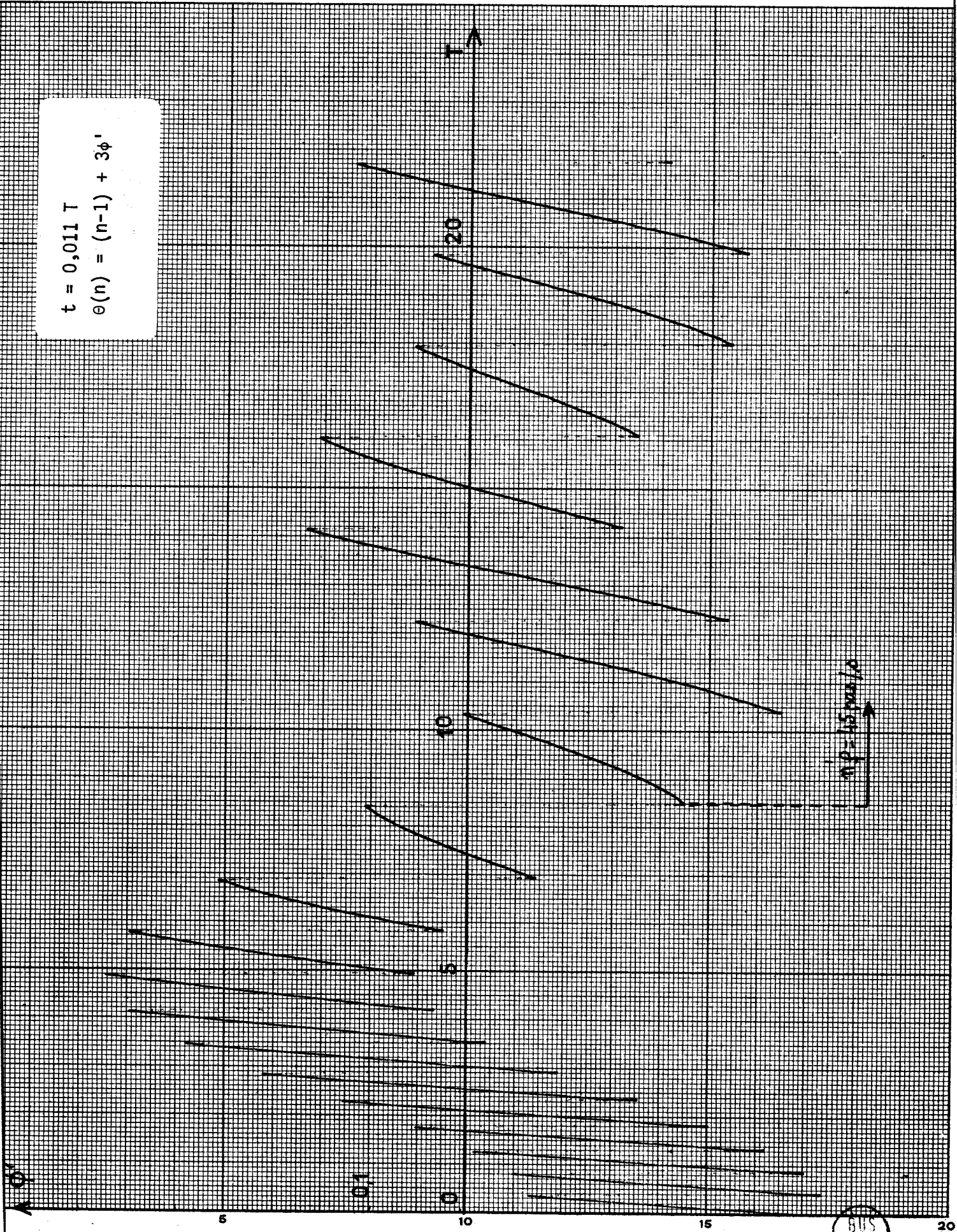


Figure 5.6. : $\phi'(t)$ lors du ralentissement pour $a = 2,65$

BUS
LILLE

$$t = 0,011 T$$
$$e(n) = (n-1) + 3\phi'$$

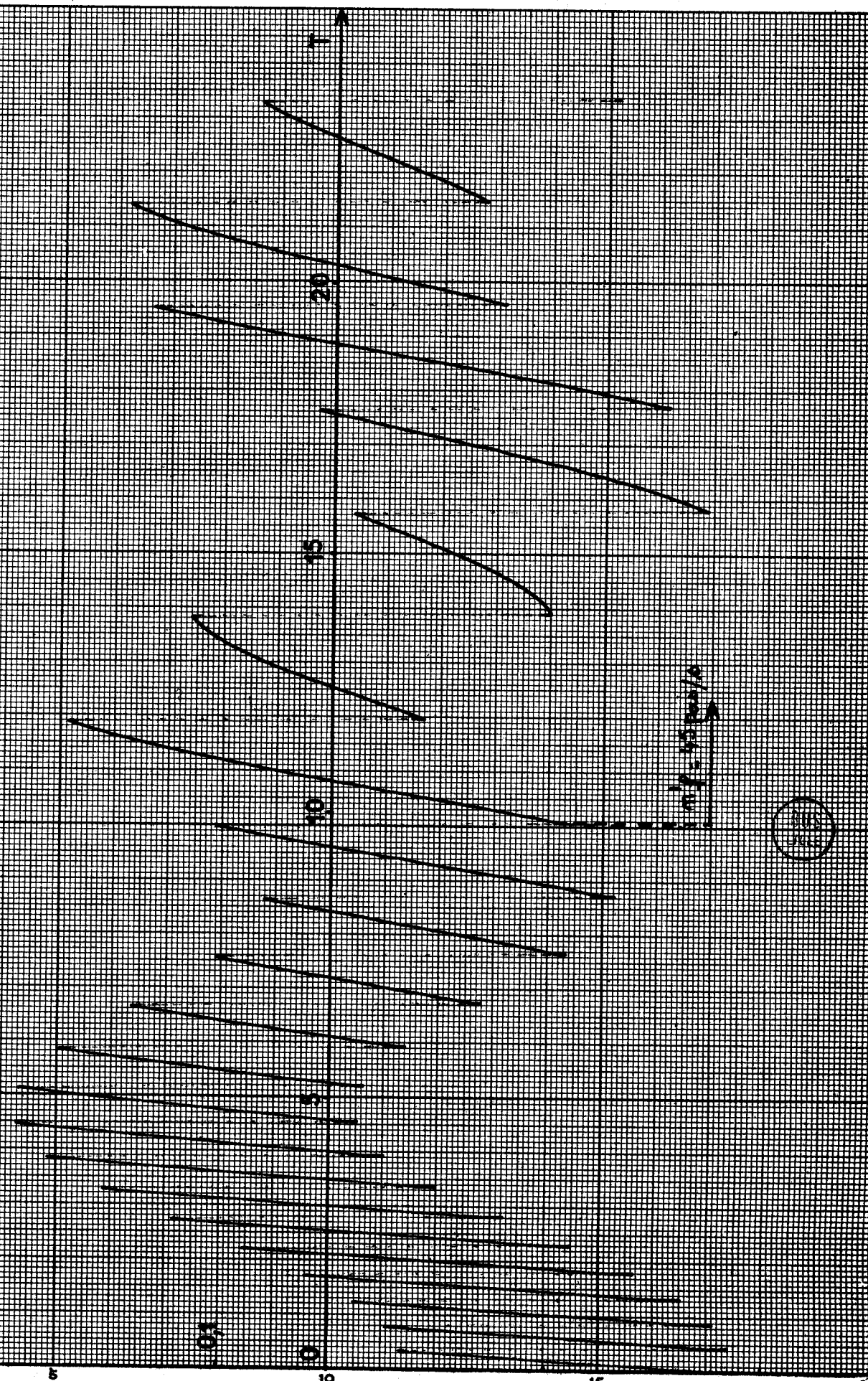


Figure 5.7. : $\phi'(t)$ lors du ralentissement pour $a = 2$

$\overline{\phi_{\min}}$ et $\overline{\phi_{\max}}$ dépendant, d'après ce qui précède, des conditions d'entrée dans la zone de démarrage, et donc de a , il en est alors de même pour r .

5.6.3. Variations du facteur de régularité en fonction de a

Nous effectuons les enregistrements correspondant à différentes valeurs de a , comme il est indiqué au paragraphe 5.6.1., et nous mesurons le rapport r correspondant. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant et représentés à la figure 5.8.

a	$r(\%)$
3,4	- 2,5
3,3	5
3,2	7
3,1	8
3	11
2,9	17
2,8	25
2,7	49
2,65	53
2,6	60
2,5	77
2,4	82
2,3	73,5
2,2	54
2,1	50
2	38,5
1,9	32
1,8	29,5

Nous constatons que r passe par un maximum ; nous devons choisir la valeur du facteur de régularité, ce choix imposant celui de a et par suite la pente de décélération.

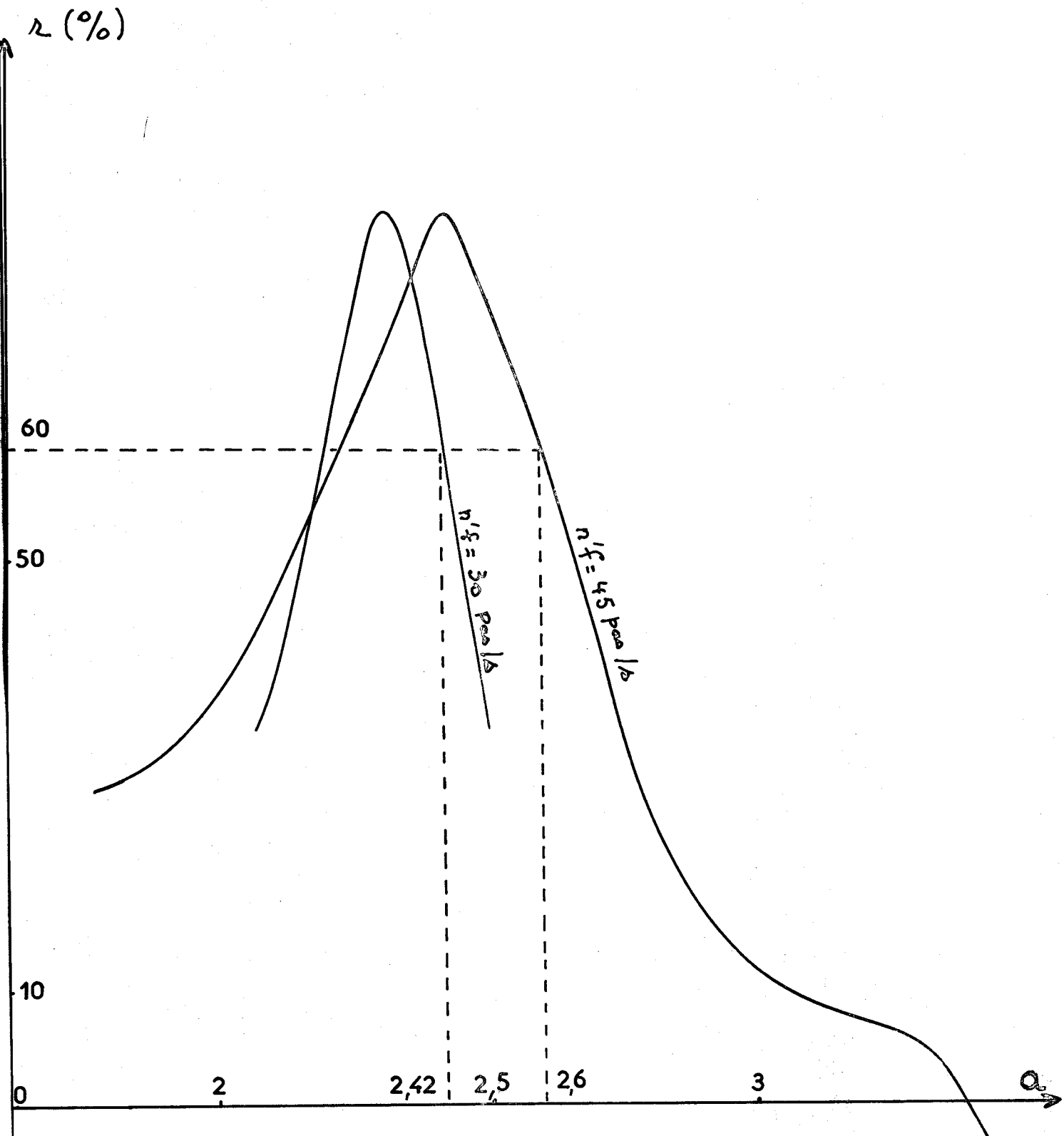


Figure 5.8. : Choix du facteur de régularité.



5.7. Choix du régime de ralentissement

5.7.1. Critère utilisé

Nous déterminons la pente de décélération, et donc la valeur de a , en fixant r à une valeur minimale, que nous choisissons égale à 60%. La figure 5.8 nous donne deux valeurs de a qui correspondent à un facteur de régularité de 60% : seule, la plus grande des deux est à considérer car elle implique un temps de ralentissement plus court.

En conclusion, lorsque le moteur aura parcouru 100 pas lors de sa mise en vitesse et qu'il tourne alors à la fréquence de 200 pas par seconde, le paramètre a doit prendre la valeur 2,6 pour que la fréquence de rotation de 45 pas par seconde soit atteinte dans le temps le plus court possible, avec un bon mode de fonctionnement défini par la valeur optimale du facteur de régularité : $r = 60\%$

5.7.2. Influence de la vitesse finale

Nous pouvons nous poser la question de savoir comment se transforme le résultat précédent lorsque nous choisissons une autre valeur de n'_f , les conditions initiales en position et en vitesse restant les mêmes. Nous avons tracé la courbe $r(a)$ pour quelques valeurs de a lorsque nous étudions le ralentissement de 200 à 30 pas par seconde. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant et représentés à la figure 5.8.

a	r (%)
2,5	33,5
2,4	65
2,3	82
2,2	66
2,1	39

La valeur de a correspondant à un facteur de régularité de 60% est de 2,42, ce qui donnerait un temps de ralentissement plus long. Le résultat est conforme à la conclusion du paragraphe 5.5. : nous avons intérêt à choisir n'_f la plus grande possible dans la zone de démarrage, soit $n'_f=45$ pas par seconde.

5.8. Temps de positionnement pour le parcours envisagé

Ce parcours comporte $N = 200$ pas, à savoir $N_1 = 100$ pas lors de la mise en vitesse et donc $N_2 = 100$ pas pour le ralentissement. Pendant le temps $t_1 = 0,33s$, la fréquence de rotation passe de 30 à 200 pas par seconde; puis pendant le temps $t_2 = 0,31s$ le moteur tourne à vitesse constante pour atteindre les 100 pas souhaités.

Comme le montre la figure 5.9, la fréquence de rotation passe de 200 à 45 pas par seconde en un temps t'_1 de 0,09s si a est égal à 2,6 ; le nombre de pas franchis est alors de 12. Il reste donc au moteur à parcourir $(100 - 12)$ soit 88 pas à la fréquence constante de 45 pas par seconde, ce qui s'effectue en un temps :

$$t'_2 = \frac{88}{45} = 1,96s$$

L'application de la formule (5.3) nous donne le temps t_p^1 nécessaire pour franchir 200 pas lors du parcours défini par $N_1 = N_2 = 100$ pas :

$$t_p^1 = 0,33 + 0,31 + 0,09 + 1,96$$

soit :

$$t_p^1 = 2,69 \text{ s}$$

La rapidité du moteur pour passer de la zone d'entraînement à la zone de démarrage, nous permet de penser qu'un parcours dissymétrique où N_1 serait supérieur à N_2 réduirait la valeur de t_p^1 .

$t = 0,011 T$
 $\theta(n) = (n-1) + 3\phi'$

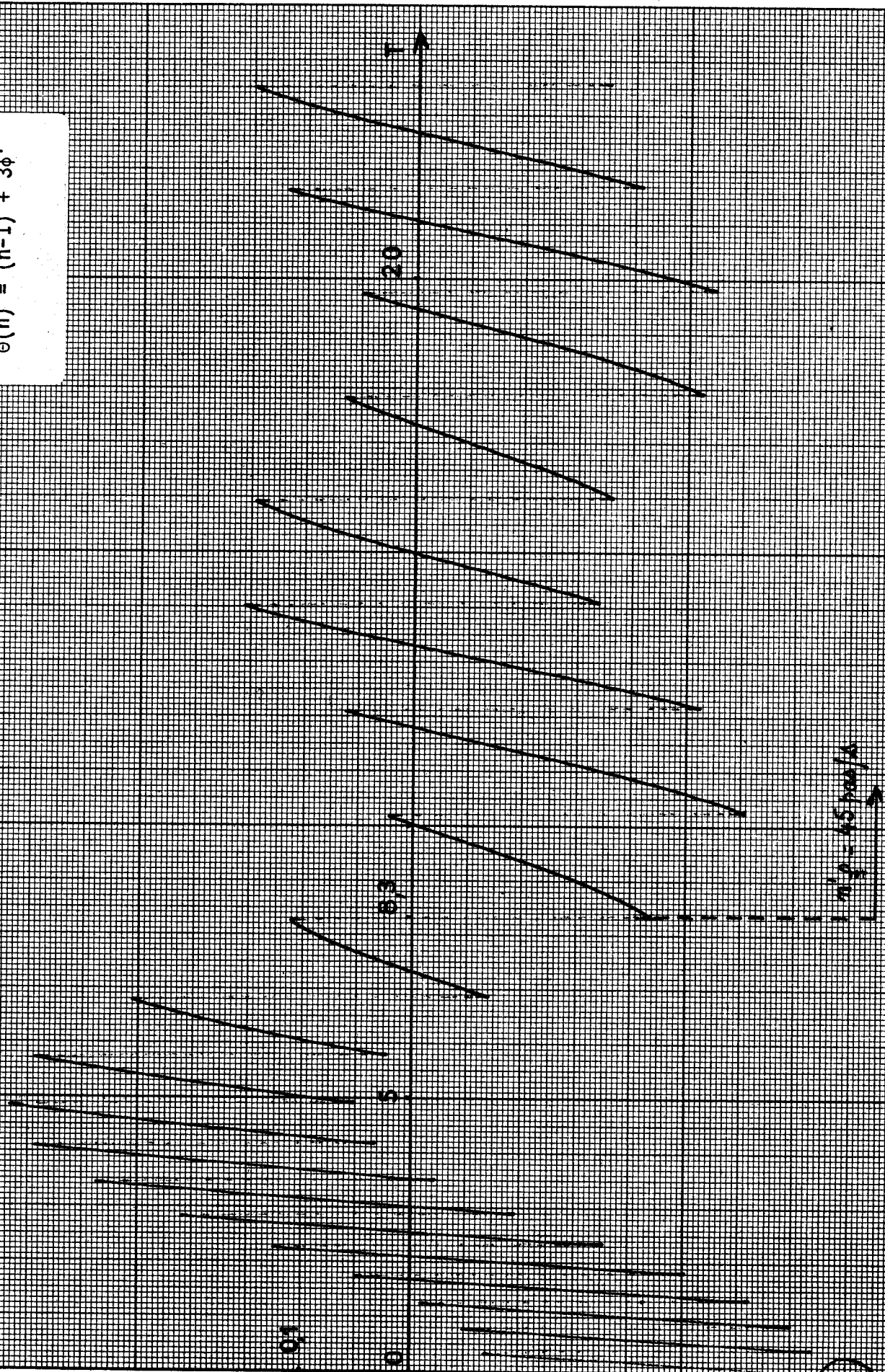


Figure 5.9. : $\phi'(t)$ lors du ralentissement pour $a = 2,6$



5.9. Cas d'un parcours dissymétrique

5.9.1. Définition du parcours

Nous choisissons $N_1 = 180$ et $N_2 = 20$ pas

Le régime optimal de mise en vitesse défini en 4.4.2. nous fixe :
 $n_i = 30$ et $n_f = 200$ pas par seconde.

Un enregistrement nous indique que les 180 pas sont parcourus en 1,05s et que la position et la vitesse après 180 commutation correspondent alors à :

$$\begin{aligned} \phi^{180} &= 0,502 \\ \text{et } \dot{\phi}^{180} &= 0,78s^{-1} \end{aligned}$$

5.9.2. Ralentissement et temps de parcours

Nous étudions la décélération de 200 à 45 pas par seconde, les conditions initiales étant les suivantes :

$$\begin{aligned} \phi'_0 &= 0,502 - 0,333 - 0,5 = - 0,331 \\ \text{et } \dot{\phi}'_0 &= 0,78s^{-1} \end{aligned}$$

Nous choisissons pour a la valeur 2,72 car l'enregistrement de la figure 5.10 nous montre que le facteur de régularité est alors égal à 62%. Le moteur a atteint la fréquence de rotation de 45 pas par seconde au bout du temps $t'_1 = 0,10s$ après avoir franchi 12 pas.

Il reste donc 8 pas à parcourir à raison de 45 pas par seconde, ce qui s'effectue en :

$$t'_2 = \frac{8}{45} = 0,18s.$$

Le temps t_p^2 de parcours est donc :

$$t_p^2 = 1,05 + 0,10 + 0,18$$

soit :

$$t_p^2 = 1,33s$$

qui est nettement inférieur à t_p^1 .

$$t = 0,011 \Gamma$$
$$\theta(n) = (n-1) + 3\phi'$$

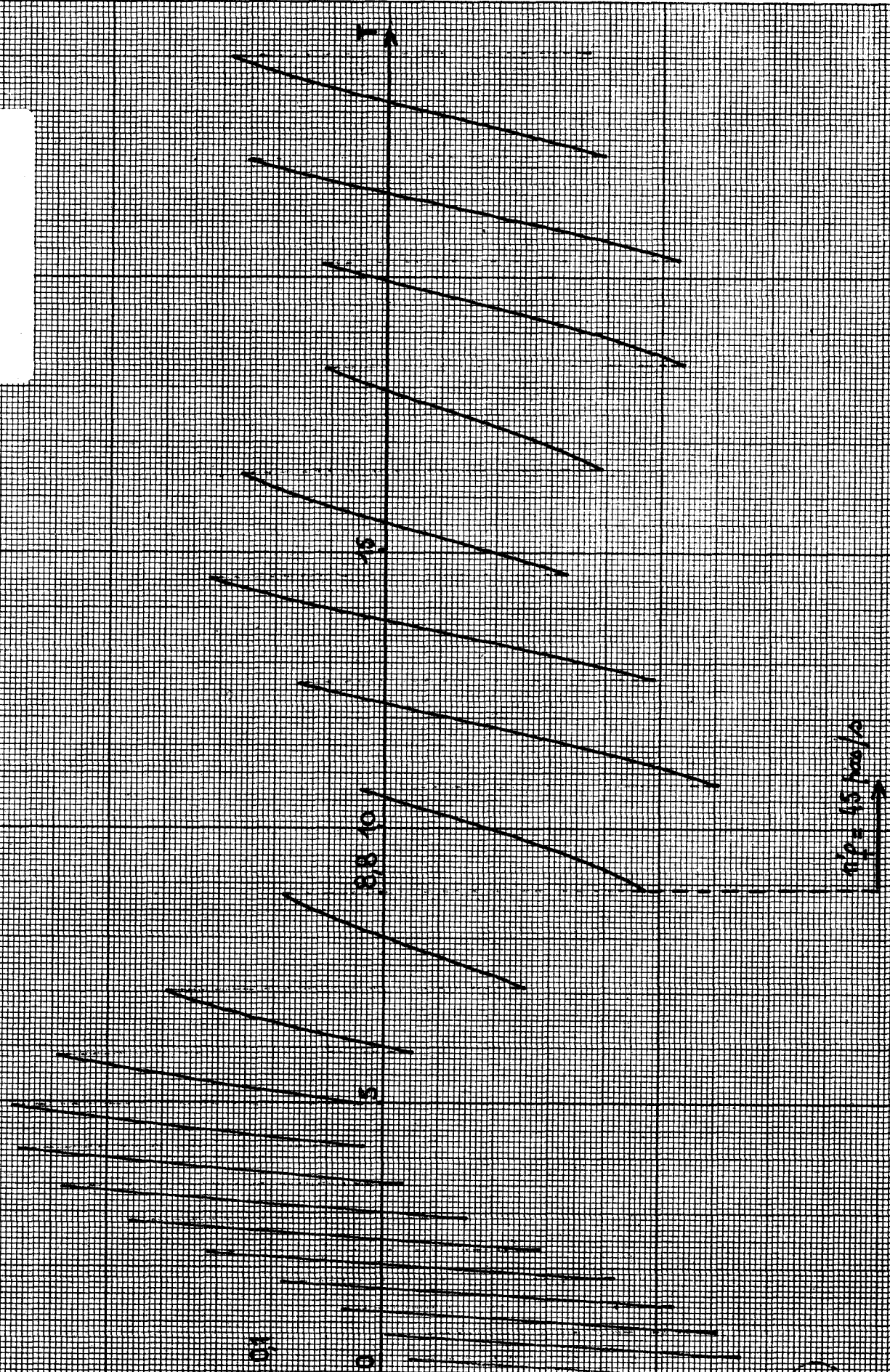


Figure 5.10 : $\phi'(t)$ lors du ralentissement pour $a = 2,72$

5.10 Conclusion

Supposons que nous imposons au moteur un parcours de 200 pas à effectuer dans le temps le plus bref, mais avec une fréquence située dans la zone de démarrage. Le temps de parcours est alors, puisque la fréquence maximale est de 45 pas par seconde :

$$t_p^0 = \frac{200}{45} = 4,44s$$

Si nous imposons au moteur une mise en vitesse linéaire l'amenant dans la zone d'entraînement, et si, en outre, nous choisissons le régime optimal d'accélération sur 100 pas et un ralentissement sur la même distance avec un facteur de régularité de 60%, le temps de parcours devient :

$$t_p^1 = 2,69s = 0,6 t_p^0$$

Si nous imposons avec les mêmes conditions que ci-dessus, un parcours dissymétrique ($N_1 = 180$ et $N_2 = 20$ pas), le temps pour franchir les 200 pas vaut alors :

$$t_p^2 = 1,33s = 0,5 t_p^1 = 0,3 t_p^0$$

L'avantage du régime optimal de mise en vitesse et de l'assymétrie nettement prononcée du parcours apparaît clairement sur la figure 5.11.

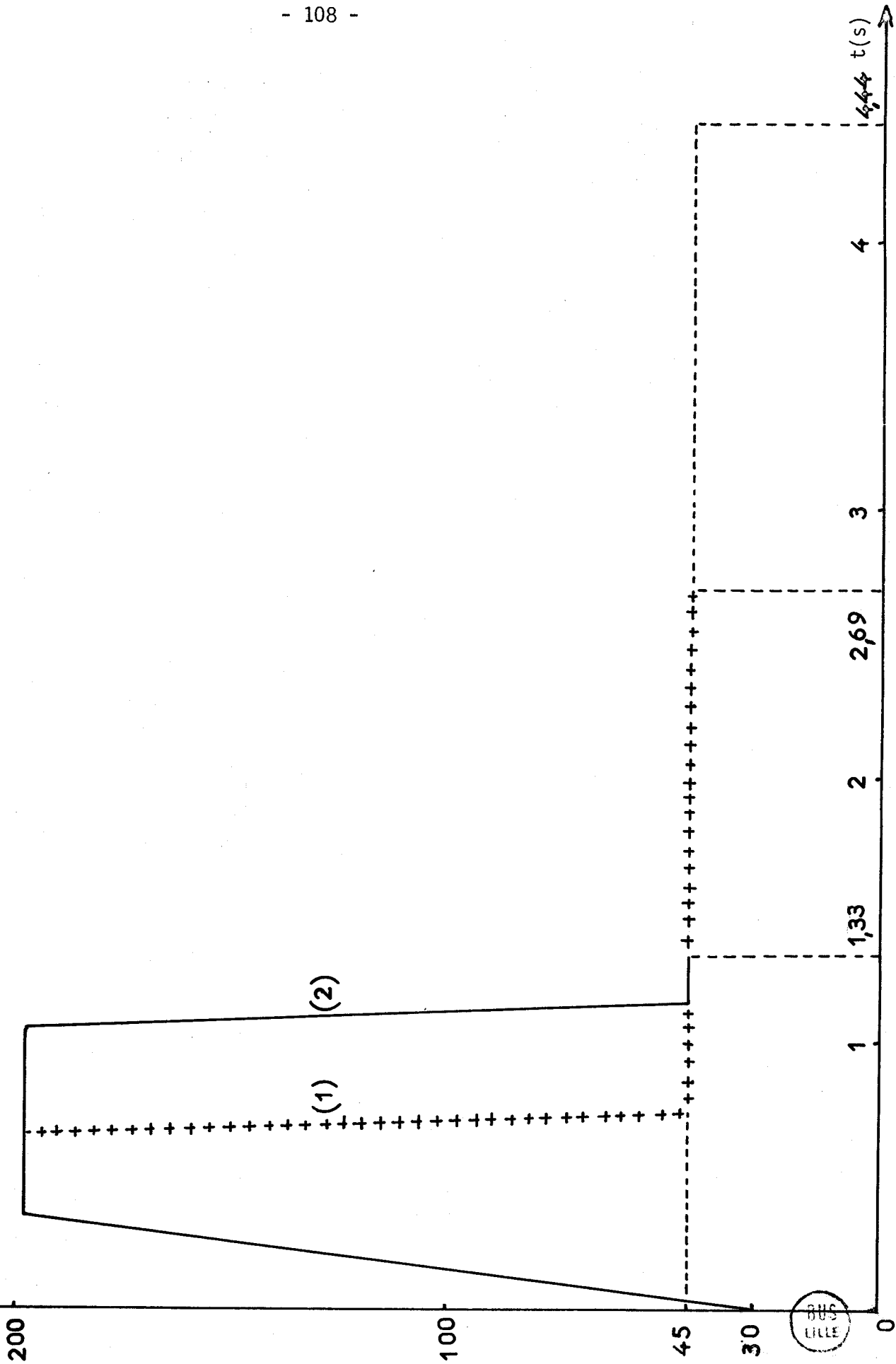


Figure 5.11 : Comparaison entre les différents régimes de positionnement.

CHAPITRE VI

AMELIORATION DE LA COMMANDE OPTIMALE

Les résultats des chapitres précédents (relatifs à l'accélération linéaire) peuvent être améliorés, à partir du principe suivant : au lieu d'imposer une variation linéaire de la fréquence de rotation de n_i à n_f , valeur optimale liée au nombre N_1 de pas à franchir, nous allons accélérer linéairement le moteur de n_i à n_j , puis de n_j à n_{j+1} , avec une pente différente et ainsi de suite jusqu'à ce que la fréquence de rotation atteigne la valeur finale n_f . La rampe de vitesse de n_j à n_{j+1} est d'abord choisie égale à la valeur déterminée par l'accélération linéaire entre n_i et n_{j+1} .

Une simulation numérique nous permet de valider cette mise en vitesse ou de la corriger de façon que le parcours envisagé se fasse sans perte de pas. Nous pouvons ainsi chiffrer l'amélioration apportée par cette nouvelle commande.

Une étude analogue est entreprise pour le ralentissement, mais il est évident, à priori, qu'on ne peut s'attendre à des résultats spectaculaires, étant donnée la rapidité mise par la moteur pour décélérer et atteindre la zone de démarrage.

6.1. Lois d'accélération non linéaire

6.1.1. Construction de la caractéristique de commande

Les lois linéaires de mise en vitesse à partir de n_i égale à 30 pas par seconde, fréquence optimale de démarrage, ont été détaillées au chapitre 4 et correspondent aux segments A_0A_1 , A_0A_2 , A_0A_3 , etc..., représentés à la figure 6.1.

La loi non linéaire est définie par la caractéristique multi-segments $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ obtenue de la façon suivante :

- l'accélération de 30 à 100 pas par seconde se confond avec la commande linéaire : le segment B_0B_1 se superpose donc à A_0A_1 .

- pour accélérer le moteur de 100 à 125 pas par seconde, nous imposons une pente de mise en vitesse identique à celle obtenue, en régime linéaire, pour que la fréquence de rotation passe de 30 à 125 pas par seconde : cela correspond au segment B_1B_2 , parallèle à A_0A_2 .

- et ainsi de suite jusqu'à ce que la fréquence de rotation atteigne la valeur de 220 pas par seconde (point B_6) et reste alors constante.

Il est bien entendu que la fréquence maximale peut être différente de 220 pas par seconde ; ainsi si nous la fixons à 150 pas par seconde, la caractéristique est constituée, à partir du point B_3 , par une parallèle à l'axe des temps, les segments B_0B_1, B_1B_2 et B_2B_3 étant les mêmes que précédemment.

6.1.2. Calcul des coordonnées des différents coudes de la caractéristique

Les ordonnées des points B_j correspondent respectivement à 30, 100, 125, 150, 175, 200 et 220 pas par seconde, d'après le principe même de la construction de cette caractéristique.

Leurs abscisses se calculent de la façon suivante : soient t_j et n_j les coordonnées du point B_j . Le segment $B_j B_{j+1}$ est parallèle à $A_0 A_{j+1}$; le point A_{j+1} a pour coordonnées (t'_{j+1}, n_{j+1}) , t'_{j+1} étant spécifié au chapitre 4.

Ecrivons que les pentes des deux segments $B_j B_{j+1}$ et $A_0 A_{j+1}$ sont les mêmes :

$$\frac{n_{j+1} - n_j}{t_{j+1} - t_j} = \frac{n_{j+1} - 30}{t'_{j+1}}$$

d'où :

$$(6.1) \quad t_{j+1} = t_j + \frac{n_{j+1} - n_j}{n_{j+1} - 30} t'_{j+1}$$

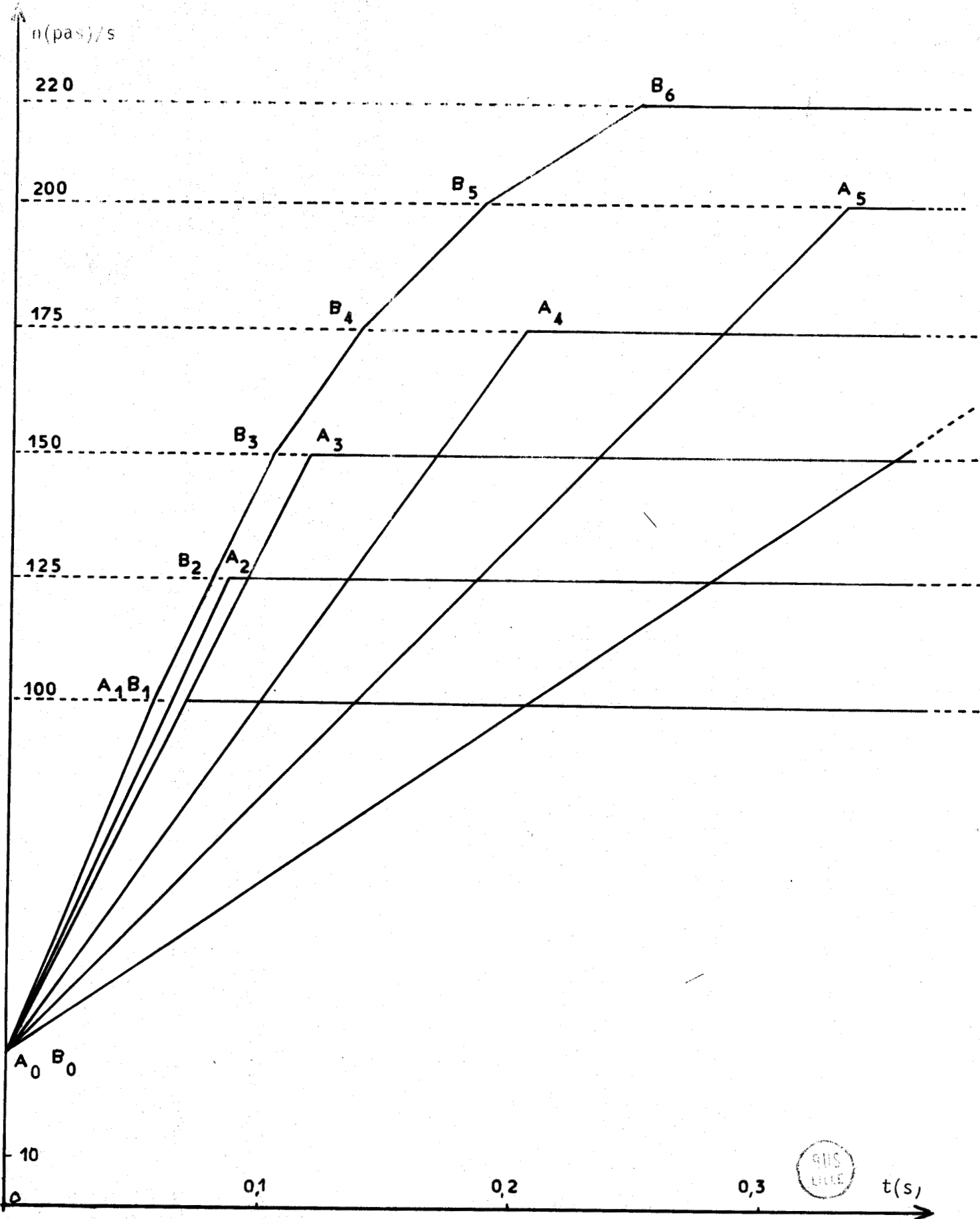


Figure 6.1. : Construction de la caractéristique de commande non linéaire

Cette relation permet de repérer graphiquement les coudes de la caractéristique non linéaire de mise en vitesse. Les tableaux suivants indiquent les coordonnées des points A_i et B_i .

	t(s)	n(pas/s)
A_0	0	30
A_1	0,056	100
A_2	0,086	125
A_3	0,117	150
A_4	0,203	175
A_5	0,33	200
A_6	0,554	220

	t(s)	n(pas/s)
B_0	0	30
B_1	0,056	100
B_2	0,079	125
B_3	0,103	150
B_4	0,138	175
B_5	0,187	200
B_6	0,245	220

Il apparaît clairement, au vu de ces tableaux et de la figure 1 que la commande non linéaire permet d'atteindre, plus rapidement, la fréquence de rotation n_f optimale liée au parcours à effectuer pendant la phase d'accélération. Les temps de franchissement des pas successifs sont plus courts lors de la commande non linéaire et il faut vérifier que cette diminution n'entraîne pas de perte de pas.

6.2. Calcul des temps successifs de franchissement des pas

6.2.1. Calcul préliminaire

Il se fait à partir de la relation (4.3)

$$(6.2) \quad n = n_i + 3078abt$$

où a représente la valeur de l'affichage du potentiomètre P_{10} nécessaire à l'accélération du moteur de n_i à n_f pas par seconde, fréquence fixée par le potentiomètre P_{11} , affiché à la valeur b (figure 2.5)

a et b étant des constantes pour une accélération donnée, la relation (6.2) peut donc s'écrire :

$$(6.3) \quad n = n_i + At$$

Le temps de franchissement du premier pas est :

$$t_1 = \frac{1}{n_i}$$

Le temps de franchissement du second pas est :

$$t_2 = \frac{1}{n_1}$$

avec, en tenant compte de la relation (6.3)

$$n_1 = n_i + At_1$$

d'où :

$$t_2 = \frac{1}{n_i + At_1}$$

soit :

$$t_2 = \frac{t_1}{1 + At_1^2}$$

De même, le temps de franchissement du k^{ième} pas est :

$$t_k = \frac{1}{n_k}$$

avec :

$$n_k = n_{k-1} + At_{k-1}$$

d'où :

$$t_k = \frac{1}{n_{k-1} + At_{k-1}}$$

soit :

$$(6.4) \quad t_k = \frac{t_{k-1}}{1 + At_{k-1}^2}$$

Le calcul des temps successifs de franchissement des pas s'obtient donc facilement pour la loi de récurrence définie par la relation (6.4). Le temps de franchissement du dernier pas doit être égal à $\frac{1}{n_f}$; nous ne trouvons pas exactement cette valeur, étant donné que notre calcul s'appuie sur la relation (6.2) qui n'est correcte qu'aux instants de commutation, comme il a été expliqué en 4.1. Nous allons voir comment procéder pour obtenir, avec la loi de commande non linéaire, un nombre entier de pas franchis entre les deux fréquences de rotation correspondant à deux coudes voisins.

6.2.2. Correction du calcul

Nous fixons d'abord A à la valeur correspondante à l'accélération linéaire de 30 à 100 pas par seconde et nous l'ajustons, en la diminuant, pour que le temps calculé pour le franchissement du dernier pas soit égal à $\frac{1}{100}$ s. Nous recommençons ce calcul en donnant à A la valeur correspondante à l'accélération linéaire de 30 à 125 pas par seconde, et ainsi de suite.

Les points B'_1, B'_2, B'_3 etc.... de la caractéristique non linéaire correspondent alors aux fréquences de rotation de 100, 125, 150 pas par seconde, chacune des excursions se faisant en un nombre entier de pas, ce qui n'était pas le cas pour la caractéristique non linéaire définie par B_0, B_1, B_2, \dots etc.... De plus, nous connaissons les temps successifs de franchissement de chacun des pas. Nous résumons les résultats dans les tableaux suivants en appelant t_{fr} le temps de franchissement d'un pas.

Segment $B'_0 B'_1$	
N° du pas	t_{fr} (ms)
1	33,3
2	14,4
3	11,6
4	10

Segment $B'_1 B'_2$	
N° du pas	t_{fr} (ms)
1	10
2	9,2
3	8,5
4	8

Segment $B'_2 B'_3$	
n° du pas	t_{fr} (ms)
1	8
2	7,6
3	7,2
4	6,9
5	6,7

Segment $B'_3 B'_4$	
N° du pas	t_{fr} (ms)
1	6,67
2	6,44
3	6,23
4	6,04
5	5,87
6	5,71

Segment $B'_4 B'_5$	
N° du pas	t_{fr} (ms)
1	5,71
2	5,59
3	5,48
4	5,37
5	5,27
6	5,17
7	5,09
8	5

Segment $B'_5 B'_6$	
N° du pas	t_{fr} (ms)
1	5
2	4,94
3	4,87
4	4,81
5	4,76
6	4,70
7	4,65
8	4,60
9	4,55

Une simulation numérique va nous permettre de constater si cette commande se fait sans perte de pas et si, dans ce cas, les parcours s'effectuent plus rapidement qu'avec la loi linéaire.

6.3. Modèle à deux paramètres du moteur pas à pas

L'équation (1.3) régissant le fonctionnement du moteur s'écrit :

$$(6.5) \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{f}{J} \frac{d\theta}{dt} + \frac{C_R}{J} \operatorname{sgn} \frac{d\theta}{dt} + \frac{C_M}{J} \sin 4\theta = 0$$

Si nous imposons le changement de variable :

$$T' = kt$$

avec $k = \frac{f}{J}$

l'équation (6.5) devient :

$$\frac{f^2}{J^2} \frac{d^2\theta}{dT'^2} + \frac{f^2}{J^2} \frac{d\theta}{dT'} + \frac{C_R}{J} \operatorname{sgn} \frac{d\theta}{dT'} + \frac{C_M}{J} \sin 4\theta = 0$$

soit

$$(6.6.) \quad \frac{d^2\theta}{dT'^2} + \frac{d\theta}{dT'} + \frac{C_R J}{f^2} \operatorname{sgn} \frac{d\theta}{dT'} + \frac{C_M J}{f^2} \sin 4\theta = 0$$

Si nous posons :

$$(6.7.) \quad \lambda_1 = \frac{C_R J}{f^2}$$

et (6.8) $\lambda_2 = \frac{C_M J}{f^2}$

l'équation (6.6) s'écrit :

$$(6.9.) \quad \ddot{\theta} + \dot{\theta} + \lambda_1 \operatorname{sgn} \dot{\theta} + \lambda_2 \sin 4\theta = 0$$

qui correspond à un modèle à deux paramètres λ_1 et λ_2 .

Avec les valeurs numériques citées en 1.9, nous avons :

$$6.10) \quad \begin{aligned} \lambda_1 &= 6,222 \\ \lambda_2 &= 32,84 \\ k &= 6,429 \end{aligned}$$

6.4. Simulation numérique du moteur pas à pas

Si nous posons $X = \theta$ et $Y = \dot{\theta}$, nous obtenons, à partir de l'équation (6.9.)

$$(6.11) \quad \begin{aligned} \dot{X} &= Y \\ \dot{Y} &= -Y - \lambda_1 \operatorname{sgn} Y - \lambda_2 \sin 4X \end{aligned}$$

Ces relations nous permettent d'écrire, pour le $n^{\text{ième}}$ pas de calcul :

$$(6.12) \quad \begin{aligned} \dot{X}_n &\approx \frac{X_{n+1} - X_n}{P} \\ \dot{Y}_n &\approx \frac{Y_{n+1} - Y_n}{P} \end{aligned}$$

où P désigne le pas de calcul.

Cela nous donne, en tenant compte des relations (6.11)

$$(6.13) \quad X_{n+1} = X_n + PY_n$$

et

$$(6.14) \quad Y_{n+1} = Y_n + P(-Y_n - \lambda_1 \operatorname{sgn} Y_n - \lambda_2 \sin 4X_n)$$

La connaissance de X_n et Y_n entraîne celle de X_{n+1} et Y_{n+1} et permet donc de tracer l'évolution du système dans le plan (X, Y) , avec d'autant plus de précision que P est petit.

Les définitions imposées au début de ce paragraphe imposent :

$$(6.15) \quad X = \theta$$

et

$$(6.16) \quad Y = \frac{d\theta}{dt}, \quad \text{soit :}$$
$$Y = \frac{1}{K} \frac{d\theta}{dt}$$

c'est à dire, avec l'application numérique définie en 6.3.

$$(6.17) \quad \frac{d\theta}{dt} = 6,429 Y$$

La relation (6.15) permet de définir la position angulaire :

$$(6.18) \quad \theta(\text{pas}) = \frac{6}{\pi} X$$

où X est exprimé en radians.

Un raisonnement analogue à celui tenu à la fin du chapitre 3 nous permet de calculer la position angulaire lors de la $n^{\text{ième}}$ commutation :

$$(6.19) \quad \theta(n) = n-1 + \frac{6}{\pi} X$$

Nous en déduisons la distance parcourue après n commutations :

$$(6.20) \quad d_n(\text{pas}) = n - 1 + \frac{6}{\pi} (X^n - X^0)$$

où X^0 et X^n sont les valeurs initiale et finale de X_1 exprimées en radians.

La relation (6.17) permet de calculer la vitesse angulaire

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{6}{\pi} \times \frac{d\theta}{dT'} \times \frac{dT'}{dt}$$

soit

$$(6.21) \quad \frac{d\theta}{dt} (\text{pas/s}) = 12,28 Y$$

Nous allons d'abord étudier, par cette méthode, l'accélération linéaire et comparer les résultats obtenus avec ceux que nous a donné le modèle analogique.

6.5. Accélération linéaire obtenue par la simulation numérique

Nous envisageons un parcours de 100 pas, la fréquence de rotation variant de 30 à 200 pas par seconde pour respecter le régime optimal de mise en vitesse défini en 4.4. L'enregistrement obtenu par la simulation numérique est représenté à la figure 6.2. Il correspond à une pente d'accélération légèrement inférieure à la pente maximale détectée par le calcul analogique (le coefficient a_{max} vaut 0,60 au lieu de 0,63)

Le temps correspondant aux 100 commutations est de 0,62s, qui est la valeur trouvée sur l'enregistrement issu du modèle analogique (figure 4.22)

Ce dernier indiquait une distance parcourue :

$$d_{100} = 99,9 \text{ pas}$$

alors que la simulation numérique donne à partir de la relation (6.20), avec $X^0 = -\frac{\pi}{6}$ et $X^{100} = 0,087$:

$$d_{100} = 100,2 \text{ pas.}$$

Les deux modèles analogique et numérique, conduisent donc aux mêmes résultats, si l'on tient compte de la précision de la calculatrice analogique et de la méthode numérique.

6.6. Accélération non linéaire

Nous utilisons les temps t_{fr} calculés en 6.2.2. : n_f étant fixés à 200 pas par seconde, la caractéristique non linéaire est telle qu'à partir du point B'_5 les temps de franchissement des pas restent constants et égaux à 5ms. L'enregistrement de la figure 6.3. montre qu'il y a alors perte de pas. En multipliant chacun des temps par le coefficient 1,1, ce qui revient à diminuer les pentes des différents segments de la caractéristique non linéaire, nous constatons que ce phénomène disparaît.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'au delà du coude B'_5 , les temps de franchissement des pas restent constants et égaux à 5,5ms; ce qui allonge la durée totale de la mise en vitesse.

Aussi, utilisons nous le segment $B'_5 B'_6$ pour compléter la caractéristique de sorte qu'à partir du point B'_6 les temps restent constants et égaux à 4,55ms. Pour qu'il n'y ait pas de perte de pas dans ces conditions, il faut multiplier chacun des temps t_{fr} par le facteur $\frac{5}{4,55}$, rapport des temps correspondant aux coudes B'_5 et B'_6 . Comme ce rapport est voisin de 1,1, l'accélération se fait sans perte de pas (figure 6.4) et, de plus, lorsque la fréquence de rotation finale est atteinte, les temps de franchissement des pas restent constants et égaux à 5ms.

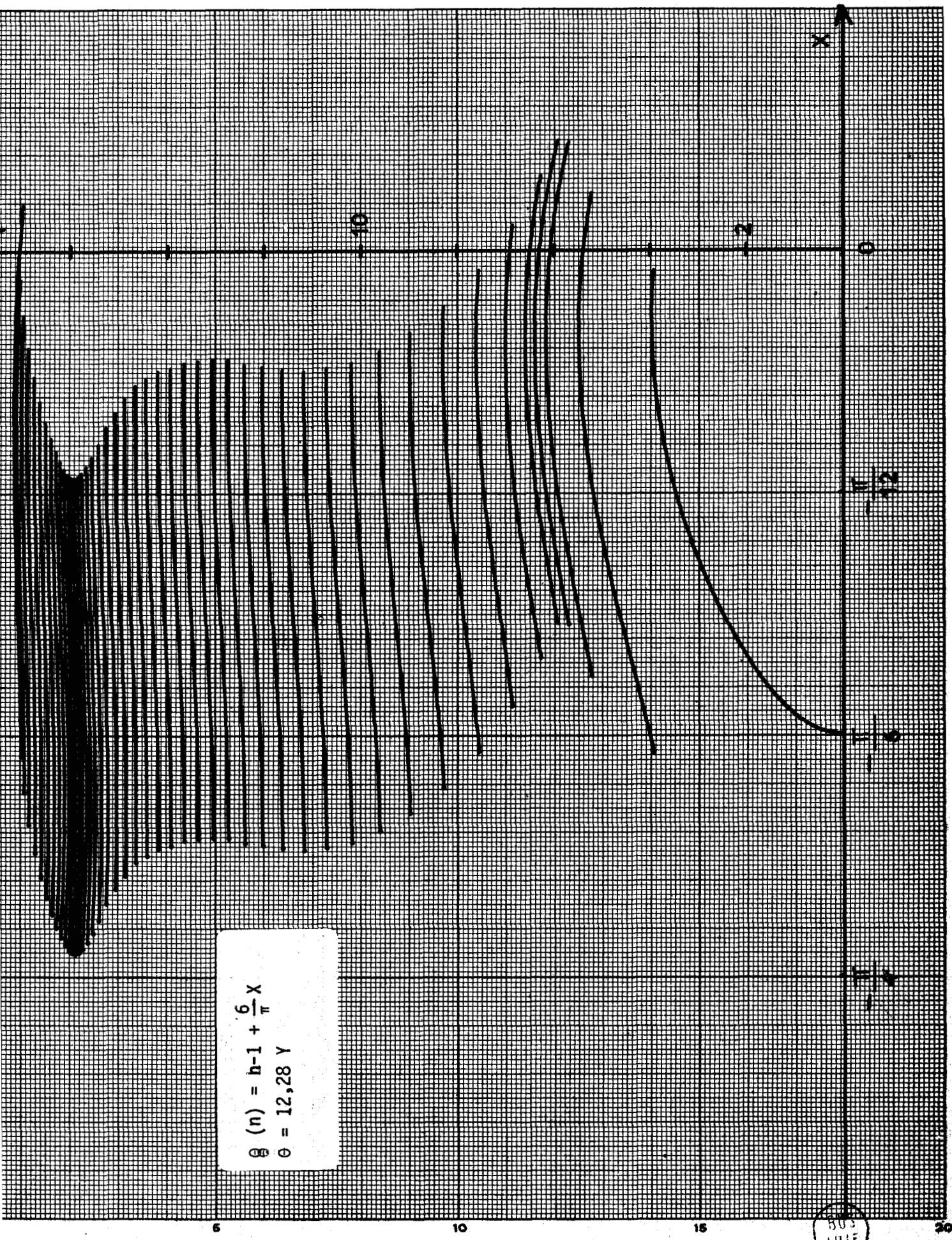


Figure 6.2. : Accélération linéaire

Le temps correspondant aux 100 commutations est de 0,60s, ce qui n'apporte pas d'amélioration notable par rapport à la commande linéaire. Le résultat est prévisible si l'on tient compte des deux corrections apportées à la caractéristique non linéaire initiale.

La distance parcourue est définie par la relation (6.20) avec :

$$\chi^0 = -\frac{\pi}{6} \text{ et } \chi^{100} = 0,052,$$

ce qui donne :

$$d_{100} = 100,1 \text{ pas}$$

qui est encore un résultat excellent.

L'enregistrement de la figure 6.4. nous montre que les commutations se font au voisinage du maximum de la vitesse, ce qui nous invite à choisir une nouvelle forme de commande du moteur pas à pas.

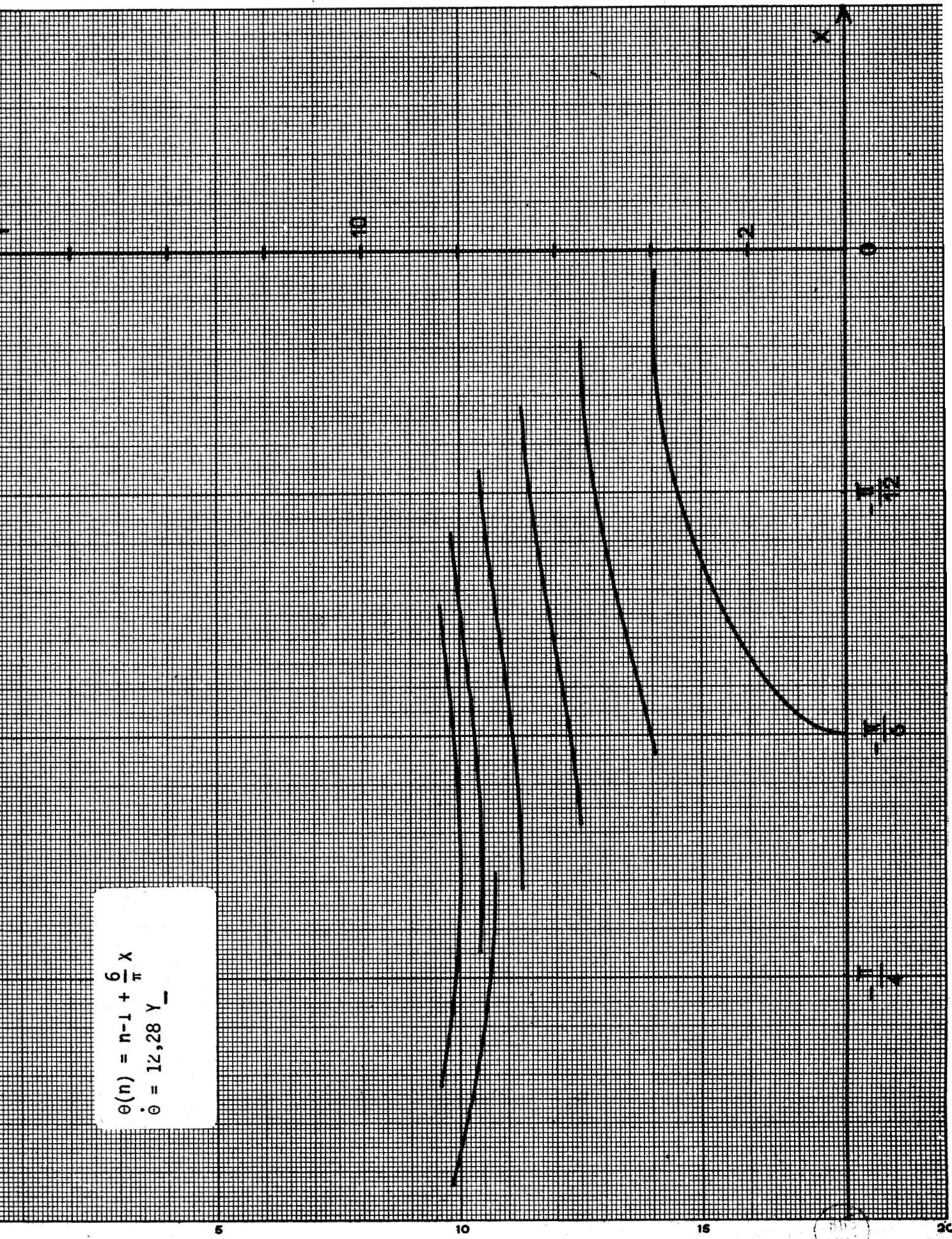
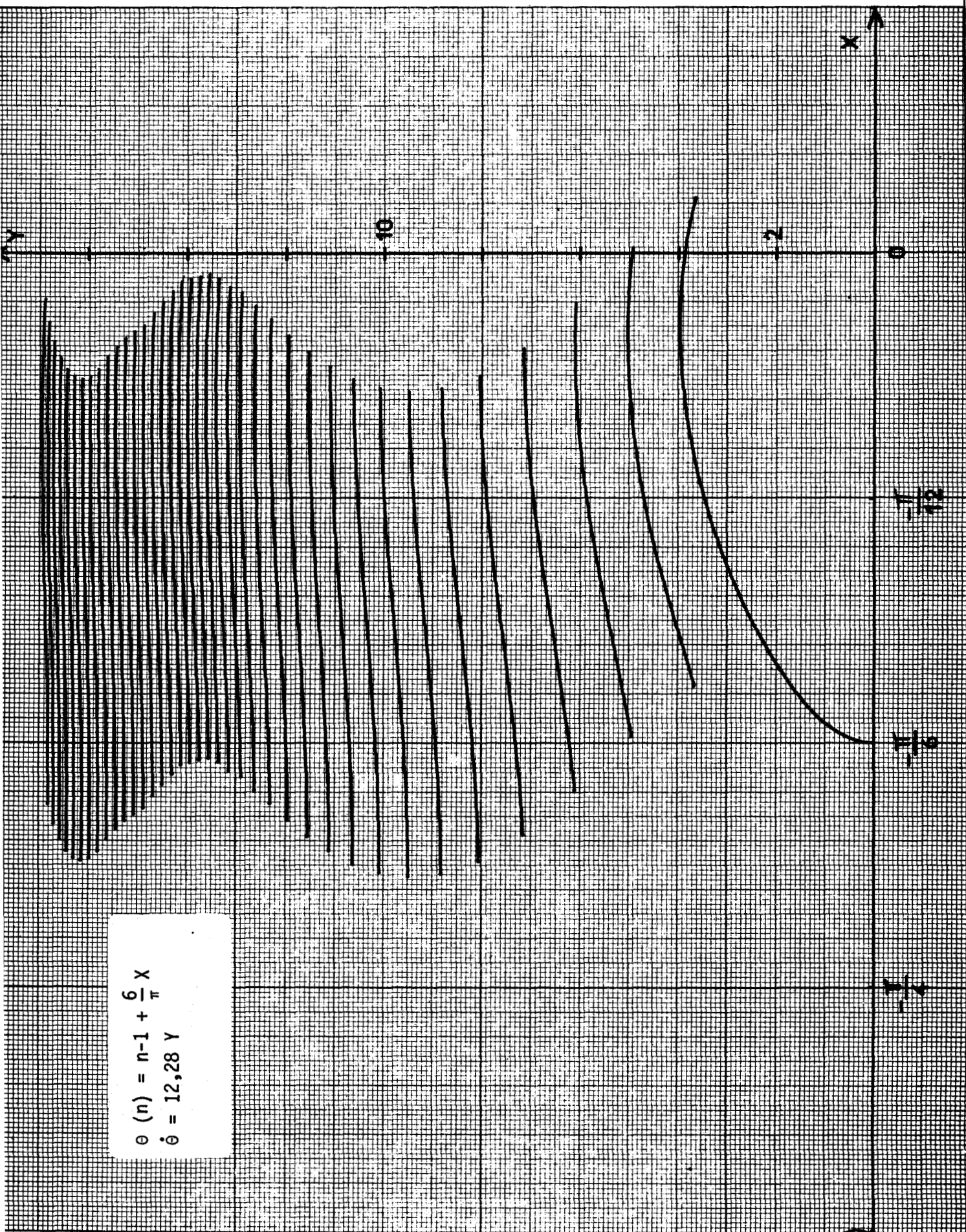


Figure 6.3. : Accélération non linéaire.





$\theta(n) = n-1 + \frac{6}{\pi} X$
 $\dot{\theta} = 12,28 Y$

Figure 6.4. : Accélération non linéaire corrigée



6.7. Commande par commutation au maximum de la vitesse

Nous pouvons simuler la commande du moteur de sorte que les commutations se produisent lorsque la vitesse passe par un maximum. Le modèle numérique défini en 6.4 conduit à l'enregistrement de la figure 6.5.

Le temps correspondant aux 100 commutations est alors de 0,54s, ce qui constitue par rapport à l'accélération linéaire une amélioration de 13%

La distance parcourue, définie par la relation (6.20) vaut, avec

$$\chi^0 = -\frac{\pi}{6} \text{ et } \chi^{100} = -0,212 :$$

$$d_{100} = 99,6 \text{ pas}$$

Nous choisissons ce type de commande car il permet de réduire le temps de mise en vitesse.

6.8. Ralentissement

Une étude analogue a été menée pour commander le ralentissement du moteur.

Nous avons d'abord établi une loi de récurrence semblable à celle qui est définie par la relation (6.4) et déterminé ainsi les temps successifs de franchissement des pas lorsque la fréquence de rotation passe de 200 à 4,5 pas par seconde. Nous nous sommes fixé une caractéristique à deux pentes ; la première est relative à un parcours dans la zone d'entraînement, de 200 à 50 pas par seconde, sans gain de pas ; la seconde, moins élevée, correspond à l'entrée dans la zone de démarrage, sans que les phénomènes troubles mis en évidence dans le chapitre précédent n'apparaissent. Nous avons ajusté ces pentes pour que les deux excursions correspondent à un nombre entier de pas.

La simulation numérique définie en 6.4 et appliquée à la décélération permet de conclure que la loi non linéaire ne convient pas : il faudrait la modifier de telle sorte que le temps mis par le moteur pour ralentir deviendrait plus important que celui obtenu par la loi linéaire définie au chapitre 5 ; cela n'est pas étonnant si l'on tient compte de la rapidité de ce ralentissement. Nous conservons donc la loi de délécération linéaire, représentée à la figure 6.6., obtenue à l'aide de la simulation numérique et qui est à rapprocher de la figure 5.9.

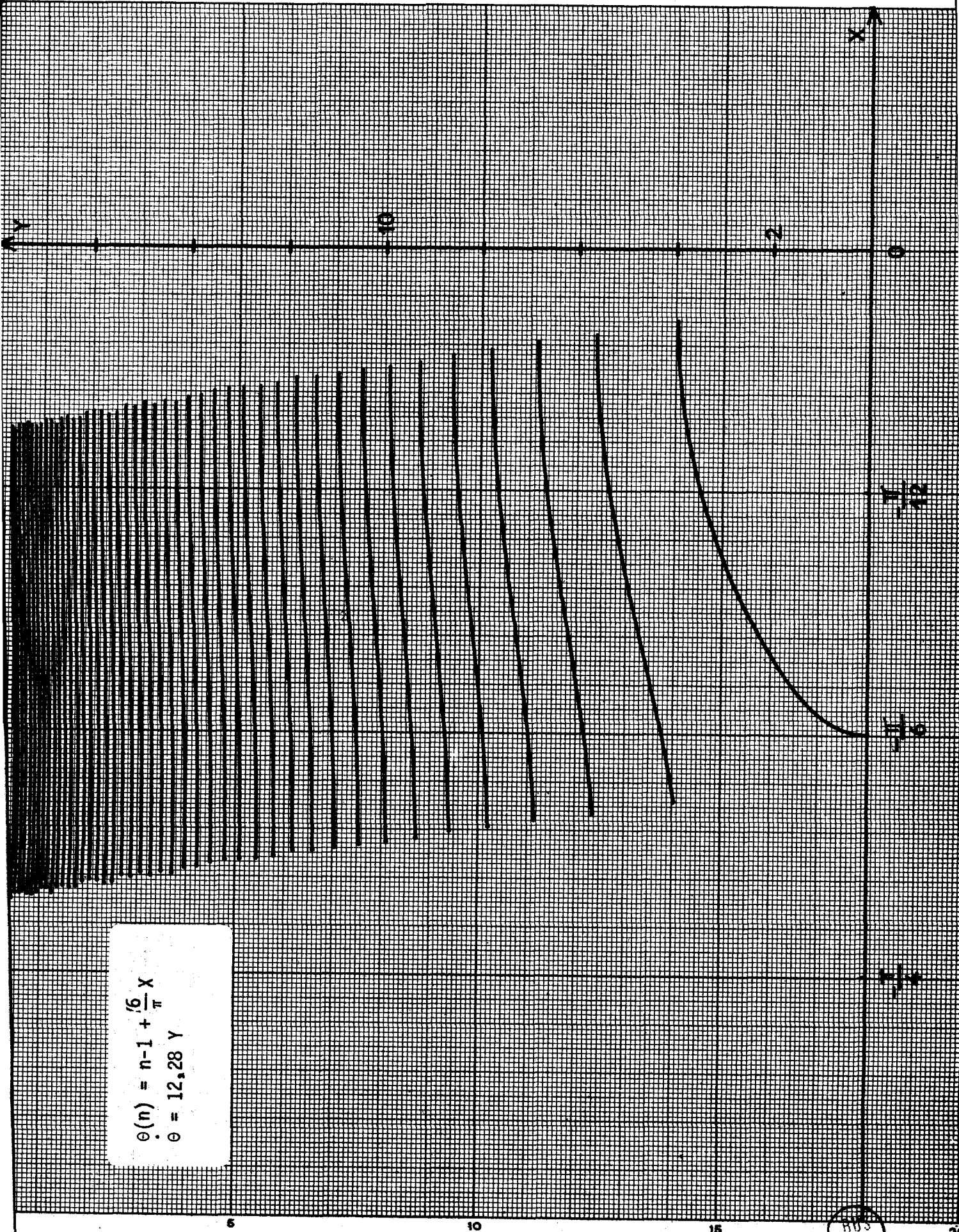
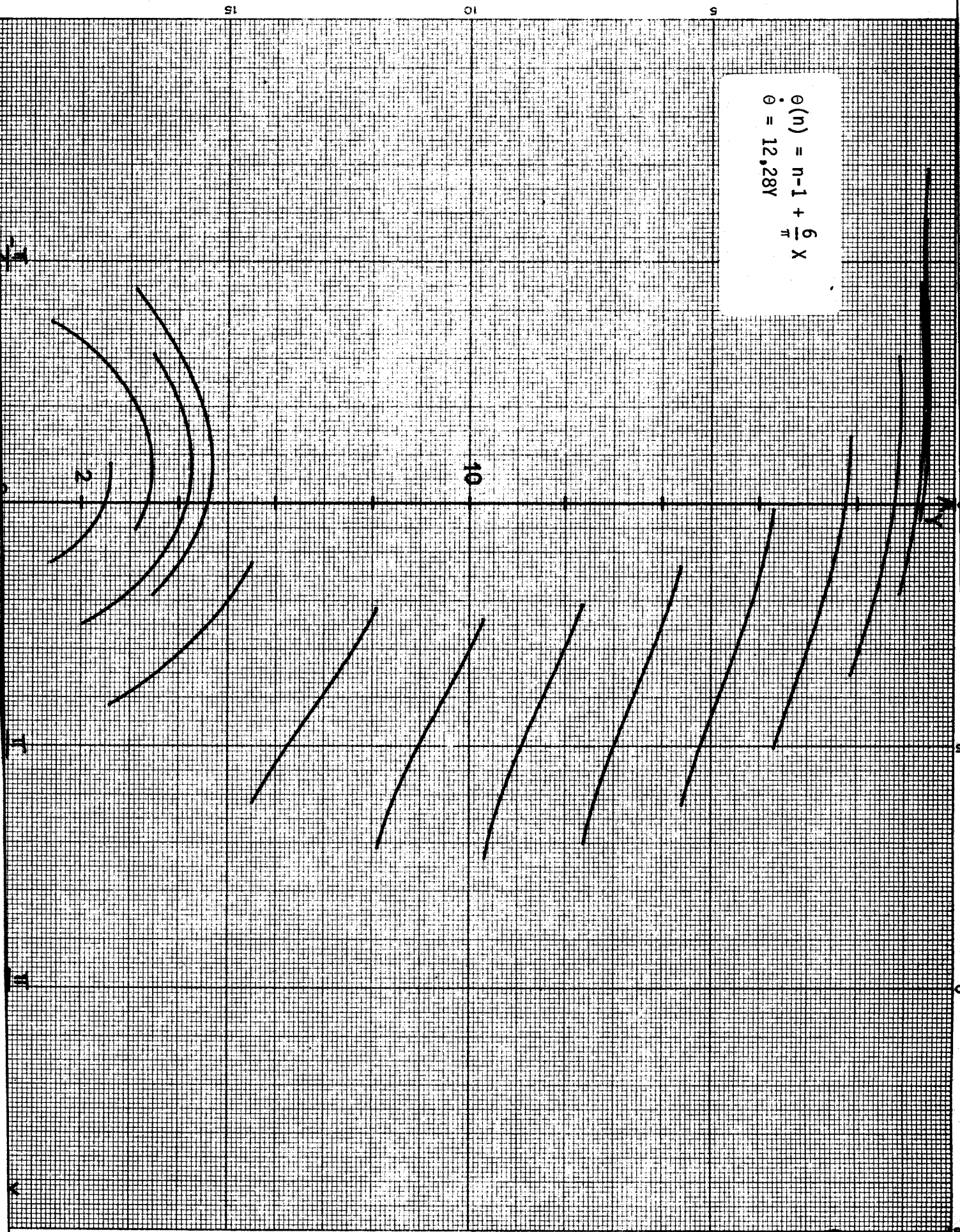


Figure 6.5. : Commutation au maximum de la vitesse





$$\theta(n) = n-1 + \frac{6}{n} X$$
$$\dot{\theta} = 12,287$$

Figure 5.6.: Ralentissement linéaire



6.9. Conclusion

A partir de la loi linéaire de mise en vitesse, simulée sur calculatrice analogique, nous avons pu mettre en évidence une loi optimale pour la phase d'accélération, alors que le ralentissement se satisfait d'une loi linéaire liée à un facteur de bon fonctionnement.

La simulation numérique nous permet à la fois de valider les résultats obtenus à partir du modèle analogique et d'obtenir les temps de franchissement des pas, qui sont les données primordiales de la commande.

CONCLUSION

Nous avons examiné différentes possibilités d'améliorer les performances d'un système de positionnement entraîné par un moteur pas à pas. Cette étude réalisée par voie analogique et numérique demande à être complétée par une vérification expérimentale, laquelle nous permettra la réalisation d'un système entièrement automatisé.

Pour mener à bien cette dernière étude, nous envisageons de développer les points théoriques suivants :

- variation des paramètres du système et influence sur les lois explicitées dans ce mémoire ;
- étude plus approfondie du ralentissement ;
- examen du positionnement lorsque celui-ci correspond à un petit nombre de pas à franchir du fait que les résultats obtenus s'appliquent plus facilement à des positionnements longs.

Nous pouvons aboutir ainsi à l'élaboration d'une procédure de calcul des temps successifs de franchissement des différents pas, quel que soit leur nombre. Le système pourra alors être géré par un microprocesseur qui permet l'automatisation complète du système de positionnement optimisé.

AMPLIFICATEURS

Numéro	Fonction	Variable de sortie	Observations
1	Sommateur		gains de 0,1
2	Intégrateur	$\dot{\phi}$	C.I. = 0 (montage 1) C.I. = $-\phi$ (montage 2)
3	Sommateur	$-\dot{\phi}$	
4	Intégrateur	ϕ	C.I. = sortie de A_{15}
5	Intégrateur		mode répétitif rapide ; gain de 1000 C.I. = +1 (montage 1) C.I. = -1 (montage 2)
6	Intégrateur	y	mode répétitif rapide ; gain de 1000 ; C.I. = 0
7	Sommateur	- y	
8	Intégrateur	x	mode répétitif ; gain de 1000 C.I. = $1 + 0,017$
9	Sommateur	C.I. de A_8	
10	Intégrateur		Echantillonneur - bloqueur Capacités de bouclage : $C = 0,01\mu F$ Entrées en C.I.
11	Intégrateur	$-\sin 2\pi\phi$ ou $\sin 2\pi\phi'$	C.I. de $A_{10} = y$ C.I. de $A_{11} =$ sortie de A_{10}
12	Sommateur	$-0,202\text{sgn } \dot{\phi}$	
13	Intégrateur		Suiveur ; capacité de bouclage $C=0,01\mu F$ Entrée en C.I. C.I. = tension du point milieu du relais (montage 1) ou sortie de A_{20} (montage 2)
14	Sommateur		
15	Sommateur	C.I. de A_4	



Amplificateurs (suite)

Numéro	Fonction	Variable de sortie	Observations
16	Sommateur		Gain de 0,1 Entrée - a (montage 1) + a (montage 2)
17	Intégrateur		C.I. : c
18	Intégrateur	$\frac{v}{b}$	suiveur ; capacité de bouclage : 0,001 μ F Entrée en C.I. C.I. = sortie de A ₁₇
19	Sommateur		montage 2
20	Sommateur	Entrée de A ₁₃	montage 2



POTENTIOMETRES

Numéro	Fonction	Valeur
1	atténuation de $-\dot{\phi}$	0,714
2	atténuation de $-\sin 2\pi\phi$ ou $\sin 2\pi\phi'$	0,107
4	élaboration de x	0,159
5	Correction sur les C.I. de A_8	0,017
6	Elaboration de $-0,202 \operatorname{sgn} \dot{\phi}$	0,404
7		0,202
8	Retrait de ϕ_p	0,333
9	C.I. au départ sur ϕ (utilisation d'un interrupteur manuel)	0,5
10	Réglage de la pente de modulation	variable a
11	Réglage de la fréquence à atteindre	variable b
12	Affichage des conditions initiales en ϕ (utilisation d'un interrupteur électronique)	$\phi^0 + 0,333$
13		$\phi^0 + 0,333$
14	Réglage de la fréquence initiale (montage 2)	variable C

ANNEXE II

Nous avons montré au paragraphe 3.4. qu'il était possible de graduer en temps la trajectoire (C) représentant le franchissement d'un pas jusqu'à l'arrêt (figure 3.2.). Les tableaux ci-joints donnent les mesures nécessaires à cette graduation et les résultats obtenus. En particulier on y retrouve le temps correspondant à la limite d'arrêt sur le pas.

ϕ_A	ϕ_B	ϕ_A	ϕ_B	$\frac{ \phi_A + \phi_B }{2}$	$ \phi_B - \phi_A $	$T_B - T_A$	T
0,167	0,175	0	0,032	0,016	0,008	0,5	0,5
0,175	0,2	0,032	0,07	0,051	0,025	0,490	0,990
0,2	0,225	0,07	0,094	0,082	0,025	0,305	1,295
0,225	0,25	0,094	0,114	0,104	0,025	0,240	1,535
0,25	0,275	0,114	0,13	0,122	0,025	0,205	1,740
0,275	0,3	0,13	0,144	0,137	0,025	0,182	1,923
0,3	0,325	0,144	0,156	0,15	0,025	0,167	2,090
0,325	0,35	0,156	0,164	0,16	0,025	0,156	2,246
0,35	0,375	0,164	0,172	0,168	0,025	0,149	2,395
0,375	0,4	0,172	0,178	0,175	0,025	0,143	2,537
0,4	0,45	0,178	0,183	0,1805	0,05	0,277	2,814
0,45	0,5	0,183	0,181	0,182	0,05	0,275	3,099
0,5	0,525	0,181	0,176	0,1785	0,025	0,140	3,229
0,525	0,55	0,176	0,168	0,172	0,025	0,145	3,374
0,55	0,575	0,168	0,156	0,162	0,025	0,154	3,528
0,575	0,6	0,156	0,142	0,149	0,025	0,168	3,696
0,6	0,625	0,142	0,124	0,133	0,025	0,188	3,884
0,625	0,65	0,124	0,1	0,112	0,025	0,223	4,107
0,65	0,675	0,1	0,064	0,082	0,025	0,305	4,312
0,675	0,685	0,064	0,036	0,1	0,01	0,1	4,512
0,685	0,69	0,036	0	0,018	0,005	0,278	4,79
0,69	0,685	0	-0,03	0,015	0,005	0,333	5,123
0,685	0,675	-0,03	-0,05	0,04	0,01	0,25	5,373



ϕ_A	ϕ_B	$\dot{\phi}_A$	$\dot{\phi}_B$	$\frac{\phi_A + \phi_B}{2}$	$\phi_B - \phi_A$	$T_B - T_A$	T
0,675	0,55	-0,05	-0,076	0,063	0,025	0,397	5,770
0,65	0,625	-0,076	-0,092	0,084	0,025	0,297	6,068
0,625	0,6	-0,092	-0,102	0,097	0,025	0,258	6,326
0,6	0,575	-0,102	-0,108	0,105	0,025	0,238	6,564
0,575	0,54	-0,108	-0,112	0,110	0,035	0,318	6,881
0,54	0,5	-0,112	-0,107	0,1095	0,04	0,365	7,247
0,5	0,475	-0,107	-0,097	0,102	0,025	0,245	7,492
0,475	0,45	-0,097	-0,082	0,0895	0,025	0,279	7,771
0,45	0,425	-0,082	-0,058	0,07	0,025	0,357	8,128
0,425	0,41	-0,058	-0,03	0,044	0,015	0,341	8,469
0,41	0,405	-0,03	0	0,015	0,005	0,333	8,802
0,405	0,41	0	0,016	0,008	0,005	0,625	9,427
0,41	0,425	0,016	0,036	0,026	0,015	0,577	10,004
0,425	0,45	0,036	0,048	0,042	0,025	0,595	10,599
0,45	0,475	0,048	0,050	0,049	0,025	0,510	11,11
0,475	0,5	0,050	0,044	0,047	0,025	0,532	11,642
0,5	0,52	0,044	0,026	0,030	0,02	0,667	12,308
0,52	0,53	0,026	0	0,013	0,01	0,769	13,078

BUS
TITLE

BIBLIOGRAPHIE

A. Journées d'études sur les moteurs pas à pas et leurs applications

Institut Nationale Polytechnique de Lorraine. Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy - 21 et 22 juin 1979.

I | Y. POIROT

"Caractéristiques des moteurs pas à pas Citroën et leur emploi dans les machines outils".

II | C. CHAGNAUD

"Commande d'une table traçante numérique par microprocesseur".

III | R. WELTERLIN

"Particularités des petits moteurs pas à pas destinés à l'horlogerie domestique et technique".

IV | J. JACQUIN

"Application des moteurs pas à pas aux microdéplacements et à la commande de Floppy Disk".

V | C.M. CARBON

"Application des moteurs pas à pas à la robotique".

VI | NEEL

"Utilisation de verins hydrauliques commandés par moteurs pas à pas, dans un robot".

VII | M. JUFER

"Moteurs pas à pas. Caractéristiques, développements et perspectives".

VIII | M. ABIGNOLI

"Méthodes et systèmes de mesures sur les moteurs pas à pas".

IX | C. GOELDEL et J.P. LOUIS

"Modélisation et identification des moteurs pas à pas".

X | J.P. LOUIS et C. GOELDEL

"Commande optimale des moteurs pas à pas".

B. Autres références :

- 1) H. GHESTEM
"Commande programmée d'une perceuse pas à pas pour circuits imprimés"
Electronique et Applications Industrielles, 15 mai 1978.
- 2) "Les moteurs pas à pas"
Moniteur de l'Electricité, mars 1972.
- 3) T. SENG
"Modélisation et identification d'un moteur pas à pas en vue d'une commande optimale".
Thèse de Docteur Ingénieur. Université de Nancy, juin 1976.
- 4) Ch. CATTIN-MORETAZ
"Les moteurs pas à pas et leur commande électronique".
Toute l'Electronique, Mars 1972, pages 41 à 45.
- 5) Ch SAUNIER
"Les moteurs pas à pas et leurs techniques de commande".
Electronique et Micro-électronique industrielles, mai 1973.
- 6) J. JACQUIN
"Les moteurs pas à pas"
Editions Dunod, Paris 1974
- 7) D.J. ROBINSON et C.K. TAFT
"A dynamic analysis of magnetic stepping motors".
I.E.E. Transactions on industrial electronics and control instrumentation,
septembre 1969, p111- 125.
- 8) B.C. KUD, G. SINGH, R. YACKEL
"Modeling and simulation of a stepping motor".
I.E.E.E. Transactions on automatic control, décembre 1969 - p.745 à 747.
- 9) M. GROSSETETE
"Les moteurs pas à pas à réluctance variable".
Automatisme, juillet août 1970, p 359 à 364.
- 10) P. LAFORIE et M. CHIOCCARELLO
"Influence de la commande électronique sur le comportement dynamique des
moteurs pas à pas à aimant permanent".
R.G.E. Mars 1975, p171 à 177.

- 11| M. ABIGNOLI
"Méthodes et systèmes de mesures sur les moteurs pas à pas" .
cf |VIII|.
- 12| D. PINCHON et J. DEFRENNE
"Sur l'optimisation, par technique hybrides, de la commande en vitesse
de moteurs pas à pas".
Proceedings of the International Symposium "Simulation 77".
Montreux ,22-24 juin 1977 .
- 13| D. PINCHON et J.F. BRUDNY
"Optimisation de la commande en vitesse de moteurs pas à pas".
Congrès "Informatica y automatica", Madrid, 16 au 19 octobre 1979.
- 14| J.F. BRUDNY et D. PINCHON
"Sur une méthode de résolution d'une équation non linéaire. Application à
l'étude de la mise en vitesse des moteurs pas à pas".
Meco'79. Third International Symposium, Grenoble, 13 au 15 juin 1979.
- 15| M. JUFER
"Transducteurs électromécaniques".
Edition Georgi 1979 .
- 16| H. MIYAMOTO
"Modélisation et commande optimale d'un moteur pas à pas par micropro-
cesseur".
Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine,
mai 1979 .
- 17| C. GOELDEL et M. ABIGNOLI
"Un banc d'essai d'un moteur pas à pas".
Mesure et régulation, Octobre 1977.

