

QUELLES DIFFICULTÉS DANS LES TRACÉS DE CARACTÉRISTIQUES ? ÉTUDE ET ANALYSE DE CAS EN PHYSIQUE APPLIQUÉE

Bernard CALMETTES
IUFM de Toulouse
et
LEMME / UPS
31 062 TOULOUSE Cédex

Richard LEFEVRE
Laboratoire d'Étude des Méthodes Modernes d'Enseignement
Bâtiment 3R2
Université Paul Sabatier
31 062 TOULOUSE Cédex

-----O-----

Résumé

L'observation de séquences de classes en physique appliquée fait apparaître des difficultés chez les élèves et les enseignants à l'occasion du tracé de caractéristiques d'un moteur électrique. L'analyse des méthodologies employées et des graphiques réalisés nous conduit à réfléchir sur l'origine de ces difficultés. Les confusions paraissent relever d'un positionnement mal explicité sur les registres du modèle et du référent empirique.

Mots clés : tracé de caractéristiques, représentation graphique, modélisation.

Abstract

Observing «applied physics» teaching sequences highlights students' difficulties in certain tasks such as drawing experimental graphs of electrical devices. An analysis of the methodologies used by students and the graphs they produced lead us to the origin of these difficulties. The confusion seems to stem from an unclear positioning between the model register and the empirical level register.

Key words : graph drawing, graphical representation, modelling.

Resumen

La observación de secuencias de clases en física aplicada hace emerger las dificultades encontradas por los alumnos y profesores en relación con la traza de las características de un motor eléctrico. El análisis de la metodología empleada y de los gráficos realizados conduce a reflexionar sobre el origen de estas dificultades. Las confusiones parecen provenir de un posicionamiento no muy explícito sobre los dos registros del modelo y del referente empírico.

Palabras claves : trazado de las características, representación gráfica, modelización.

-----O-----

Lors d'une précédente étude¹ faite d'après des réponses à un questionnaire papier-crayon portant, entre autres sujets, sur les caractéristiques d'un résistor, nous avons interprété des erreurs dans les réponses des élèves comme résultats d'une confusion entre :

- les grandeurs qui relevaient directement et uniquement des mesures expérimentales, du référent empirique,
- et les grandeurs qui avaient un rapport avec un modèle du composant électrique.

1 - PROBLÉMATIQUE.

Nous avons voulu approfondir et compléter ces premiers résultats dans un cas précis. Pour cela, nous avons réalisé des observations de séquences de Travaux Pratiques (TP) de Physique Appliquée en classe de Terminale Sciences et Technologies Industrielles (STI), section Génie Électrotechnique. L'objet étudié au cours de ces TP est le moteur asynchrone (MAS). Il s'agit plus précisément de tracer des caractéristiques expérimentales de ce type de moteur.

Le tracé de ces caractéristiques expérimentales est une étape dans la construction du modèle de la machine.

Nous nous proposons de préciser de façon plus détaillée ce point, dans une perspective fonctionnelle prenant appui sur le schéma de la modélisation (J.-L. Martinand, 1992) et dans une approche temporelle liée à l'ordre de réalisation des activités.

Considérons par exemple la suite chronologique générale des actions menées par les élèves dans la partie de la séquence portant sur le tracé de la caractéristique du moment du couple T en fonction de la fréquence de rotation n d'un moteur asynchrone :

- 1 - Relevé des mesures qui correspondent aux points de fonctionnement (T, n) et report de ceux-ci dans un **graphique de points** expérimentaux noté **G1**.
- 2 - Tracé de la **caractéristique expérimentale**, notée **G2**, à partir de ces points.

Ajoutons les actions relatives à la modélisation de la machine :

- 3 - Construction du modèle² pour le MAS par sélection de la partie utile de la caractéristique, par linéarisation de celle-ci et par association avec une ou plusieurs équations. La **caractéristique idéalisée** est notée **G3**.
- 4 - Utilisation du modèle, par exemple pour résoudre des problèmes d'associations machine - charge.

En reprenant le schéma proposé par J.-L. Martinand (1992) relativement à la modélisation, nous pouvons situer les actions 1 et 2 dans le champ empirique ; l'action 3 permet l'accès au registre du modèle : c'est la modélisation. L'action 4 est un retour au référent empirique, via une éventuelle simulation.

¹ Cette recherche n'ayant pas donné lieu à une publication est incluse dans un mémoire de DEA : Calmettes, B. (1992). Acquis en électrocinétique à courant continu : comparaison 1ère F3 / 1ère F3 d'adaptation F3. Mémoire de DEA sous la direction de Bouloires, B. Toulouse : UPS/LEMME. pp. 31/32.

² Il s'agit du modèle adopté en classe de Terminale.

Le modèle ainsi réalisé possède les qualités de prévision et d'explication qui lui sont habituellement reconnues en sciences physiques (C. Larcher, 1994, pp. 9/24).

- Il permet des prévisions. Par exemple, on peut calculer le rendement de la machine ou déterminer le point de fonctionnement en fonction d'un cahier des charges.
- Il est possible d'expliquer certains des comportements de la machine : variation faible de la vitesse quand le couple résistant augmente.

Notons également que cette courbe devient, en classe de Terminale, représentative des comportements d'une famille de moteurs.

Les graphiques $G1$ et $G2$ sont alors relatifs au référent empirique, le graphique $G3$ se trouve dans le registre du modèle.

Précisons maintenant le déroulement des activités amenant à la modélisation. Il convient, au sein du référent empirique, de procéder :

- 1 - à la reconnaissance du but fixé : tracer un graphique représentatif pour un engin donné, ici le MAS, des points de fonctionnement (moment du couple, fréquence de rotation) notés (T, n) .
- 2 - à la construction d'un dispositif expérimental.
- 3 - à la réalisation des mesurages, ce qui implique de :
 - * Choisir les variables et leur intervalle de variation.
 - * Faire varier les grandeurs choisies et mesurer.
 - * Reporter les mesures dans un tableau.
 - * En déduire les valeurs des grandeurs utiles : T et n .
- 4 - au tracé du graphique $G1$: reporter, après choix des échelles, les valeurs des grandeurs utiles notées dans le tableau de mesures afin de repérer les points de fonctionnement expérimentaux.
- 5 - au tracé de la caractéristique $G2$: abstraire des quelques points de fonctionnement déterminés par mesurages, un ensemble de points de fonctionnement représentés par un trait continu.

La place des types de graphiques et la progression temporelle sont représentées dans le schéma ci-dessous (fig. 1).

Fig. 1 : Tracés de graphiques et modélisation du MAS en classe de Terminale STI génie électrotechnique.

Il convient d'insister sur le fait que si un travail sur les deux registres est évidemment utile et indispensable à terme, en aucun moment durant la phase de réalisation des mesures et des tracés des graphiques $G1$ et $G2$, le modèle de la machine, et sa caractéristique idéalisée ne doivent intervenir et interférer avec les processus et les résultats expérimentaux.

Nous formulons l'hypothèse que des difficultés, des confusions, existent, chez les élèves et les enseignants, relativement aux tracés des caractéristiques expérimentales, dues à un positionnement pas ou mal explicité sur le registre du référent empirique ou sur celui du modèle.

Nous avons donc particulièrement porté nos observations sur les différentes interventions orales et sur les traces écrites produites par les élèves et l'enseignant (tableaux, graphes, caractéristiques). Les supports suivants ont été utilisés pour le recueil des données :

- enregistrement sonore des interventions magistrales de l'enseignant et des remarques faites par les élèves en petits groupes ;
- photographies des matériels et des traces écrites par l'enseignant au tableau ;
- relevé des tracés de graphiques de type $G2$ effectués par les élèves ;
- recueil de comptes-rendus d'élèves ;
- prise de notes en temps réel, par le chercheur, de toute information jugée pertinente vis à vis de la problématique de la recherche.

2 - L'OBJET D'ÉTUDE EN CLASSE : LE MOTEUR ASYNCHRONE, SES CARACTÉRISTIQUES.

Le moteur asynchrone (MAS) est le plus utilisé de tous les types de moteurs électriques existants. Il est robuste, facile à construire et donc peu coûteux en fabrication et en maintenance. Le MAS est notamment utilisé lorsque la variation de vitesse de la charge est notifiée dans le cahier des charges fonctionnel de l'ensemble technique. La machine est alors couplée à un dispositif de commande et d'alimentation dédié de type onduleur ou pilotage vectoriel avec ou sans capteurs de données.

La caractéristique électromécanique, dite aussi "de couple", d'un MAS alimenté sous tension nominale peut-être décrite de façon typique, en se référant aux manuels scolaires, par le tracé suivant (Fig. 2) : $T_{em} = f(n)$. Dans le cadre de l'enseignement, les couples T sont exprimés en Nm et les fréquences de rotation n en tr/min.

T_{em} ou T : moment du couple électromagnétique

n : fréquence de rotation

T_M : valeur maximale du moment du couple

n_s : fréquence de rotation au synchronisme

n_N : fréquence de rotation nominale

T_N : moment du couple nominal

Fig. 2 :
Caractéristique de couple d'un MAS

La valeur de la fréquence au synchronisme dépend de caractéristiques de la machine et de la valeur de la fréquence des tensions d'alimentation. Pour une fréquence de 50 Hz, le moteur utilisé par les élèves, lors de la séquence étudiée, avait une fréquence de rotation au synchronisme égale à 1500 tr/min.

La partie de la caractéristique correspondant à des utilisations du moteur doit obéir à certaines contraintes :

- pertes énergétiques faibles : en première approximation, on peut considérer que cela correspond à un choix de fréquence de rotation voisine de n_s ;
- stabilité dynamique : une augmentation accidentelle du couple résistant au niveau de la charge doit être accompagnée automatiquement, de par la nature physique de la machine, de la diminution de la fréquence de rotation de l'ensemble (fonctionnement stable) ; ceci correspond à la partie AB de la courbe : c'est le graphique G3, caractéristique limitée et idéalisée du MAS ;
- existence d'une zone sécuritaire : le fabricant précise que le couple utilisé doit être inférieur à $0,6 T_M$ par exemple.

Les couples utiles sont alors généralement inférieurs ou égaux au couple nominal. Ils leur correspondent une partie utile pour la caractéristique pratiquement linéaire.

On définit le glissement comme l'écart relatif de la fréquence de rotation par rapport à la fréquence de rotation au synchronisme.

On peut alors tracer la courbe donnant le moment du couple électromagnétique T_{em} en fonction du glissement g : $T_{em} = f(g)$. (Fig. 3).

La courbe $T_{em}(g)$ dans le domaine d'utilisation (glissement faible) correspond à une relation de proportionnalité, c'est une droite.

Fig. 3 :
Caractéristique $T_{em} = f(g)$ d'un MAS

L'étude du moteur asynchrone alimenté sous différentes tensions pour une fréquence fixée présente un intérêt pour la compréhension du dispositif de démarrage étoile-triangle (noté Y-D). Sous une alimentation en étoile notée Y, la tension aux bornes d'un enroulement de la machine est la tension simple entre phase et neutre ; sous une alimentation en triangle notée D, c'est la tension composée entre phases qui se trouve aux bornes de chaque enroulement.

Les caractéristiques électromécaniques correspondant à ces montages sont données sur la figure 4.

Elles mettent en évidence la variation du couple avec la tension d'alimentation.

On montre que $T_D = 3.T_Y$ pour des tensions triangle et étoile dans un rapport de $\sqrt{3}$.

D'une façon plus générale, en notant V la valeur efficace de la tension aux bornes d'un enroulement, on est amené à la conclusion que la valeur du moment du couple électromagnétique T_{em} est proportionnelle au carré de la valeur efficace de la tension d'alimentation V^2 , à fréquence de rotation donnée.

Fig. 4 :
Caractéristiques de couple du MAS dans les cas d'une alimentation étoile (Y) et d'une alimentation triangle (D).

Le MAS peut être associé à un convertisseur statique du type onduleur qui l'alimente sous une tension alternative de valeur efficace U , de fréquence f réglable et telle que U/f soit une constante. La fréquence de rotation au synchronisme étant directement proportionnelle à la fréquence de la tension d'alimentation, il devient alors possible d'obtenir, dans un très large domaine, le réglage de la fréquence de rotation.

Les nouvelles caractéristiques sont données sur la figure 5.

$U_1 > U_2 > U_3$.

La valeur maximale du moment du couple est constante.

Les parties utiles des caractéristiques sont linéaires et parallèles ; elles se déduisent l'une de l'autre par translation.

La valeur réglable des fréquences de rotation au synchronisme et la constance de la pente de la caractéristique dans sa partie utile mettent en évidence l'avantage de ce procédé pour l'obtention de la variation de vitesse.

Fig. 5 :
Caractéristiques de couple du MAS alimenté par un onduleur en U/f constant pour différentes valeurs de U et de f .

En perspective avec les observations de classe réalisées, on retiendra que les élèves vont être confrontés, dans les études proposées par l'enseignant, à différentes **caractéristiques** présentant toutes le même **caractère de linéarité dans les domaines recommandés pour l'utilisation du MAS**.

Ce sont :

- la caractéristique de couple présentée sous la forme $T_{em}(n)$ ou $T_{em}(g)$;
- les courbes représentatives du moment du couple en fonction du carré de la valeur efficace de la tension d'alimentation à fréquence constante $T_{em}(V^2)$;

- les caractéristiques de couple dans le cas de l'alimentation par un onduleur à U/f constant).

De plus, les courbes $T_{em}(g)$ et $T_{em}(V^2)$ passent par les origines des axes.

3 - ORGANISATION DES SÉQUENCES.

Les séquences observées ont été réalisées dans une classe de Terminale Sciences et Technologies Industrielles, série Génie Électrotechnique, d'un Lycée d'Enseignement Général et Technologique de la Région Midi-Pyrénées. Les élèves ont suivi un parcours classique dans un second cycle non professionnalisé : Seconde, Première et Terminale. L'enseignant est agrégé en Physique Appliquée et conseiller pédagogique.

Il s'agit pour eux de tracer les caractéristiques de couple d'un moteur asynchrone alimenté de différentes façons : tensions variables et fréquences fixes, onduleur à rapport U/f constant. Les élèves de la classe sont divisés en 4 petits groupes de 7, ce qui permet à l'enseignant de travailler avec des effectifs réduits.

Deux supports différents sont proposés :

- un banc d'essai en partie automatisé permettant des lectures automatiques de la fréquence de rotation et du couple mécanique ;
- un banc d'essai manuel avec dynamo tachymétrique pour la détermination de la fréquence de rotation et dynamo balance pour la mesure du moment du couple.

Par permutation sur les deux séquences, chaque élève effectue au total 6 heures de TP.

Les élèves arrivent avec peu de connaissances concernant le MAS lui-même. Seul le phénomène d'asynchronisme a été observé et rapidement explicité dans une séquence de cours sur les champs tournants et leurs applications. Le glissement a ainsi été défini qualitativement et quantitativement.

L'enseignant présente les manipulations, en utilisant un dispositif d'enregistrement relié à un ordinateur (ExAO). Il procède à un premier relevé de points de fonctionnement relatifs à la caractéristique de couple (sous 220 V, 50 Hz) du MAS puis à de nouveaux enregistrements avec des tensions différentes (127 V, 180 V, 254 V) mais toujours sous la même fréquence (50 Hz). La discussion avec les élèves amène un certain nombre de conclusions se rapportant à la fréquence de rotation au synchronisme, au couple maximal, au point de fonctionnement et aux zones de fonctionnements stable et instable. Il distribue alors des fiches de travail. Celles-ci sont conçues de manière que les élèves puissent travailler par petits groupes autonomes. L'enseignant intervient cependant systématiquement pour vérifier les montages et les résultats expérimentaux obtenus.

Nous avons suivi deux séances de travaux pratiques, avec les 4 groupes, soit 12 heures d'observation. Les séances se sont déroulées à deux semaines d'intervalle, dans les mêmes conditions matérielles et de durée. Entre ces deux dates, aucun apport théorique ou pratique relatif aux objectifs de l'apprentissage n'a été apporté par l'enseignant.

Le changement de groupes d'élèves et l'ordre des manipulations n'ont pas semblé avoir d'importance vis à vis des difficultés repérées et analysées. Les tracés dont nous discuterons dans les parties suivantes ont été observés dans toutes les séances, avec les deux groupes.

4 - QUELQUES ÉLÉMENTS SIGNIFICATIFS.

Nous nous limiterons, dans le cadre de cet article, aux données relatives aux tracés des caractéristiques précédemment décrites (cf. § 2) :

$T_{em} = f(n)$ dans le cas général et dans le cas d'alimentations sous différentes tensions à fréquence fixe et avec un onduleur à U/f constant ; $T_{em} = f(g)$; $T_{em} = f(V^2)$.

4 - 1 - Qu'est-ce qu'une caractéristique ?

Deux définitions sont données par l'enseignant.

La première est apportée de façon explicite suite au premier enregistrement de points de fonctionnement avec le dispositif informatique : «La caractéristique est **l'ensemble des points** donnant le couple T_{em} en fonction de la fréquence de rotation n ». La "caractéristique" est donc reliée ici aux **valeurs déterminées expérimentalement**.

Tout de suite après, il demande aux élèves de comparer la caractéristique du MAS avec celle du moteur à courant continu étudiée précédemment.

La deuxième définition est alors donnée par l'utilisation possible des tracés modélisés lorsqu'il dessine au tableau uniquement **les parties utiles et idéalisées**, qu'il appelle également "caractéristiques", sans autre précision, pour argumenter les termes de ressemblance entre les deux machines.

On note donc que la définition de la caractéristique peut adopter deux statuts différents pour l'enseignant, l'un directement lié aux valeurs expérimentales, l'autre tenant compte d'aspects utilitaires et déjà modélisé.

4 - 2 - La préparation des tableaux de valeurs.

La première caractéristique expérimentale que les élèves ont à tracer est $T = f(n)$ où T est le couple et n la fréquence de rotation. Ces deux grandeurs ne sont pas directement mesurables quand les élèves utilisent le banc d'essai manuel.

Le schéma du montage proposé par l'enseignant est reproduit figure 6.

On distingue 3 parties (de gauche à droite) :

- l'alimentation et le moteur asynchrone triphasé ;
- le dispositif permettant d'obtenir le couple résistant et sa mesure (dynamo balance) ;
- le dispositif de mesure de la fréquence de rotation (dynamo tachymétrique associée à un voltmètre).

Dans l'ensemble matériel correspondant, le moteur, la dynamo balance et la dynamo tachymétrique ont le même axe de rotation.

La valeur du moment du couple est obtenue par calcul et par mesure grâce à la relation $T = m.g.d$ où m , g et d représentent respectivement la masse du contrepoids, l'accélération de la pesanteur et la distance entre la position du contrepoids porté par le bras gradué de la dynamo balance et l'axe de l'ensemble motorisé (valeur lue directement en cm).

La valeur de la fréquence de rotation n est obtenue par calcul à partir de la valeur de la tension notée v apparaissant aux bornes de la dynamo tachymétrique³. En effet, sur celle-ci est notée l'indication "30 V correspondent à 1500 tr/min".

³ pour éviter des confusions avec les tensions V (simples) ou U (composées) de l'alimentation du moteur.

Fig. 6 : Montage expérimental pour le tracé de la caractéristique de couple. Banc manuel.

Les élèves préparent le tableau suivant (fig. 7) :

v						
m						
d						

Fig. 7 : Tableau proposé par les élèves.

Les grandeurs apparaissant dans ce tableau sont celles qui sont directement accessibles, y compris la masse alors qu'elle est constante. Les unités ne sont précisées qu'à la suite de la première série de mesures. Elles correspondent aux indications portées sur les appareils : distance d en cm, masse m en kg et tension v en V.

Lors du contrôle des résultats, l'enseignant demande aux élèves de refaire le tableau en ne faisant intervenir que les grandeurs pertinentes à l'étude : le moment du couple et la fréquence de rotation. L'obtention de ces grandeurs semble perturber les élèves. Le professeur leur donne alors des éléments de solutions, en rappelant les origines physiques des grandeurs (fonctionnement d'une dynamo tachymétrique, définition du moment d'un couple mécanique) et en leur indiquant une méthodologie rapide, par calcul mental, permettant d'obtenir les résultats attendus.

4 - 3 - Les graphiques tracés par les élèves.

L'activité de mesurage terminée, les élèves sont confrontés aux tracés des caractéristiques demandées dans les fiches de travail.

Nous présentons ici les premiers tracés ; ceux-ci seront finalement corrigés par le professeur de façon directive sans véritable questionnement ni de la part des élèves, ni de la part de l'enseignant.

4 - 3 - 1 - Un tracé contenu dans un intervalle.

Certains élèves du groupe étudiant le moteur en association avec l'onduleur en U/f constant font remarquer que :

- «La valeur du "couple" le plus petit, en dehors de la valeur nulle, n'est pas si petit que cela. Il est obtenu pour un emplacement du contrepoids à 14 cm de l'axe alors que la longueur maximale possible est de 44 cm...»

L'appareil ne permettant pas de rapprocher davantage le contrepoids de l'axe de rotation, les élèves ajoutent :

- «On va manquer de points pour les faibles valeurs de T !»

Fig. 8 : Tracés contenus dans un intervalle.
Alimentation d'un MAS par un onduleur en $U/f = \text{constante}$

Le tracé des courbes (fig. 8) va être souvent, dès lors, limité aux domaines pour lesquels il y a eu effectivement possibilité de mesure d'une valeur du couple (mais sans prise en considération de l'équilibre

initial pour lequel $m = 0$ kg, donc pour $T = 0$ Nm). Les courbes sont donc tracées seulement entre $T = 0,7$ Nm et $T = 2,2$ Nm.

Remarque.

Les mêmes tracés partiels apparaissent un peu plus tard lors de l'étude de $T = f(g)$ et de $T = f(V^2)$. Les élèves, au vu de leurs valeurs, tracent un segment de droite limité par les extrêmes des valeurs des grandeurs autres que celle pour laquelle le moment du couple est nul...

4 - 3 - 2 - Un tracé par succession de segments.

On relève des courbes tracées par succession de segments de droite (fig. 9). Le tracé automatique de la caractéristique par l'intermédiaire du logiciel procède de la même façon.

Fig. 9 : Tracé par succession de plusieurs segments.
Alimentation du MAS sous différentes tensions, à fréquence fixe (50 Hz).

4 - 3 - 3 - Des tracés sous influence...

* A - De l'enseignant...

* L'enseignant indique aux élèves : «Il vous reste à tracer $T(g)$. Vous devez avoir une droite car T est proportionnel à g . Il vous reste aussi à tracer $T(V^2)$. Vous devez là aussi avoir une droite qui passe par l'origine car T est proportionnel à V^2 . C'est du type $y = a.x$; $T = a.V^2$.»

Repérant quelques hésitations chez les élèves, il reprend : «On a proportionnalité et si ça ne passe pas par l'origine, on n'a pas proportionnalité. Comme on a $T = a.V^2$, cela signifie que l'on a une droite et que cette droite passe par l'origine. C'est indispensable.»

* Avant que les élèves aient fini le tracé de $T(n)$, l'enseignant demande : «Est-ce que vous avez fini de tracer la droite ?»

Un élève répond alors : «Je ne comprends pas, pour avoir une droite, je devrais trouver 1490 tours par minute et j'ai 1494 !»... La valeur théorique 1490 est alors placée dans le tableau de mesures en lieu et place de la valeur expérimentale 1494.

* Lors de l'expérimentation avec le banc automatisé et l'ensemble MAS - onduleur en $U/f = Cte$, l'enseignant effectue un relevé de points de mesure grâce au montage permettant le tracé automatique informatisé. Le professeur observe sur l'écran les tracés de ces points et remarque : «Avant d'imprimer, je vérifie que les points semblent bien alignés... Tiens, là, il manque un point ; je le placerai tout à l'heure à la main avant de faire la photocopie...»

* B - D'une valeur théorique connue...

Au cours des séquences que nous avons observées, les valeurs expérimentales de la grandeur fréquence de rotation sont systématiquement décalées à cause d'un problème de réglage initial de la dynamo tachymétrique. La droite $T = f(n)$ qui devrait normalement passer par le point théorique ($T = 0 \text{ Nm}$, $n = n_s$) subit une légère translation horizontale, d'environ 10 tr.min^{-1} . De fait, elle coupe l'axe des fréquences de rotation en un point qui semble "impossible", pour lequel la fréquence de rotation est supérieure à la fréquence de rotation au synchronisme.

Les élèves proposent alors les tracés de caractéristiques suivants :

* B1 - Un tracé moyen.

Certains élèves tracent un segment "moyen" (fig. 10) passant par le couple de valeurs ($T = 0 \text{ Nm}$, $n = n_s$). Ils assimilent ainsi cette valeur théorique à une valeur expérimentale.

Fig. 10 : Tracé moyen.
Caractéristique de couple d'un MAS.

* B2 - Un tracé par succession de deux segments.

D'autres élèves tracent une suite de deux segments de droite (fig. 11) : un passe par les points de fonctionnement obtenus, l'autre relie le plus bas de ces points au point correspondant au point théorique : ($T = 0 \text{ Nm}$, $n = n_s$).

Fig. 11 : Tracé par successions de deux segments.
Caractéristique de couple d'un MAS.

Dans ces deux cas (B1 et B2), le point de fonctionnement correspondant à $T = 0 \text{ Nm}$, bien qu'ayant donné lieu à une mesure, n'est pas relevé sur le graphique.

* B3 - Un tracé basé uniquement sur les mesures.

Un seul élève trace un segment de droite passant uniquement par les points expérimentaux (fig. 12). Il note sur sa feuille l'écart entre le point obtenu par l'expérience et le point théorique ($T = 0$, $n = n_S$) en indiquant : "imprécision de la dynamo tachymétrique".

Fig. 12 : Tracé basé sur les mesures.
Caractéristique de couple d'un MAS.

4 - 4 - Variabilité des types de tracés effectués.

La typologie des différents tracés effectués n'est pas liée à des catégories d'élèves caractérisables. Comme dans le cadre d'autres objets d'étude en didactique (cf. les recherches sur les conceptions⁴), nous avons pu observer une certaine variabilité dans les tracés effectués pour chaque élève.

Cette variabilité s'inscrit dans le temps (passage d'un type de tracé à un autre pour une même situation) et est sensible aux circonstances de productions.

Il semblerait, d'une façon générale, que cette variabilité soit à mettre en relation avec le contexte dans lequel le tracé de la caractéristique est réalisée, par exemple avec :

- Le contexte matériel : le nombre de points de fonctionnement obtenus expérimentalement, la présentation générale de ces points sur le graphique (le choix des échelles peut amener à des écarts, plus ou moins importants entre les points) semblent susceptibles d'influencer les tracés.

- Le contexte d'organisation des activités dans la classe : les travaux de groupes, les échanges entre élèves mais surtout la pression des directives de l'enseignant amènent les élèves à modifier leurs premiers tracés. Par exemple :

L'enseignant, repérant des difficultés chez les élèves (tracés partiels) rappelle systématiquement la première mesure faite :

- «On a vu que pour $m = 0$ kg, on avait la valeur de la fréquence de rotation au synchronisme donc n_S ».

Et il ajoute :

«Prolongez vos courbes jusqu'à cette valeur.»

De même, un peu plus tard, il annonce : «Il faut que les caractéristiques que vous tracez soient des droites passant par la valeur de la fréquence de rotation au synchronisme puisque quand la machine tourne à vide, la fréquence est égale à la fréquence au synchronisme n_S »

- Le contexte temporel : avec le temps, une réflexion peut conduire à une remise en cause d'un type de tracé (repérage d'un point douteux pouvant conduire à un nouveau mesurage).

⁴ S. Johsua et J.-J. Dupin (1993, p. 127) rappellent que, «pour des situations jugées différentes du point de vue de l'élève [...], des conceptions différentes seront mobilisées, qui peuvent avoir chacune leur degré partiel de pertinence.» B. Calmettes (1992) a également montré ce phénomène d'instabilité dans une étude sur les conceptions en électricité.

- Le contexte du savoir : certains élèves (peu parmi ceux observés) expriment oralement auprès de leurs camarades l'idée d'une formalisation et d'une association des courbes tracées avec une équation mathématique simple. Par voie de conséquence, les tracés de droite sont plutôt recherchés.

5 - ANALYSE DES PRODUCTIONS DES ÉLÈVES.

La lecture simultanée des parties § 1 et § 4 permet de repérer le lieu des difficultés des élèves et de l'enseignant dans le cas des tracés des caractéristiques du MAS précédemment décrits.

- La préparation des tableaux de valeurs. (cf. § 4.2)

L'absence de mise en place des grandeurs pertinentes dans le tableau pour le relevé graphique des points de fonctionnement relève d'un manque de mise en perspective des mesures faites avec leur objectif final. Il n'y a pas passage des grandeurs mesurables aux grandeurs utiles au tracé de la "caractéristique expérimentale".

- Les graphiques tracés par les élèves, les apports de l'enseignant. (cf. § 4.1 et 4.3)

- Le tracé contenu dans un intervalle (fig. 8) semble représenter une limitation de l'abstraction aux valeurs extrêmes des points de fonctionnement expérimentaux. Le probable n'est pas présent, il n'y a pas extrapolation du tracé.

- Le tracé par succession de segments (fig. 9) est à relier à une difficulté au niveau de la production de la caractéristique expérimentale.

On peut à ce propos faire des **hypothèses**.

Ce type de tracé pose plusieurs questions :

- Peut-il être considéré comme une abstraction par parties distinctes ?

L'élève paraît alors concevoir l'existence possible de points de fonctionnement dans un espace restreint allant linéairement, seulement d'un point de fonctionnement pour lequel il a effectué des mesures à un autre. Il matérialiserait alors ce possible par un segment. Il ne procéderait pas au tracé complet d'une droite qui remettrait partiellement en cause certaines des mesures faites.

- Est-ce simplement la liaison de points successifs permettant d'avoir une vue globale approximative, sans intention de lissage ?

Ces différentes possibilités demanderaient à être approfondies. Nous n'avons pas encore de résultats expérimentaux précis à ce propos.

- Le tracé moyen (fig. 10), le tracé par deux segments non alignés (fig. 11) sont composés par des rencontres inopportunes, prématurées entre des valeurs expérimentales et des valeurs théoriques, entre registre empirique et registre du modèle.

On retrouve ce même phénomène dans le cas de l'observation de l'enseignant (cf. § 4.1) quand il passe directement (en quelques secondes) de la caractéristique "complète et expérimentale" (production G2) à la partie utile de la caractéristique modélisée (production G3) avant que les caractéristiques expérimentales aient été tracées par les élèves et donc avant que la modélisation elle-même ait effectivement été réalisée.

Il y a une **contagion de référence** (A. Lerouge⁵, 1993) conduisant à une **contamination de sens** entre les deux registres, les élèves et/ou l'enseignant donnant apparemment à une valeur théorique appartenant au modèle le statut d'une valeur expérimentale. L'orientation théorique trop marquée amène à ne pas traiter de façon rigoureuse toutes les grandeurs expérimentales.

La "contagion" qui désigne ici le transport dans le référent empirique de données perturbatrices provenant du référent du modèle conduit :

- d'une part, à une remise en cause du statut des deux référents et à travers cela du statut du réel ;
- d'autre part à un dysfonctionnement didactique, car on élimine ainsi le processus de construction du modèle, le graphique "expérimental" tracé par les élèves possédant déjà de façon arbitraire des données issues du modèle.

- Le tracé ne prenant en compte que les valeurs expérimentales (fig. 12) peut être considéré dans ce cas comme celui correspondant à la production attendue (G2).

6 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.

Les séquences observées nous ont permis de relever des difficultés chez les élèves et leur enseignant liées aux tracés des caractéristiques des moteurs asynchrones et aux processus de modélisation de ces machines.

L'analyse prend pour support la description des activités liés à ces processus en mettant en évidence l'articulation entre les différents graphiques : tracé des points de mesures expérimentaux, tracé de la caractéristique expérimentale, tracé de la caractéristique idéalisée, modélisée.

Il est alors possible de repérer le lieu des difficultés rencontrées et des erreurs faites par les élèves et l'enseignant :

- au sein des activités liées à l'expérience : préparation naïve des tableaux de données, courbes limitées ou tracées par simple succession de segments.
- dans l'articulation entre les deux référents : tracés expérimentaux forcés par des valeurs théoriques. Ce dernier point pourrait conduire à de nouvelles réflexions et propositions sur la place des activités expérimentales et de leurs productions écrites dans la construction des savoirs.

La lecture attentive des modes opératoires relatifs aux montages expérimentaux, aux mesurages et aux déterminations des tracés des caractéristiques dans le référent empirique est à l'origine de l'idée d'une possible reproductibilité de ces opérations dans des domaines proches, en électronique ou en électricité. Il serait alors pertinent pour des chercheurs d'observer si, dans ces domaines également, des difficultés du même ordre que celles décrites précédemment, existent, chez les élèves comme chez les enseignants.

⁵ Les travaux de A. Lerouge en didactique des mathématiques sont relatifs à des difficultés repérées chez des élèves dues à des interactions entre signifié, signifiant et référence. Il montre particulièrement «en quoi la lecture de l'intersection de deux droites [...] se trouve perturbée par contagion de signifiant (les traits dessinés) et par contagion de référence (les mouvements représentés).» Bien que nous traitions une question de forme différente, il nous a semblé que les fonds des deux recherches (celle de Lerouge et la nôtre) était semblables. C'est pourquoi nous avons repris son idée de "contagion de référence".

ÉLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

Calmettes, B. (1992) Acquis en électrocinétique à courant continu : comparaison 1ère F3/1ère F3 d'adaptation F3 (section électrotechnique) in Tréma : Actes du deuxième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques. Sète/ Montpellier IUFM. pp. 37/48.

Équipe INRP-Lirest (1992). Enseignement et apprentissage de la modélisation. Paris : INRP.

Johsua, S. et Dupin, J.-J. (1993). Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques. Paris : PUF.

Larcher, C. (1994). Étude comparative de démarches de modélisation. Quelles sont les caractéristiques des démarches de modélisation in Équipe INRP/Lirest. Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences. Paris : INRP-Lirest. pp. 115/125

Lerouge, A. (1993). Contagion de signifiant et contagion de référence sur la conceptualisation mathématique de l'intersection de 2 droites. Les Sciences de l'Éducation. 1-3 / 1993. pp. 119/135.

Martinand, J.-L. (1992). Présentation, in Équipe INRP/Lirest. Enseignement et apprentissage de la modélisation. Paris : INRP.

Martinand, J.-L. (1994). Quels enseignements peut-on tirer des travaux dans la perspective du développement de curriculum ? Notes pour la recherche in Équipe INRP/Lirest. Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences. Paris : INRP-Lirest. pp. 115/125.

ANNEXE : FICHES DE TRAVAIL POUR LES ÉLÈVES.

Groupe 1 : caractéristique de couple d'un moteur asynchrone, MAS alimenté par des tensions de fréquences fixes (50 Hz).

La partie I est commune aux deux groupes.

I - Étude de la caractéristique complète $T_u = f(n)$.

Déterminer sur la caractéristique donnée par le logiciel pour $V = 220\text{ V}$ les points correspondants au démarrage, au fonctionnement à vide, au couple maximal, à la zone de fonctionnement stable, à la zone de fonctionnement instable.

Porter sur chaque courbe le point correspondant au couple nominal ; quelle est l'allure de la partie de la caractéristique comprise entre le fonctionnement nominal et le fonctionnement à vide ?

Pour une même fréquence de rotation, comparer approximativement les valeurs des couples obtenus avec une tension $V = 220\text{ V}$ et $V = 127\text{ V}$. Même question pour 254 V et 127 V ; pour 180 V et 127 V . Conclure.

II - MAS alimenté par des tensions de fréquence fixe (50 Hz).

1 - Préparation.

- Déterminer le couplage des enroulements sachant que l'on dispose d'un réseau 220/380 V.
- Faire un schéma du montage sachant que l'on utilise un alternostat triphasé pour alimenter le MAS, un frein magnétique à poudre [...], une dynamo tachymétrique [...], un module de mesures électriques [...], un module de mesures mécaniques [...]
- Repérer les appareils de mesure : T , n , I , V .
- Câbler le circuit, brancher les appareils de mesure et faire vérifier.

2 - Études de $T_u = f(n)$ et $T_u = f(g)$ pour une tension d'alimentation à V fixée.

a) Mesures : alimenter le moteur en fixant $V = 220\text{ V}$ et donner au couple résistant les valeurs $T = 0,4\text{ Nm}$ puis $0,8\ 1,2\ 1,6\ 2$ (couple nominal) ; mesurer la fréquence de rotation n . Recommencer les mesures pour des tensions d'alimentation de 254 V , 180 V et 127 V (tableau de mesures).

b) Interprétation : tracer entre 1350 tr/min et 1500 tr/min la caractéristique $T_u = f(n)$ pour chaque tension d'alimentation. Pour $V = 220\text{ V}$, calculer le glissement g correspondant à chaque mesure et tracer $T_u = f(g)$.

3) Étude du couple en fonction de la tension d'alimentation V pour une fréquence de rotation n fixée.

a) Mesures : alimenter le moteur sous 220 V et régler le couple résistant pour obtenir une fréquence de rotation $n = 1460\text{ tr/min}$. Recommencer les mesures pour des tensions d'alimentation de 254 V , 180 V et 127 V (tableau de mesures).

b) Interprétation : Tracer le graphe $T_u = f(V^2)$ pour la fréquence de rotation $n = 1460\text{ tr/min}$. Conclure.

Groupe 2 : caractéristique de couple d'un moteur asynchrone, MAS alimenté par un onduleur à $U/f = Cte$.

[I - Comme ci-dessus].

II - MAS alimenté par un onduleur à $U/f = Cte$.

1 - Préparation.

- a) Déterminer le couplage des enroulements du stator si l'on dispose d'un réseau 220 V.
- b) Faire un schéma du montage sachant que l'on utilise un onduleur triphasé, un frein à courants de Foucault alimenté en continu par une source réglable de 0 à 30 V pouvant débiter 1,5 A (prévoir un ampèremètre de contrôle). Un bras de levier portant une masse $m = 0,5$ kg est fixé sur ce frein pour mesurer le couple résistant. La mesure du couple se fait en déplaçant la masse m le long du bras de levier : on a alors $T_r = m.g.d$, d étant la distance du poids à l'axe. Une dynamo tachymétrique donnant $0,02$ V/tr.min⁻¹ ; prévoir un voltmètre.
- c) Câbler le circuit, brancher les appareils de mesure et faire vérifier.

2 - Mesures.

- a) Déplacer le contrepoids pour que le bras de levier soit horizontal en l'absence de m .
- b) Alimenter le moteur avec l'onduleur délivrant des tensions triphasées de fréquence $f = 50$ Hz. Régler $d = 0,14$ m ; calculer la valeur du couple (on prendra $g = 10$ m.s⁻²) et mesurer la fréquence de rotation n du groupe. Modifier le couple résistant et effectuer de nouvelles mesures en donnant à d les valeurs 0,20 m 0,26 m 0,32 m 0,38 m et 0,44 m.
- c) Recommencer pour des fréquences $f = 40$ Hz puis 30 Hz.

3 - Interprétation.

Calculer la fréquence de synchronisme n_s correspondant à chaque fréquence f du courant.
Tracer les graphes $T_u = f(n)$ pour chaque fréquence f .

4 - Tracé des caractéristiques en utilisant l'ordinateur.

Donner au couple résistant les valeurs 0,4 Nm puis 0,8 ; 1,2 ; 1,6 et 2 Nm pour des fréquences successives de 50, 45, 40, 35 et 30 Hz (chaque point est mémorisé avec la touche F1 ; on trace une nouvelle caractéristique avec la touche F4).