

Étude des machines électriques (NOUVEAUX PROGRAMMES DE TERMINALE F₁)

par Philippe GIRONDEAU,
Lycée d'enseignement technique
« Les Grands Bois »
57701 Hayange.

Les nouveaux programmes de sciences physiques des sections F₁ introduisent des séances de travaux pratiques : on ne peut que s'en réjouir.

Si, en première F₁, l'élaboration et la mise en place des séances de manipulations se sont faites sans difficultés majeures, les machines électriques en classe de terminale F₁ semblent poser de sérieux problèmes à mes collègues qui enseignent dans cette section. En effet :

- certains établissements ne sont pas équipés de machines, je pense aux établissements sans section F₃ ;
- pour d'autres, où existe la section F₃ en particulier, la salle des machines électriques est monopolisée toute la semaine.

Alors que faire ? et avec quoi ?

C'est pour tenter de répondre à ces préoccupations que nous avons travaillé à quelques manipulations, qui ne sont peut-être pas toutes exploitables en classe, mais qui ont un point commun intéressant : aucun matériel n'a été acheté :

- les moteurs et génératrices à courant continu sont des dynamos d'automobiles que nous avons récupérées ;
- les alternateurs proviennent aussi de voitures, mais sont plus difficiles à trouver ;
- les transformateurs ont été fabriqués au lycée par les collègues de l'atelier électrique.

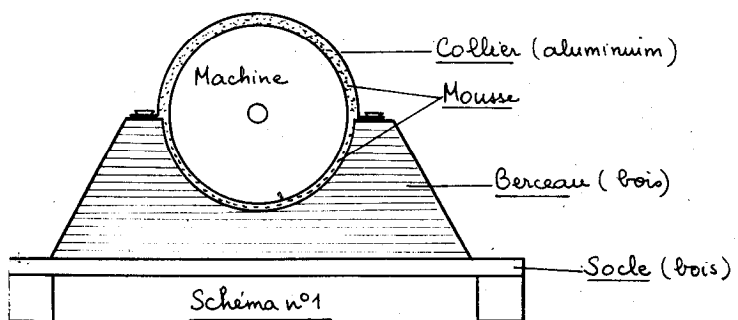
L'alimentation de toutes ces machines s'est faite par des générateurs 6 - 12 - 24 V alternatif et continu 10 A qu'on trouve dans tous les établissements.

I. PREPARATION.

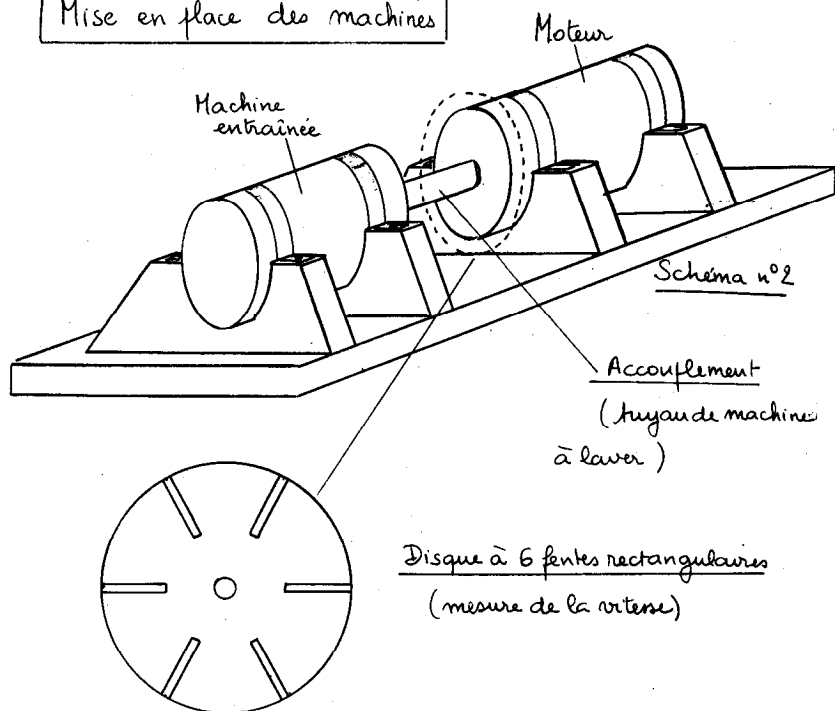
1. Mise en place des machines tournantes (schémas 1 et 2).

Elle se fait sur socle de bois (contreplaqué de 15 mm) : les machines sont posées sur deux berceaux (bois) et maintenues

par des colliers vissés sur les berceaux, eux-mêmes vissés sur le socle.



Mise en place des machines



L'accouplement entre le moteur et la machine entraînée, a été réalisé à l'aide d'un tuyau d'arrivée d'eau d'une machine à laver : sa longueur était d'environ 10 cm, ce qui permet de compenser quelques défauts d'alignement des arbres.

2. Mesure des vitesses de rotation.

Une méthode, déjà exposée dans le B.U.P., consistait à mesurer la f.é.m. induite (ou sa fréquence) dans une bobine devant laquelle tournait un aimant fixé à la machine (*).

Nous avons utilisé la méthode suivante, car l'aimant est assez difficile à fixer et déséquilibre l'ensemble tournant.

Une ampoule 12 V, 5 W (auto) éclaire une photorésistance à travers un disque sur lequel 6 fentes rectangulaires ont été découpées. Le disque est en tôle (fabriqué à l'atelier chaudronnerie) mais peut être en carton épais.

La photorésistance est montée en série avec une résistance R, et alimentée par une tension 12 V continue.

On relève à l'oscillographe le signal aux bornes de la résistance. Celui-ci a son amplitude maximum quand :

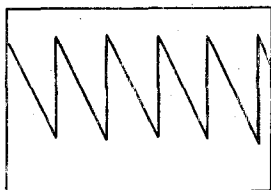
$$R = \sqrt{R_{\text{mini}} \cdot R_{\text{maxi}}}$$

où R_{mini} est la résistance de la photorésistance non éclairée.

où R_{maxi} est la résistance de la photorésistance éclairée,

En général, on prendra R de l'ordre de quelques k Ω .

Allure du signal.



Si τ est la durée (en ms) séparant 2 pics, et si N est le nombre d'intervalles entre 2 pics observés sur la totalité de l'écran, on a :

$$\tau = \frac{10 \text{ fois la durée du balayage (ms)}}{N}$$

Calcul de la vitesse de rotation.

Un tour de disque dure 6 τ (ms).

(*) N.D.L.R. . Voir page 50 de ce bulletin une remarque complémentaire sur cette mesure de vitesse.

En une seconde, le disque fait $\frac{1\,000}{6\tau}$ tours, soit par minute :

$$n = \frac{10\,000}{\tau}$$

n en tr/mn,
 τ en ms,

ou

$$n = \frac{10\,000 \times N}{\text{balayage (ms)}}$$

n fréquence de rotation en tr/mn,

N = nombre d'intervalles observés sur les 10 carreaux de l'écran.

Par exemple, si le balayage est fixé à 5 ms, $n = 200 \times N$, ce qui permet par exemple de tracer une courbe en fonction de la vitesse de 200 tr/mn en 200 tr/mn ; il suffira pour cela d'observer 5, puis 6, puis 7, puis 8, etc., intervalles pour avoir des vitesses de 1 000, 1 200, 1 400, 1 600... etc., tr/mn.

Incertitudes sur la mesure de la vitesse.

En prenant des balayages plus rapides, on n'améliore pas la précision sur τ , car le signal est moins « pointu ».

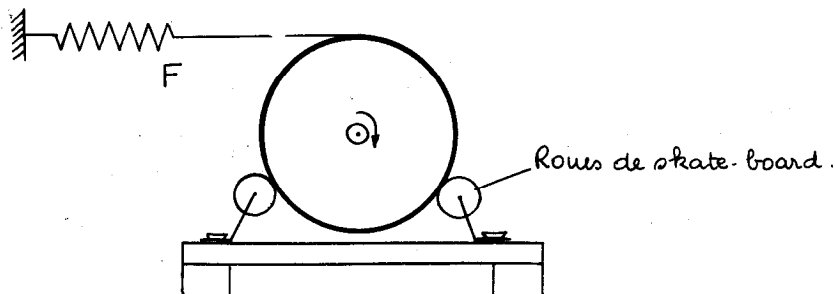
Je pense qu'il faut observer au moins 5 pics pour déterminer τ , de façon plus nette.

Dans ce cas, l'incertitude est égale à 0,2 divisions ; soit

$$\frac{0,2 \text{ div}}{10 \text{ div}} = 2\% \text{ si l'oscilloscope est correctement étalonné.}$$

3. Mesure du couple moteur (dynamo-balance).

Le moteur dont on veut déterminer le couple moteur, entraîne une génératrice montée sur quatre roues de skate-board.



Un dynamomètre (à torsion) (10 N) mesure la tension d'un fil fixé à la périphérie de la génératrice qui a été passée au tour pour la rendre la plus cylindrique possible. C'est là le point le plus délicat à réaliser.

4. Mesurage des intensités supérieures au calibre le plus élevé des ampèremètres.

Le problème est simple : comment mesurer 10 A quand on ne dispose que d'ampèremètres 5 A, voire 3 A ? Il faut shunter l'ampèremètre.

Nous avons réalisé un shunt, avec un fil de cuivre de 1,5 mm² de section, et d'une longueur de 82,5 cm.

Avec un ampèremètre (Pekly EM 30), shunté par ce fil, on obtient un ampèremètre 10 A en utilisant le calibre 0,1 V de l'appareil.

Il est quand même souhaitable de vérifier l'ensemble avec un ampèremètre 10 A, en série avec le précédent.

II. ETUDE DU MOTEUR A COURANT CONTINU ET A EXCITATION INDEPENDANTE.

1. Etude à vide.

Aucune charge n'est entraînée par le moteur.

La loi d'Ohm pour un récepteur s'écrit : $U = E + RI$ où toutes ces grandeurs sont relatives à l'induit (qui est le rotor).

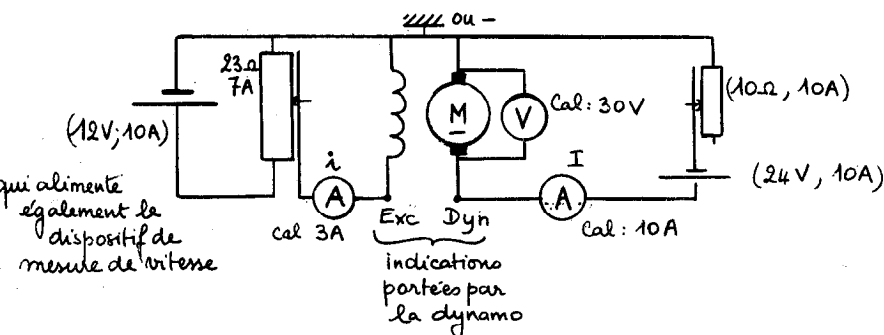
E est la force contre-électromotrice = $n \cdot N \cdot \varphi$:

- n est la fréquence de rotation de l'induit,
- N le nombre total de conducteurs de l'induit,
- φ le flux sous un pôle de l'inducteur.

L'étude à vide consiste à analyser n en fonction de :

- U tension d'alimentation de l'induit,
- i intensité du courant dans l'inducteur.

a) MONTAGE DE L'ÉTUDE A VIDE :



Le circuit inducteur est alimenté par un montage potentiométrique de façon à pouvoir régler i de 0 à la valeur maximum. Sa résistance est environ $7,5 \Omega$.

Le rhéostat en série avec l'induit a deux rôles :

- limite le courant au démarrage,
 - permet de régler la tension aux bornes de l'induit du moteur.
- La résistance de l'induit est $0,4 \Omega$.

b) MESURES :

La vitesse de rotation est fonction de U et de i ; $n = f(U, i)$.

2 études seront faites :

$$\left| \begin{array}{l} n = f(U) \text{ à } i = \text{cte}, \\ n = f(i) \text{ à } U = \text{cte}. \end{array} \right.$$

$n = f(U)$ à $i = 1,5$ maintenue constante.

U(V)	4	6	8	10	12	14	16	20	24	26,6
n (tr/mn)	526	950	1290	1715	2100	2475	2860	3660	4350	5000

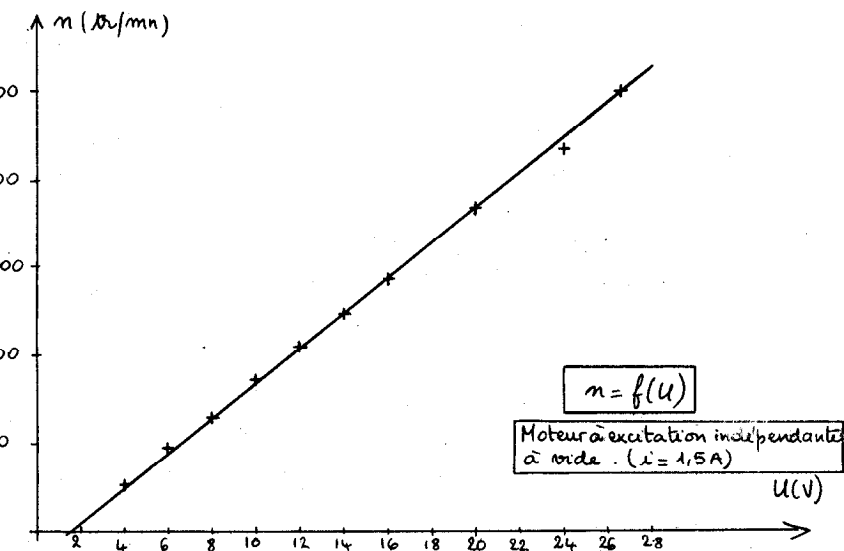
(I ne dépasse pas $3,7 \text{ A}$ à la vitesse maximum).

L'expérience montre que la courbe représentative, de $n = f(u)$ est une droite.

On la justifie en reprenant :

$$U = E + RI \quad \text{avec} \quad E = n N \varphi$$

$$\Rightarrow n = \frac{U - RI}{N \varphi}$$



I reste faible, et varie assez peu (entre 1,9 et 3,65 A).

φ est constant puisque i a été maintenue constante.

$\Rightarrow n = f(U)$ est une droite de pente $\frac{1}{N\varphi}$, passant par le point $U = RI$ quand $n = 0$ (le moteur ne commence à tourner qu'à partir de cette tension, voisine de 2 V).

$n = f(i)$ à $U = 15$ V (qu'on maintient fixe, en agissant sur le rhéostat de 10 Ω).

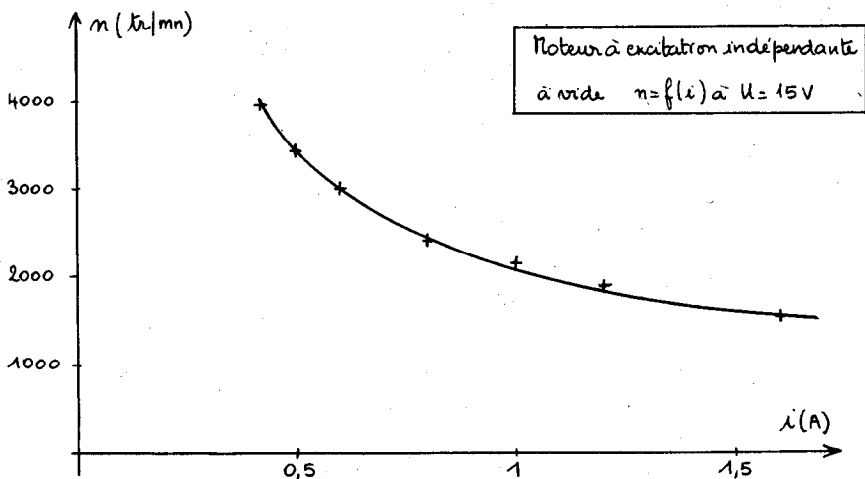
i (A)	1,6	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,42
n (tr/min)	1540	1875	2130	2400	3000	3410	3850

On reconnaît là une allure hyperbolique :

$$n = \frac{U - RI}{N\varphi}$$

U est constante, et RI varie peu,

n est inversement proportionnelle au flux.



(En première approximation, $\varphi = k \cdot i$, alors $n = f(i)$ est du type $n = \frac{A}{i}$ avec A constant).

Ceci montre que, si on débranche l'inducteur d'un moteur avant l'induit, le risque d'emballement n'est pas négligeable.

Les grosses machines s'emballent ; mais ici, les risques sont assez limités, et le fusible de l'alimentation de l'induit aura besoin d'être changé en cas de fausse manœuvre.

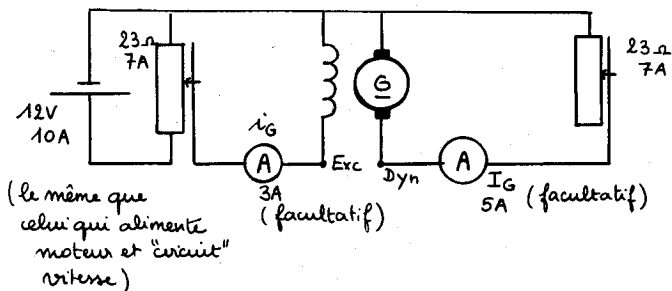
2. Etude du moteur en charge.

La charge qu'entraîne le moteur est une autre dynamo, fonctionnant cette fois, en génératrice : c'est la dynamo-balance qui servira à mesurer le couple moteur.

a) MONTAGES :

Celui du moteur est identique à celui de l'essai à vide.

Celui de la dynamo-balance est représenté ci-après :



b) CONDITIONS DE L'ESSAI :

La tension d'alimentation du moteur U_M est fixe : $U_M = 15 \text{ V}$.

L'intensité du courant inducteur est également fixée : $i_M = 1$ ou $1,4 \text{ A}$.

Si on « charge » le moteur, en faisant débiter de plus en plus la génératrice :

- il absorbe une plus grande intensité,
- sa vitesse varie.

Plusieurs études sont proposées :

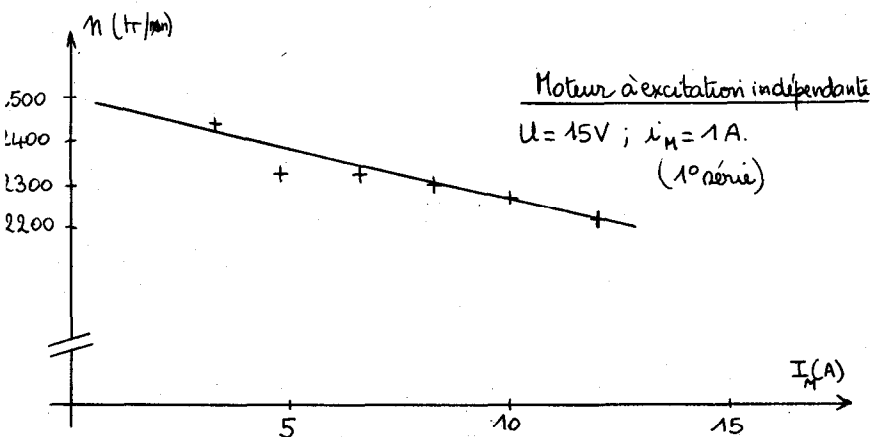
$n = f(I_M)$: comment varie la vitesse en fonction de l'intensité ?

$F = f(I_M)$: comment varie le moment du couple, donc l'indication du dynamomètre, avec l'intensité ?

$F = f(n)$: comment varie le moment du couple avec la vitesse de rotation ? c'est la caractéristique mécanique, et c'est la plus importante.

c) ÉTUDE $n = f(I_M)$ à $i_M = 1 \text{ A} = \text{cte}$, $15 \text{ u} = 15 \text{ V} = \text{cte}$:
(on peut régler i_M à une valeur plus élevée, l'intensité I_M sera alors plus faible).

$I_M (\text{A})$	3,3	4,8	6,6	8,3	10	12
$n (\text{tr/min})$	2440	2325	2325	2300	2270	2220



L'expérience montre que la courbe représentative de $n = f(I)$ pour un moteur est une droite, ce qu'on peut justifier par

$$n = \frac{U - RI}{N\varphi} \text{ puisque } U \text{ et } \varphi(i) \text{ sont constants.}$$

MAIS :

entre $I = 0$ et $I = 10$ A, n varie de 2 500 à 2 270 tr/mn,

donc de 230 tr/mn, soit $\frac{230}{2500} = 9,2 \%$,

$R = 0,4 \Omega$ (mesurée par une méthode voltampèremétrique) donc $U - RI$ varie de 15 V ($I = 0$) à 11 V, donc de 4 V, soit

$$\frac{4}{15} = 26,7 \%,$$

$\Rightarrow \varphi$ n'est donc pas constant : la machine n'est pas compensée c'est-à-dire que I vient diminuer φ . C'est la réaction magnétique de l'induit $\varphi(i) + \varphi(I) < \varphi(i)$.

d) ÉTUDE $F = f(I_M)$ A $i_M = 1,4$ A CONSTATE ET A $n = 2000$ tr/mn CONSTATE :

Les problèmes des frottements sont très difficiles à résoudre, et l'indication du dynamomètre n'est pas la même pour les valeurs de I_M croissantes, puis décroissantes.

I_M (A)	5,8	7	8	9	10
F (N)	0,7	1,9	3,1	4,3	5,6
F (N)		2,7	3,9	5,2	—

intensité croissante

intensité décroissante

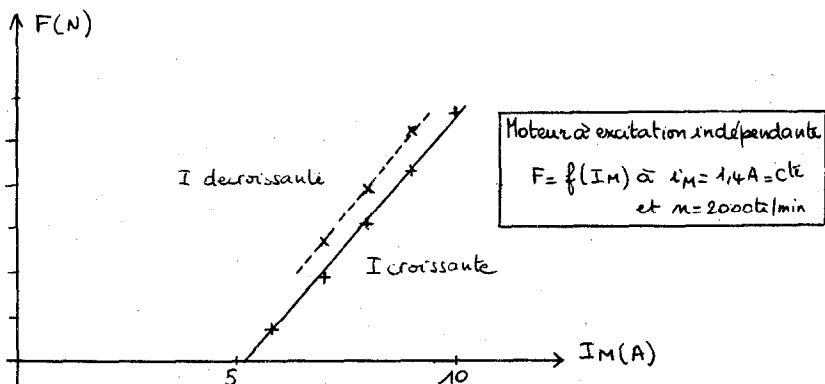
Remarques.

$F = 0$ quand la dynamo tourne, sans être excitée ($i_G = 0$) et à vide ($I_G = 0$).

Le moment du couple moteur est bien sûr directement proportionnel à F , c'est pour cette raison que j'ai laissé F .

La courbe représentative $F = f(I_M)$ est une droite pour les valeurs croissantes de I_M ; il en est de même pour I_M décroissante, et les deux droites sont parallèles.

Pour $I_M = 5,2$ A, le couple utile est nul; au-delà, on peut dire que le moment du couple utile a ses variations proportionnelles à celles de l'intensité absorbée, I_M , par l'induit du moteur.



Ceci peut se justifier par : $C_u = \frac{EI - p_c}{2\pi n}$ où p_c sont les pertes constantes du moteur et de la génératrice entraînée.

Toujours avec $E = n N \varphi$, qu'on peut admettre constante en première approximation puisque n et $\varphi(i)$ ont été fixés $\Rightarrow C_u = aI - b$, où a et b sont des constantes. C'est bien l'équation d'une

droite, avec $C_u = 0$, pour $I = \frac{p_c}{E}$: on peut donc déterminer

$p_c = EI \approx 17 \times 5,2 \approx 90 \text{ W}$ (la valeur $E \approx 17 \text{ V}$ sera lue dans l'étude de la génératrice).

e) ÉTUDE $F = f(n)$ A $U = 20 \text{ V} = \text{cte}$ ET $i_M = 1,6 \text{ A} = \text{cte}$:

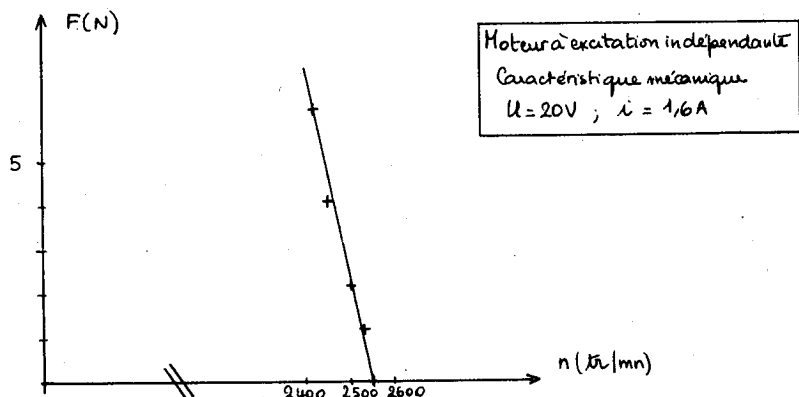
Cette caractéristique est la caractéristique mécanique du moteur, et c'est la plus importante, car elle permet de déterminer le point de fonctionnement d'un groupe moteur-récepteur, en connaissant la caractéristique mécanique du récepteur.

On se place à $U = \text{cte}$ car, dans les conditions habituelles, la tension fournie par le réseau est fixe.

$F(N)$	0	1,2	2,2	4,1	6,2
$n (\text{tr/min})$	2550	2530	2500	2450	2420

$\sim U = 20 \text{ V}$.

La caractéristique mécanique est une droite, ce qu'on peut justifier en première approximation, c'est-à-dire en admettant le flux constant, par :



$$C_u = \frac{EI - p_c}{2\pi n} = \frac{N\varphi I - p_c}{2\pi n},$$

$$\text{avec } I = \frac{U - nN\varphi}{R}$$

C_u est du type $a - bn$.

3. Critiques.

Elles sont nombreuses et je les attends :

* Pour commencer, il faut beaucoup de matériel pour mettre un T.P. en place : par exemple, à l'essai en charge du moteur, il faudra par groupe :

2 générateurs : l'un de 12 V, l'autre de 24 V,

1 oscillographe,

3 ampèremètres dont un de 10 A,

4 rhéostats : $3 \times (27 \Omega ; 7 \text{ A}), (10 \Omega ; 10 \text{ A}),$

2 « dynamos »,

les fils...

Je pense qu'on peut placer 3 ou 4 élèves par groupe : ils ne seront pas trop de 4, pour tout relever !

* Je propose des interprétations « simplistes », mais je pense que l'essentiel est de comprendre le fonctionnement des machines, sans trop entrer dans des détails que nos « mécaniciens » ne comprendraient peut-être pas et dont ils ne verraient pas l'utilité. Je ne veux pas dire qu'ils sont incapables de comprendre, mais il ne faut pas oublier qu'au maximum 6 séances

de manipulations seront consacrées aux machines : il faut donc aller à l'essentiel.

* Pour simplifier l'étude en charge, on peut se passer de dynamo-balance et faire frotter un fil d'acier dans la gorge de la poulie du moteur, mais cela ne permet pas l'étude du couple.

III. ETUDE DU MOTEUR A COURANT CONTINU, EXCITATION SERIE.

L'étude n'a pas été faite, pour la raison suivante : l'inducteur a une résistance de $7,5 \Omega$, l'induit de $0,4 \Omega$, or dans les machines excitées en série, l'ordre de grandeur des résistances est le même pour les deux enroulements.

De plus, en fonctionnement en shunt, l'inducteur n'est traversé que par un courant d'intensité $1,6 \text{ A}$ au maximum, alors que l'intensité du courant induit peut atteindre 10 A : ces deux valeurs ne sont donc pas compatibles.

Il faut donc chercher ailleurs, je pense en particulier aux moteurs à courant alternatif, dits « moteurs universels », et qui étaient alimentés en 110 V , 50 Hz . Le fonctionnement doit être possible sous 24 ou 36 V continu.

IV. ETUDE DE LA GENERATRICE A EXCITATION INDEPENDANTE.

« La dynamo est présentée comme une machine réversible surtout utilisée comme moteur, la marche en génératrice n'étant souvent qu'une phase particulière du fonctionnement d'un moteur à courant continu (freinage en récupération par exemple) ». Ceci est un extrait des commentaires du programme.

La réversibilité de la « dynamo » a été mise en évidence depuis le début puisque c'est le moteur d'entraînement.

Il me paraît cependant intéressant de faire l'étude de la génératrice à courant continu, ne serait-ce que pour montrer la nécessité de la surexcitation de la génératrice pour le freinage en récupération.

1. Essais à vide de la génératrice à excitation indépendante.

a) MONTAGE :

C'est le même que pour l'étude en charge du moteur, seulement ici, on s'intéresse à la génératrice : on peut donc supprimer les appareils de mesures dans les circuits du moteur.

Pour la génératrice, on adoptera la convention suivante :

i_G est l'intensité du courant dans le circuit inducteur,

I_G est l'intensité du courant dans le circuit induit,

U_G est la tension aux bornes de l'induit.

Pour le moteur, la convention est la même ; les grandeurs relatives à l'inducteur sont notées en minuscules, celles à l'induit en majuscules.

b) MESURES :

A vide, le voltmètre mesure la tension aux bornes de l'induit, donc la force électromotrice E_G .

Deux paramètres peuvent la modifier :

- l'intensité i_G ,
- la vitesse de rotation.

Deux études seront donc réalisées :

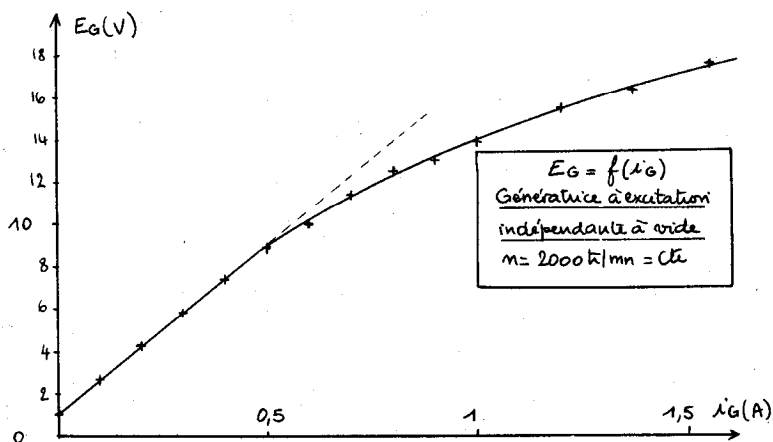
$$E_G = f(i_G) \text{ à } n \text{ constante,}$$

$$E_G = f(n) \text{ à } i_G \text{ constante.}$$

Remarque.

Pour le moteur, I_M reste inférieure à 10 A, même pour l'étude en charge de la génératrice. L'achat de moteurs d'entraînement n'est pas nécessaire.

c) ÉTUDE $E_G = f(i_G)$ A $n = 2000$ tr/mn CONSTANTS :



i_G (A)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,37	1,55
$E(V)$	1,1	2,7	4,3	5,8	7,4	8,9	10	11,4	12,5	13	13,9	15,5	16,4	17,6

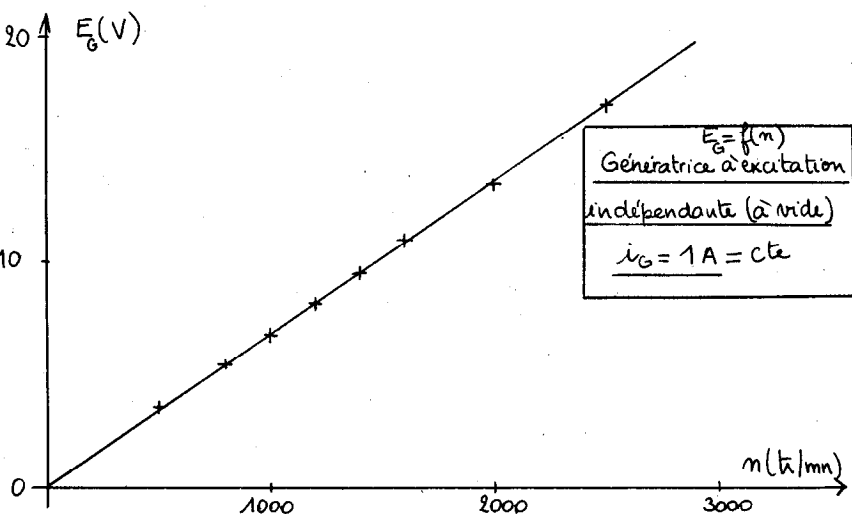
Pour justifier l'allure de cette courbe, il suffit d'examiner la relation $E = n N \varphi$: n a été maintenue constante, donc E est proportionnelle au flux, c'est-à-dire au champ magnétique B .

Quant à i_G , c'est à l'excitation magnétique H , qu'elle est proportionnelle : on retrouve donc la courbe d'aimantation $B = f(H)$ avec la force électromotrice rémanente, et la saturation.

d) $E_G = f(n)$ à $i_G = 1 \text{ A} = \text{cte}$:

On relève la force électromotrice, en fonction de la vitesse de rotation de l'induit de la génératrice.

$n (\text{tr/mn})$	500	800	1000	1200	1400	1600	2000	2500
$E (\text{V})$	3,6	5,5	6,8	8,2	9,5	11	13,5	17



Toujours en utilisant $E = n N \varphi$, on montre que, si i_G est constante, φ est constant, E est directement proportionnelle à la vitesse de rotation.

2. Essais en charge.

a) MONTAGE :

Il s'agit toujours du même montage (étude du moteur en charge). Un voltmètre aux bornes de l'induit de la génératrice mesure U_G . Le courant débité dans la charge sera noté I_G .

b) MESURES :

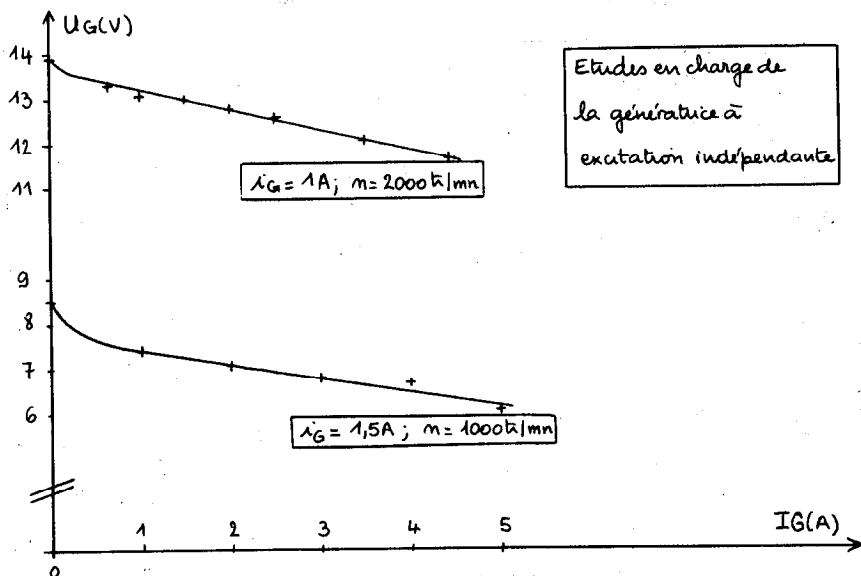
La vitesse a été maintenue constante dans les deux essais où la tension U_G est relevée en fonction de I_G .

* $n = 2000 \text{ tr/mn}$; $i_G = 1 \text{ A}$.

$I_G(\text{A})$	0	0,65	1	1,5	2	2,5	3,5	4,45
$U_G(\text{V})$	13,9	13,3	13,1	13	12,8	12,6	12,1	11,7

* $n = 1000 \text{ tr/mn}$; $i_G = 1,5 \text{ A}$.

$I_G(\text{A})$	0	1	2	3	4	5
$U(\text{V})$	8,5	7,4	7,1	6,8	6,7	6,1



Nous avons là, la loi classique pour un générateur (l'induit de la génératrice) : $U_G = E - RI_G$, qui est l'équation d'une droite $U_G = f(I_G)$ à E et R constantes.

On peut en déduire R , en déterminant la pente de ces droites :

$$\Rightarrow R = 0,44 \, \Omega \quad (i_G = 1 \text{ A}; n = 2000 \text{ tr/mn}),$$

$$\Rightarrow R = 0,3 \, \Omega \quad (i_G = 1,5 \text{ A}; n = 2000 \text{ tr/mn}).$$

M. R. MOREAU, qui a bien voulu relire ce texte, nous a fait la remarque suivante : La courbure des caractéristiques pour les faibles intensités I_g est due à la nature des contacts balais-collecteur, qui engendrent une non-linéarité, si bien que la notion de résistance n'a de sens que pour I_g 1 A.

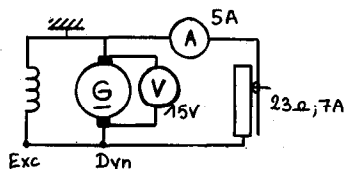
3. Freinage des moteurs avec récupération.

Si U est la tension d'alimentation du moteur, fournie par un réseau, la f.c.é.m. $E_M < U$. Pour que la génératrice puisse fournir de l'énergie au réseau, il faut que $E_G > U$, ce qui implique une surexcitation de la génératrice, car les deux forces électromotrice et contre-électromotrice sont de même origine.

Donc, pour une vitesse donnée, l'intensité du courant dans l'inducteur de la génératrice devra être supérieure à celle du moteur, pour que la f.é.m. soit supérieure à la f.c.é.m.

V. ETUDE DE LA GENERATRICE A EXCITATION SHUNT.

1. Montage.



2. Amorçage.

Plusieurs conditions pour que la machine fonctionne ainsi :

- La polarité de la borne Dyn doit être positive, pour que le flux (produit par le courant dû à la f.é.m. rémanente) s'ajoute au flux rémanent. Si ce n'est pas le cas, il faudra inverser le sens de rotation.
- La vitesse doit être suffisante ($> 1\,000$ tr/mn).

3. Etude en charge.

C'est dans le but de comparer la chute de tension de la machine excitée en shunt, à celle de la machine excitée de façon indépendante que cet essai a été réalisé.

EXCITATION SHUNT :

Un point en charge a servi de référence : U_G à 5 A, c'est-à-dire $U_G = 11,4$ V. Ce point a été obtenu à 2 000 tr/mn, l'induc-

teur branché directement sur l'induit, la charge étant parcourue par $I_G = 5$ A (valeur maximum, au-delà $I_M > 10$ A).

EXCITATION INDÉPENDANTE :

Ce même point a été obtenu avec la machine excitée de façon indépendante, en ajoutant un rhéostat de champ (23Ω , 7 A) dans le circuit d'excitation. En agissant sur ce rhéostat, on règle i_G , pour avoir $U = 11,4$ V, $I_G = 5$ A à $n = 2000$ tr/mn.

Excitation shunt	$I_G(A)$	5	4	3	2	1	0
	$U(V)$	11,4	12,2	12,8	13,7	14,3	14,9
	$\Delta U(V)$	3,5	2,7	2,1	1,2	0,6	—

Excitation indépendante	$I_G(A)$	5	4	3	2	1	0
	$U(V)$	11,4	12,3	12,6	13,2	14	14,5
	$\Delta U(V)$	3,1	2,2	1,9	1,3	0,5	—

Interprétations.

La chute de tension est donc plus importante pour la machine excitée en dérivation. Ceci s'explique de deux façons :

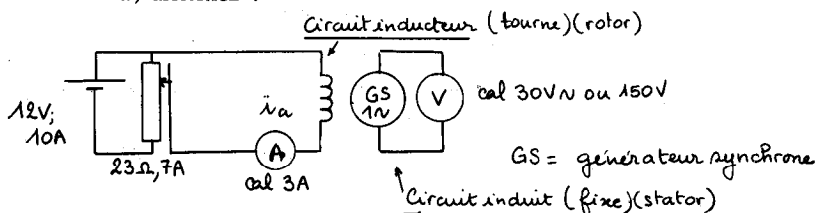
- l'induit de cette génératrice doit produire $I_G + i_G$, alors que celui de la génératrice à excitation indépendante ne fournit que I_G ;
- le plus important est que la tension inducteur diminue en excitation shunt, d'où une diminution du courant inducteur i_G , donc de la f.é.m. E_G , ce qui explique la plus grande chute de tension.

VI. ETUDE D'UN ALTERNATEUR MONOPHASE (2 CV ou R 4).

1. Essai à vide.

Tout d'abord, il faut tirer des fils avant les diodes de redressement ou enlever celles-ci. Dans ce cas, il reste 4 fils de deux couleurs différentes (jaune et bleue) : on relie ensemble deux fils d'une même couleur et on relève la tension entre les deux autres qui sont les bornes de l'induit.

a) MONTAGE :



L'entraînement est toujours assuré par une dynamo fonctionnant en moteur.

b) MESURES :

A vide, la f.é.m. dépend de :

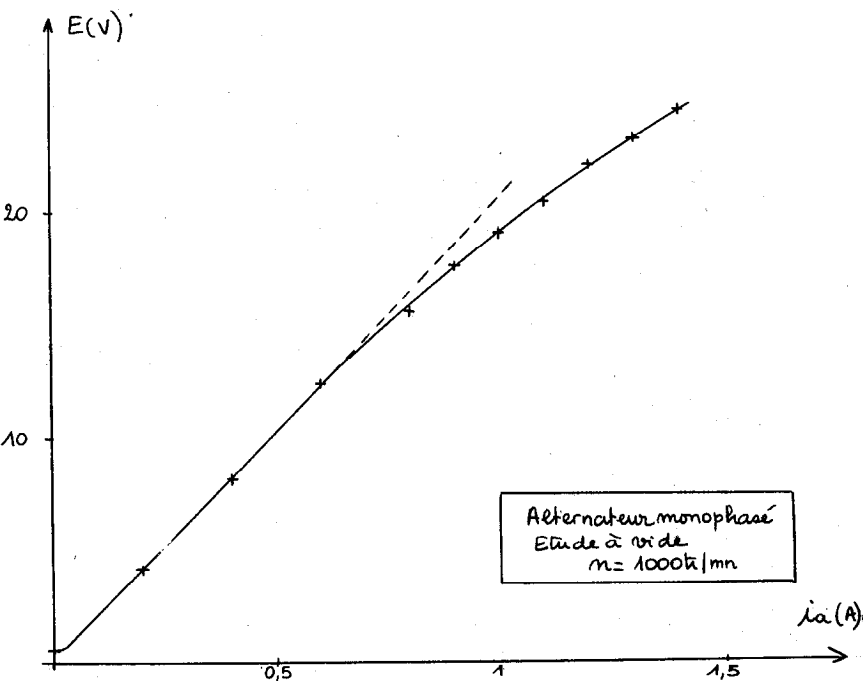
- i_a = intensité du courant dans le circuit inducteur de l'alternateur ;
- n vitesse de rotation de l'inducteur.

Il est bon de visualiser la f.é.m. à l'oscillographe pour étudier la fréquence de celle-ci.

c) ÉTUDE DE LA F.É.M. E EN FONCTION DU COURANT D'EXCITATION i_a :

Pour $n = 1\,000$ tr/mn constants :

i_a (A)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
E (V)	0,55	4,2	8,4	12,4	15,6	17,6	19	20,4	22	23,2	24,5



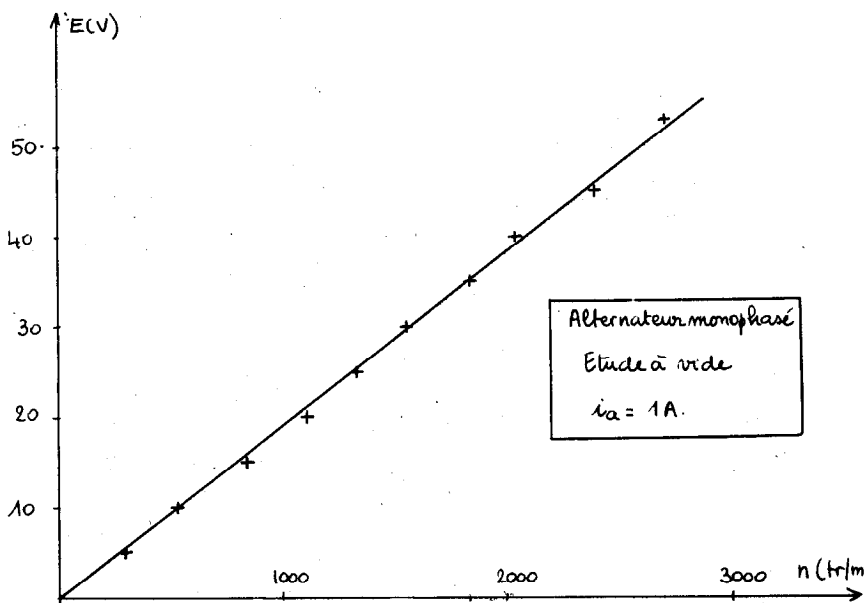
L'interprétation de l'allure de cette courbe est la même que pour la génératrice à courant continu (la loi s'écrivant ici $E = KNp \cdot n \cdot \varphi$).

d) ÉTUDE DE LA F.É.M. E EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION n :

L'intensité du courant inducteur a été fixée à $i_a = 1$ A.

n (tr/mm)	2740	2400	2040	1840	1550	1330	1110	840	530	290
E (V)	53	45	40	35	30	25	20	15	10	5

Là aussi, l'allure se justifie comme pour la génératrice : E est directement proportionnelle à n , à i_a constante donc à φ constant.



e) FRÉQUENCE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE :

L'observation simultanée sur un oscillographe bicourbe de la f.é.m. et de la tension servant à la mesure de la vitesse, montre que ces deux grandeurs ont même fréquence, donc même période.

On a donc $f = 6 n$, puisque le disque a 6 fentes.

En comparant avec $f = p n \Rightarrow p = 6$ paires de pôles, DONC 12 PÔLES, ce qu'on vérifie en ouvrant l'alternateur.

2. Etude en charge.

Dans tout ce qui suit, on a maintenu la vitesse constante (1000 tr/mn) et l'excitation constante ($i_a = 0,6$ A) : ces valeurs peuvent paraître faibles mais elles sont imposées par :

$$I_{\text{Moteur}} < 10 \text{ A.}$$

On ajoute au montage précédent, un récepteur aux bornes de l'induit et un ampèremètre (5 A $\sim$), qui mesure l'intensité débitée I_a .

a) RÉCEPTEUR RÉSISTIF :

C'est un rhéostat de 23 Ω , 7 A.

$I_a(\text{A})$	0	1	2	3	4	5
$U(\text{V})$	12,6	11,6	10,8	9,3	7,7	5,8

b) RÉCEPTEUR INDUCTIF :

Le plus difficile est de trouver un récepteur qu'on peut modifier en gardant constant son facteur de puissance.

2 bobines de 500 spires ; 2,7 Ω de transformateur démontable, ont été utilisées. Elles possèdent un point milieu, et suivant les associations, on peut relever quelques points (U, I_a).

$I_a(\text{A})$	0	1,3	3,3	4,4
$U(\text{V})$	12,6	10	7	4,9

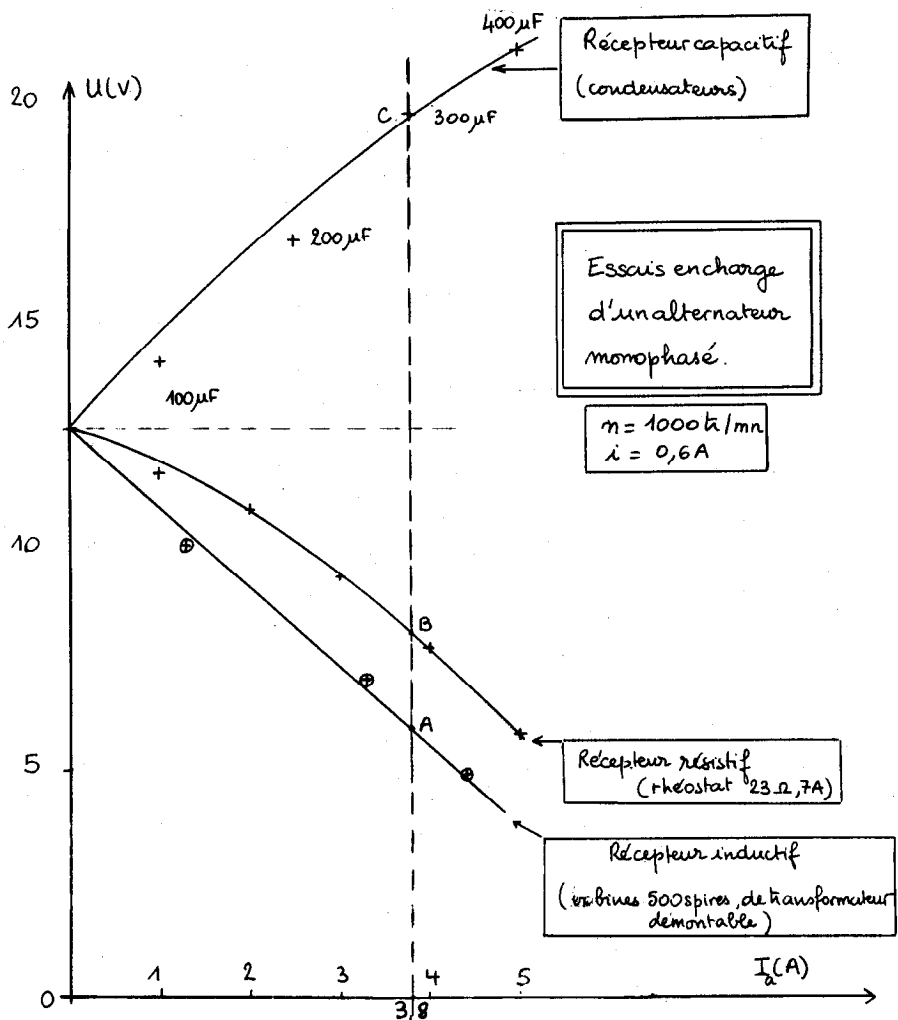
$$\text{tg } \varphi \simeq 1,25.$$

c) RÉCEPTEUR CAPACITIF :

Il s'agit de condensateurs de 100 μF , 200 μF , 300 μF et 400 μF .

$I_a(\text{A})$	0	0,95	2,5	3,8	5
$U(\text{V})$	12,6	14,1	16,8	19,6	21

Les 3 courbes sont tracées dans le même repère, pour faciliter l'interprétation.



d) CHUTES DE TENSION :

Il est impossible d'obtenir la même intensité débitée pour comparer les 3 récepteurs, puisqu'on ne peut pas les régler de façon continue. L'intensité 3,8 A a été choisie car elle correspond à des valeurs expérimentales très proches.

$I_a = 3,8 \text{ A}$:

- Pour la résistance (point B), la chute de tension,
 $\Delta U = 12,6 - 8 = 4,6 \text{ V}$.
- Pour le récepteur inductif (point A),
 $\Delta U = 12,6 - 6 = 6,6 \text{ V}$.
- Pour le récepteur capacitif (point C),
 $\Delta U = 12,6 - 19,6 = -7 \text{ V}$.

La chute de tension la plus importante est donc celle observée avec un récepteur inductif.

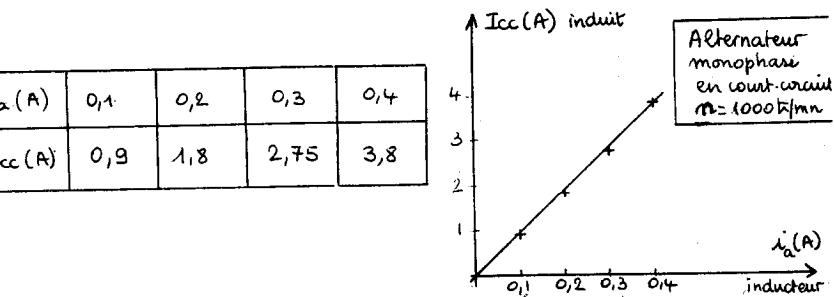
Le récepteur capacitif est donc soumis à une tension supérieure à la f.é.m.

La construction du diagramme de Behn-Eschenburg interprétera ces observations au paragraphe 4.

3. Essais en court-circuit.

Il est nécessaire pour la construction du diagramme précité.

En pratique, on court-circuite l'induit avec un ampèremètre (5 A $\sim$) et on étudie ce courant de court-circuit I_{cc} en fonction du courant inducteur ($n = 1000 \text{ tr/mn}$).



On peut donc déterminer l'impédance interne de notre alternateur, par le rapport $Z = \frac{E}{I_{cc}}$ pour une même valeur de i_a .

Ce rapport a sensiblement la même valeur, pour $i_a \leq 0,4 \text{ A}$, puisque la f.é.m. et l'intensité de court-circuit sont toutes deux proportionnelles à i_a . On prendra $Z \simeq 2,3 \Omega$ (valeur moyenne

de $\frac{E}{I_{cc}}$ pour i_a 0,1 à 0,4 A).

4. Diagramme de Behn-Eschenburg.

Si r est la résistance de l'induit, et $l\omega$, la réactance synchrone $Z^2 = r^2 + (l\omega)^2$.

L'hypothèse de Behn-Eschenburg consiste à admettre $l\omega = \text{cte}$, c'est-à-dire à négliger la saturation.

Ici :

$$r = 0,48 \, \Omega; \quad Z = 2,3 \, \Omega \Rightarrow l\omega = 2,25 \, \Omega.$$

L'essai en charge a été réalisé à $i_a = 0,6 \, \text{A}$ donc dans les conditions de l'hypothèse de Behn-Eschenburg.

A la page 29, on trouvera la construction de ce diagramme réalisé pour $I_a = 2 \, \text{A}$.

L'équation traduisant le fonctionnement de l'alternateur est :

$$\vec{E} = \vec{U} + r\vec{I}_a + l\omega\vec{I}_a$$

$$\text{avec : } \begin{cases} E = 12,6 \, \text{V} \text{ (la saturation ne se manifeste qu'après } i_a = 0,6 \, \text{A}), \\ rI_a = 0,96 \, \text{V} \quad \vec{rI}_a \text{ est en phase avec } \vec{I}_a, \\ l\omega I_a = 4,5 \, \text{V} \quad \vec{l\omega I}_a \text{ est en quadrature avance avec } \vec{I}_a. \end{cases}$$

Pour le récepteur résistif, $\vec{U}$ et $\vec{I}_a$ sont en phase.

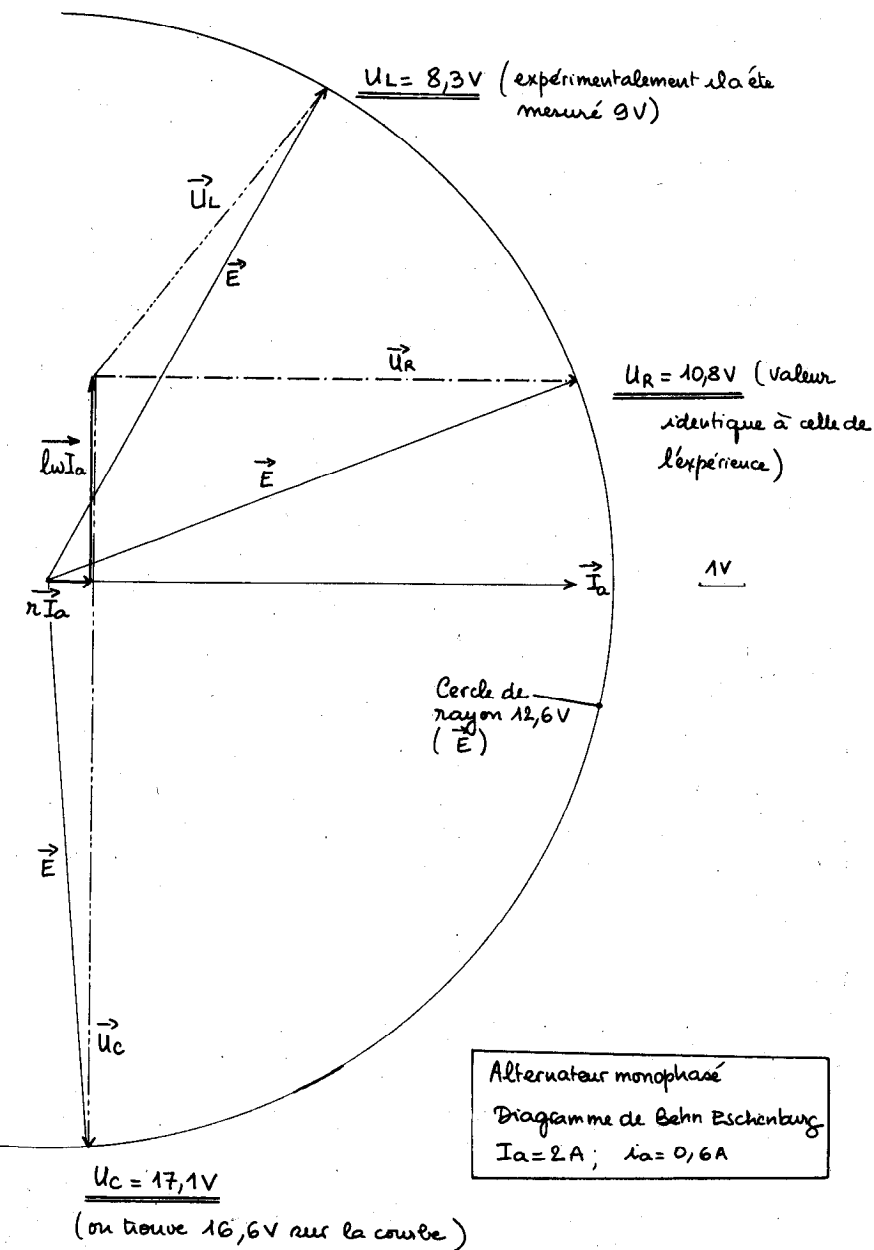
Pour le récepteur capacitif, $\vec{U}$ est en retard de $\pi/2$ sur $\vec{I}_a$.

Pour le récepteur inductif, $\vec{U}$ est en avance de 51° sur $\vec{I}_a$
($\text{tg } \varphi \simeq 1,25$).

Pour conclure.

Les valeurs trouvées par la construction sont voisines des valeurs expérimentales relevées (ou extrapolées) :

- pour les récepteurs inductifs, la méthode de Behn-Eschenburg est pessimiste : nous trouvons une tension plus faible que la réalité;
- pour les récepteurs capacitifs, la méthode est optimiste puisque nous trouvons une tension supérieure.



VII. ETUDE D'UN TRANSFORMATEUR MONOPHASE.

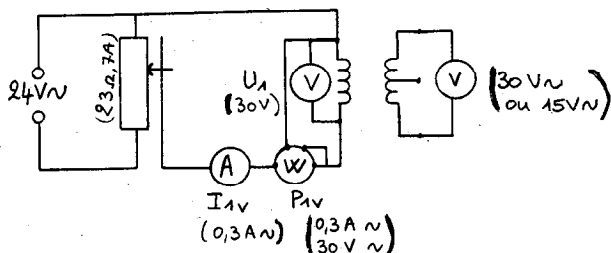
1. L'appareil utilisé.

Pour des raisons de sécurité, on ne peut employer le sec-teur, car nos salles ne sont pas équipées de dispositifs d'arrêts d'urgence. Nous avons donc demandé à nos collègues de l'atelier électrique de nous fabriquer des transformateurs 24 V/6-12 V (60 VA).

Si certains établissements sont intéressés, nous pouvons les leur fournir. Il suffit pour cela, de prendre contact avec M. le Chef des Travaux du lycée d'enseignement technique, 57701 Hayange, qui les renseignera de façon plus précise.

2. Essai à vide.

a) MONTAGE :



b) MESURES :

$U_1(V)$	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4
$U_2(V)$	13	11,9	10,8	9,7	8,7	7,6	6,5	5,5	4,3	3,3	2,2
$I_N(A)$	0,3	0,24	0,195	0,165	0,14	0,12	0,1	0,08	0,06	0,048	0,033
$P_{1V}(W)$	1,2	0,95	0,75	0,6	0,5	0,35	0,3	0,2	0,1	non mesurable	
$\frac{U_2}{U_1}$	0,542	0,541	0,540	0,539	0,544	0,543	0,542	0,550	0,537	0,550	0,550

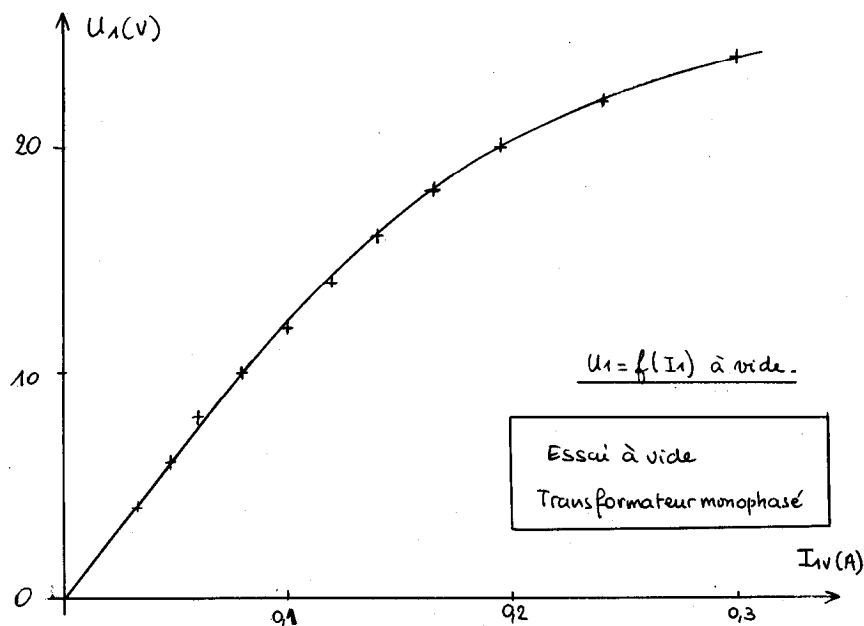
c) INTERPRÉTATIONS :

* Cet essai à vide montre que la puissance consommée est faible.

* Il montre que le rapport des tensions à vide est constant : c'est le rapport de transformation (par construction N_1 , le nombre

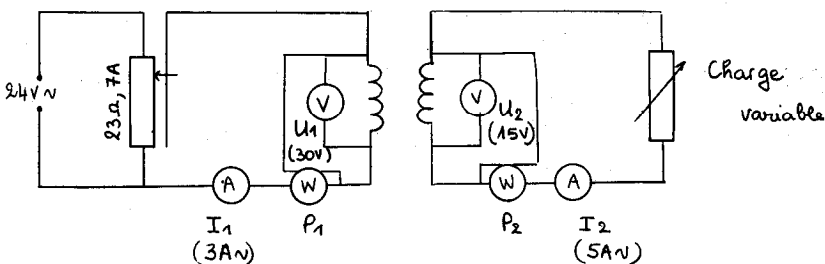
de spires primaires est 180, $N_2 = 96 \Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = 0,533$).

* Il permet de tracer la courbe d'aimantation du circuit magnétique :



3. Essais en charge.

a) MONTAGE :



b) MESURES :

* Un montage potentiométrique a été utilisé au primaire, car la tension délivrée par le générateur n'est pas constante. A pleine charge (5 A au secondaire) la tension primaire était au-dessous de 24 V : la tension primaire a donc été fixée à 20 V.

* L'essai avec charge inductive n'a pas donné de résultats satisfaisants, car la tension secondaire était supérieure à celle trouvée pour une charge résistive avec la même intensité du courant secondaire (voir paragraphe 6).

Charge résistive (rhéostat de 23 Ω , 7 A).

$I_2(A)$	1	2	3	3,9	4,9
$U_2(V)$	10,6	10,2	9,9	9,6	9,15
$P_2(W)$	10	20	29	36	42
$I_1(A)$	0,61	0,95	1,5	2,03	2,6
$P_1(W)$	11,6	23	33,5	42,5	52
$\eta = \frac{P_2}{P_1}(\%)$	86,2	86,9	86,6	84,7	80,8
$\frac{I_1}{I_2}$	0,61	0,475	0,5	0,520	0,531

$$U_1 = 20V = Cte$$

$$(U_{2V} = 10,8V)$$

$$(I_{2max} = 5A, \text{ car } S = 60 VA)$$

Charge capacitive (condensateurs de 200 μF , 400 μF et 600 μF).

$I_2(A)$	0,5	1,2	2,05
$U_2(V)$	10,9	11	10,9
$P_2(W)$	0,7	1	2
$I_1(A)$	0,11	0,5	0,97
$P_1(W)$	1,7	2,4	4,8

$$U_1 = 20V = Cte$$

$$U_{2V} = 10,8V$$

c) INTERPRÉTATIONS :

* Le rapport des intensités $\frac{I_1}{I_2}$ tend vers une limite égale au rapport inverse des tensions à vide. Il s'en rapproche de plus en plus au fur et à mesure que I_2 augmente.

* En comparant la chute de tension observée avec une charge résistive, par rapport à celle observée avec une charge capacitive pour une même intensité ($I_2 = 2 A$), on aboutit à la même conclusion que pour l'alternateur :

$$\Delta U_R = 10,8 - 10,2 = 0,6 \text{ V} \quad \Delta U_C = 10,8 - 10,9 = -0,1 \text{ V}.$$

La chute de tension est donc plus élevée avec la charge résistive.

* Le rendement (charge résistive), varie avec l'intensité secondaire : il est maximum entre 2 et 3 A (intensité de I_2).

* La charge capacitive consomme une certaine puissance (active), ce qui montre que les condensateurs utilisés n'étaient pas parfaits.

4. Essai en court-circuit.

a) MESURES :

Sous une tension primaire faible (U_{1cc}), on court-circuite le secondaire avec un ampèremètre (calibre 10 A ou 5 A à la limite).

$U_{1cc} \text{ (V)}$	4,2	2,8	1,4
$I_{1cc} \text{ (A)}$	3	2	1
$I_{2cc} \text{ (A)}$	5,5	3,67	1,82
$P_{1cc} \text{ (A)}$	12,3	5,4	1,4

Au secondaire, il ne reste que l'ampèremètre.

b) INTERPRÉTATIONS :

* Le rapport $\frac{I_{1cc}}{I_{2cc}}$ est égal au rapport inverse des tensions à vide $\frac{U_{2v}}{U_1}$, ce qui montre la validité de l'hypothèse de Kapp pour les courants de court-circuit (l'intensité primaire à vide est négligeable devant l'intensité primaire en charge).

* Le rapport $\frac{U_{1cc}}{I_{1cc}} = 1,4 \, \Omega$ est constant : c'est l'impédance du transformateur ramenée au primaire = Z_p .

L'impédance du transformateur ramenée (ou vue du secondaire) au secondaire :

$$Z_s = m^2 Z_p \quad \text{avec} \quad m^2 = \left(\frac{U_{2v}}{U_1} \right)^2 \simeq (0,54)^2,$$

$$\underline{Z_s = 0,42 \, \Omega.}$$

* Les rapports $\frac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2}$ et $\frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$ sont constants : ils mesurent,

respectivement, les résistances du transformateur ramenées au primaire R_p , et au secondaire R_s .

$$R_p = 1,37 \, \Omega \quad \text{et} \quad R_s = 0,41 \, \Omega$$

(les résistances des enroulements sont de $0,47 \, \Omega$ au primaire et de $0,21 \, \Omega$ au secondaire) (mesurées en continu).

* Les réactances ramenées au primaire et au secondaire sont donc :

$$X_p = \sqrt{Z_p^2 - R_p^2} = 0,29 \, \Omega \quad X_s = 0,09 \, \Omega.$$

5. Diagramme de Kapp.

Par la construction du diagramme de Kapp, nous retrouvons donc des valeurs proches des valeurs expérimentales.

On peut remarquer que l'application de la relation approchée $\Delta U_2 = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$ conduit à :

Pour la charge résistive :

$$I_2 = 4,9 \, \text{A}, R_s I_2 = 2 \, \text{V} = \Delta U_2 \Rightarrow U_2 = U_{2V} - \Delta U_2 = \underline{8,8 \, \text{V}}.$$

Pour la charge capacitive :

$$I_2 = 2,05 \, \text{A}, R_s I_2 = 0,84 \, \text{V} \quad \cos \varphi_2 = 0,09 \quad X_s I_2 = 0,18 \, \text{V} \\ \sin \varphi_2 = -0,99 (< 0)$$

$$\Delta U_2 = -0,1 \, \text{V} \Rightarrow \underline{U_2 = 10,9 \, \text{V}}.$$

Ces résultats sont équivalents aux précédents.

6. Charge inductive (ou : « tout s'explique » !)

A la lecture du tableau de mesures, on constate que pour $I_2 = 5 \, \text{A}$, la tension $U_2 = 9,6 \, \text{V}$ est supérieure à la tension obtenue avec la charge résistive ($U_2 = 9,15 \, \text{V}$).

Or, tous les ouvrages indiquent le contraire. Pourquoi ?

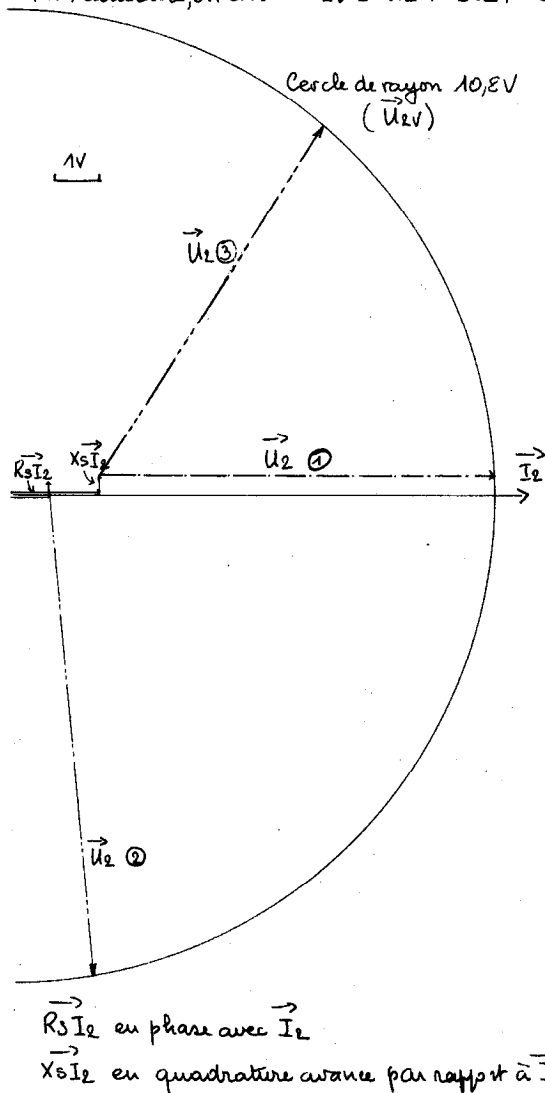
$I_2 (\text{A})$	0,82	2,8	3,5	5
$U_2 (\text{V})$	10,8	10,3	10,2	9,6
$P_2 (\text{W})$	3,4	14	16	26.

$$U_1 = 20 \, \text{V} \\ U_{20} = 10,8 \, \text{V}$$

La contradiction existe, car la réactance du transformateur « fabrication locale » est trop faible, par rapport à sa résistance.

Diagramme de Kapp :

Au secondaire, on écrit $\vec{U}_{2V} = \vec{U}_2 + \vec{R_s I_2} + \vec{X_s I_2}$



avec, pour une charge résistive,

$$I_2 = 4,9A$$

$$U_{2V} = 10,8V (U_1 = 20V)$$

$$R_s I_2 = 2V$$

$$X_s I_2 = 0,44V$$

Graphiquement

$$U_2 = 8,8V \text{ ①}$$

(au lieu de 9,15V)

et, pour une charge capacitive

$$I_2 = 2,05A$$

$$R_s I_2 = 0,84V$$

$$X_s I_2 = 0,18V$$

$$\cos \varphi_2 = 0,03$$

$$\varphi_2 \approx 85^\circ$$

Graphiquement

$$U_2 = 11V \text{ ②}$$

(au lieu de 10,9V)

pour une charge

inductive

(paragraphe 6)

$$I_2 = 5A$$

$$R_s I_2 \approx 2V$$

$$X_s I_2 \approx 0,44V$$

$$\cos \varphi_2 = 0,54$$

$$\varphi_2 = 57^\circ$$

Graphiquement

$$U_2 = 9,2V \text{ ③}$$

(au lieu de 9,6V)

Les mesures indiquent pour $I_2 = 5 \text{ A}$, $U_2 = 9,6 \text{ V}$.

La construction du diagramme de Kapp 9,2 V.

La relation approchée : $\Delta U_2 = 1,45 \text{ V} \Rightarrow U_2 = 9,35 \text{ V}$.

Ces valeurs sont bien toutes supérieures à celles obtenues pour la résistance dans les mêmes conditions (mesures ou calculs).

CONCLUSION.

Je souhaite que cette étude aide mes collègues qui auront à enseigner en terminale F_1 en 1983-1984, et qui n'ont que peu de moyens à leur disposition.

Aussi serait-il souhaitable que les établissements ayant des sections F_1 reçoivent une aide, sous forme d'attribution gratuite par exemple, de générateurs 12-24 V (10 A) continu, alternatif, de rhéostats, d'ampèremètres et de voltmètres.

J'aimerais aussi connaître vos critiques !

Je remercie vivement M. WOBEDO, notre préparateur, sans qui la réalisation pratique de ces expériences n'aurait pas été possible. Merci aussi à M. MALLÉUS, I.P.R. de sciences physiques, pour ses encouragements et l'aide qu'il m'a apportée. Je n'oublie pas, non plus, mes collègues qui m'ont toujours soutenu.

BIBLIOGRAPHIE

BEAULIEU, FORÉ, HERPIN. — *Essais de machines électriques en salle de physique*. Article du B.U.P. n° 647.

Les nombreux (peut-être pas assez) ouvrages des sections F_1 et F_3 .
