

PRATIQUE DE L'ELECTRONIQUE

Un « bobinage »... sans bobine LE « GYRATEUR »

2^e PARTIE

DETAILS EXPERIMENTAUX

Si vous voulez bien réussir cet essai, il faut prendre quelques précautions.

D'abord, comment choisir la valeur de U, le potentiel du point qui doit donner au circuit oscillant le « choc » qui va le mettre en oscillation ? Il ne faut pas prendre zéro, car le point (H) a tendance, par l'effet du montage, à prendre ce potentiel si on le laisse « en l'air ».

Il ne faut pas prendre, non plus, une valeur trop proche de VS+ (la tension d'alimentation positive des deux amplificateurs opérationnels), car on amènerait A₁ en saturation (en « butée haute ») et probablement A₂ aussi : il ne se passerait donc rien.

Le mieux est de prendre une valeur qui soit, par exemple, la moitié de VS+. Si l'on alimente A₁ et A₂ par des sources de +12 V (pour VS+) et -12 V (pour VS-), ces tensions étant comptées par rapport à la masse, on obtiendra le potentiel +6 V avec un diviseur de tension fait par deux résisteurs de 1 k Ω , comme le montre la figure 17.

Sur cette figure, nous avons symbolisé le montage de la figure 16 par un carré contenant un bobinage, avec cinq connexions :

- les VS+ et VS- qui alimentent A₁ et A₂ ;

- l'entrée (H) ;
- la masse (pied de C et de R) ;
- le point (N), sortie de A₂.

Les deux résisteurs de 1 k Ω nous donnent, en (B), un point dont le potentiel est +6 V.

Branchons un oscilloscope sur la sortie N (nous verrons plus loin pourquoi) et effleurons le point (H) par un fil relié au point (B).

S'il n'y a pas d'erreur dans le montage, on doit apercevoir une oscillation amortie (d'amplitude décroissante). Pourquoi amortie ?

Parce que le « bobinage équivalent » n'est pas parfait. Non, ne jetez pas le numéro

du *Haut-Parleur* en proférant des menaces à l'égard de l'auteur (dont vous pensez qu'il a exigé de vous un effort intellectuel sans précédent pour vous décrire un montage aux performances médiocres, donc sans intérêt).

PETITS DEFAUTS FACILES A CORRIGER

D'où vient l'imperfection ? Des petits déphasages apportés par les amplificateurs opérationnels, et surtout des imperfections des condensateurs C

et C'. Si vous voulez vous en rendre compte, essayez de prendre, pour C et C' des modèles au « styroflex » (qui s'approchent très près du condensateur idéal) et vous allez voir que l'amortissement n'est pas grand.

Plus curieux encore, il se peut que l'amortissement soit... négatif ! Oui : vous voyez, en sortie, une tension alternative sinusoïdale dont l'amplitude, au lieu de diminuer, augmente, jusqu'à ce que A₁ ou A₂ arrive au maximum de ce qu'il peut donner. Ne vous attendez d'ailleurs pas à voir la sinusoïde écrêtée brutalement ; il y aura une sorte de stabilisation automatique de l'amplitude maximale.

Plus normalement, avec C et C' au styroflex, vous allez trouver une décroissance très lente de l'amplitude. Dans un essai fait par l'auteur, avec les valeurs indiquées ci-dessus, il a fallu environ 17 s pour que l'amplitude diminue de moitié.

IL EST FACILE DE CONNAITRE LE FACTEUR Q : IL VAUT 4,53 x N

Or, un calcul assez facile à faire (mais dont l'auteur n'aura pas le sadisme d'imposer les détails aux lecteurs) montre que quand on fait osciller un circuit oscillant amorti, constitué par un bobinage L et

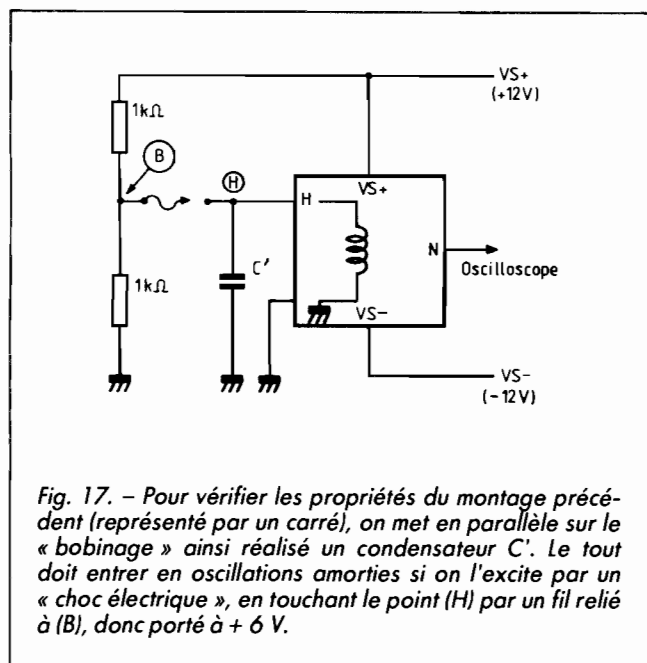


Fig. 17. - Pour vérifier les propriétés du montage précédent (représenté par un carré), on met en parallèle sur le « bobinage » ainsi réalisé un condensateur C'. Le tout doit entrer en oscillations amorties si on l'excite par un « choc électrique », en touchant le point (H) par un fil relié à (B), donc porté à +6 V.

un condensateur supposé parfait, il suffit de compter le nombre N de périodes d'oscillation intervenant avant que l'amplitude ait baissé de moitié et de multiplier ce nombre par 4,53 pour obtenir le coefficient de qualité Q du bobinage.

Autrement dit, si l'amplitude baisse de moitié après 60 périodes d'oscillation, le facteur de qualité Q vaut :

$$60 \times 4,53 = 272.$$

Dans le cas de notre exemple, en 17 s, avec une fréquence de 107 Hz, un temps de 17 s correspond à un nombre de périodes $N = 107 \times 17 = 1\ 819$ périodes.

Le facteur Q de notre « bobinage » (équivalent à 10 H) vaut donc :

$$1\ 819 \times 4,53 = 8\ 244.$$

Vous restez indifférent ? Demandez donc un peu à ceux qui ont réalisé des bobinages de très haute qualité ce qu'ils pensent d'une bobine ayant un coefficient de self-induction de 10 H et un facteur Q de plus de 8 000 à environ 100 Hz ! Ils vous répondront, avec un bel ensemble : « C'est strictement impossible, mais c'est beau quand même de rêver ! »

Une bobine de 10 H à une fréquence de 107 Hz, cela représente une impédance de :

$$10 \times 107 \times 2 \pi = 6,72 \text{ k}\Omega.$$

Pour avoir un facteur Q de 8 244, il faudrait qu'elle ait une résistance série de $6\ 720 / 8\ 244 = 0,82 \Omega$.

Vous commencez à réaliser ce que nous avons obtenu : pour faire un bobinage de 10 H, il faudrait des dizaines de milliers de tours sur un bon noyau. Pensez-vous que vous y arriveriez avec un fil dont la résistance totale serait de moins d'un ohm ? Et encore, il faudrait inclure dans les pertes, en plus de la résistance du fil, d'autres causes d'amortissement, qui effondreraient le facteur Q.

Avec 10 H à environ 100 Hz, un bobinage classique ayant un facteur Q de plus de 100

serait un bel exploit. Vous venez d'avoir plus de 8 000 ! Et on peut encore améliorer la performance, comme nous allons le voir.

LES CONDENSATEURS NE SONT PAS « PARFAITS » ? TANT PIS, ON « FERA AVEC »

Remplacez donc le 0,22 μF C', au styroflex, du montage de la figure 17 par un bon 0,22 μF bien classique. Cette fois, l'amplitude des oscillations peut tomber de moitié en moins d'une seconde. Le facteur Q ne vaut plus « que 500 à 400 ».

Est-ce améliorable ? Bien sûr. Nous allons compenser le déphasage parasite apporté par C'.

Pour cela, nous allons d'abord tester le sens dans lequel il faut corriger ce déphasage.

En recommençant les essais d'oscillation du montage de la figure 17, nous allons shunter le résistor M de la figure 16 par un condensateur, d'abord de 220 pF, puis de 330 pF, puis de 560 pF...

Il se peut (c'est le cas le plus courant) que l'amortissement diminue, c'est-à-dire que le temps mis par l'amplitude des oscillations pour se réduire de moitié augmente.

Il est également possible (suivant le type d'imperfection de C') que le branchement de ce condensateur augmente l'amortissement (l'amplitude diminue plus vite quand il est branché que sans lui). Dans un tel cas, on recommence les essais, en shuntant, cette fois, le résistor P du montage de la figure 16 par des condensateurs de 220, 330... pF : l'effet sera opposé à celui d'un condensateur shuntant le résistor M.

Supposons que nous nous trouvions dans le premier cas (plus courant). Il y a une valeur « critique » de capacité, pour

le condensateur qui shunte le résistor M, pour laquelle l'amortissement devient nul. Si on dépasse cette valeur, on a un « amortissement négatif » : l'amplitude augmente toute seule, comme nous l'avons déjà évoqué plus haut.

Avec un 0,22 μF du type « bagnard » pour C', l'auteur a trouvé qu'il fallait arriver à environ 900 pF shuntant M pour compenser les pertes diverses.

COMMENT « AJUSTER » UN CONDENSATEUR DE 900 pF ?

L'ennui, c'est qu'il n'y a pas de condensateur ajustable allant à une telle valeur. Alors, on peut facilement tourner la difficulté en procédant comme le montre la figure 18.

Sur cette figure, nous avons donné tous les détails utiles pour une réalisation pratique.

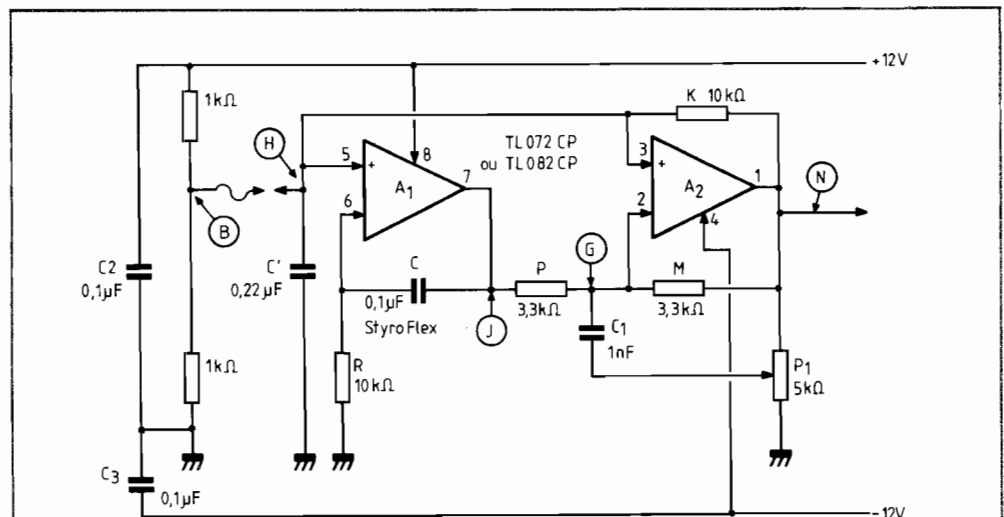


Fig. 18. - Version complète du « gyrateur » de la figure 17. Pour lutter contre certaines imperfections des composants, on a ajouté C₁ et P₁, qui doit être réglé pour amener l'amortissement du « circuit oscillant » à presque zéro. Les condensateurs C₂ et C₃ sont les découplages classiques des amplificateurs opérationnels. Les valeurs indiquées correspondent à un « coefficient de self-induction » de 10 H et à une fréquence d'oscillation de 107 Hz.

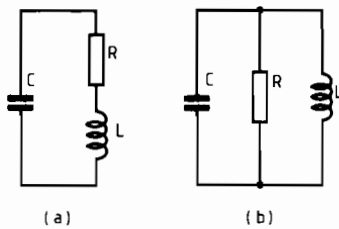


Fig. 19. — Il y a deux façons d'amortir un circuit oscillant : en (a) par un résistor R en série avec L, l'amortissement croît si la résistance de R croît ; en (b), le résistor R est en parallèle sur L, il amortit d'autant plus qu'il a une résistance plus faible.

L'amplificateur opérationnel double est un TL 072 CP (que l'on trouve facilement chez les fournisseurs de composants, ou chez Verospeed), mais on aurait aussi bien avec un TL 082 CP (encore plus courant).

Les deux condensateurs C_2 et C_3 , de $0,1 \mu\text{F}$ chacun, sont les « découplages » vers la masse de $VS+$ et $VS-$, qu'il est classique et prudent d'utiliser dans tous les montages à amplificateur opérationnel. On doit les placer assez près du circuit intégré.

Et C_1 ? Au lieu d'en faire varier la valeur, ce qui aurait été difficile, car on a de la peine à trouver un ajustable de 1 nF maximal, nous avons pris un condensateur fixe, de 1 nF (valeur trop grande pour compenser les pertes, donnant un « amortissement négatif » quand on le branche directement aux bornes de M).

Pour obtenir le même effet qu'une réduction de la capacité de C_1 , nous n'avons appliqué à son armature de droite qu'une fraction (réglable) du potentiel du point (N). Pour cela, nous avons relié le point (N) à la masse par un potentiomètre P_1 , dont la valeur de résistance a peu d'importance (ici $5 \text{ k}\Omega$). C'est le curseur de P_1 qui commande C_1 .

Donc, en excitant notre montage par des « chocs électriques » (connexion momentanée du point (H) au point

commun des deux résisteurs de $1 \text{ k}\Omega$), nous observons le signal au point (N), et nous recommençons en tournant le potentiomètre P_1 .

On voit que la vitesse de décroissance de l'oscillation diminue quand le curseur de P_1 s'écarte de la masse. Pour un bon réglage de la position de ce curseur, l'amplitude semble fixe : cela correspond à un facteur Q infini (pas moins !).

Si, lors de l'essai réalisé avec des condensateurs fixes, on a vu que l'on devait, pour réduire l'amortissement, les placer en parallèle avec le résistor P, le potentiomètre de la figure 18 doit être monté entre le point (J) et la masse, tous les autres composants restant sans modification.

UN PETIT RETOUR SUR L'AMORTISSEMENT PARALLELE

Dans la définition du facteur de qualité Q, nous avons supposé que le défaut du bobinage, amortissant les oscillations du circuit oscillant que l'on réalise avec ce bobinage, était un résistor placé en série avec le bobinage « parfait » (fig. 19a). Dans ce cas, évidemment, le facteur de qualité est d'autant plus grand que R est plus petit.

Mais on peut imaginer que l'amortissement soit donné par un résistor en parallèle sur L et C (fig. 19 b). Dans ce

cas, le facteur de qualité du circuit oscillant sera grand si R est grand, car la puissance consommée par ce résistor sera petite.

On voit alors que le facteur Q doit s'exprimer :

$$Q = R/\omega L = R/2\pi FL$$

et, là aussi, il sera égal au produit par 4,53 du nombre d'oscillations nécessaires pour que l'amplitude soit réduite de moitié (pour ceux qui aiment les précisions, ce nombre 4,53 est le quotient de π par le logarithme népérien de 2).

VERIFIONS CELA PRATIQUEMENT

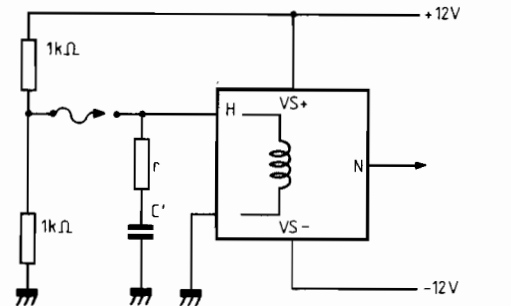
Avec le montage de la figure 18, il est facile de se rendre compte des influences

d'un résistor série ou parallèle. Il suffit de réaliser les montages des figures 20 (a) puis 20 (b).

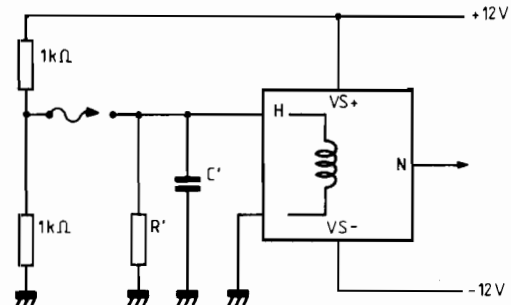
Dans ces deux figures, notre gyrateur complet, tel que le représente la figure 18, est symbolisé, comme sur la figure 17, par un carré à cinq connexions (point H, masse, $VS+$, $VS-$, sortie N), dans lequel est représenté un bobinage, entre (H) et masse, pour rappeler sa fonction.

Dans le cas d'un amortissement série (fig. 20a), vous verrez rapidement qu'il suffit d'une valeur très faible de r pour amener un amortissement considérable.

Toujours dans le cas du choix de la valeur de L équivalent de 10 H et d'un condensateur C' de $0,22 \mu\text{F}$ (oscillation à 107 Hz), nous supposons que nous avons réglé le po-



(a)



(b)

Fig. 20. — On transpose les deux types d'amortissement de la figure 19 au cas du circuit oscillant utilisant un gyrateur en guise de « bobinage », ce qui permet de voir l'excellente qualité du « bobinage » en question.

tentiomètre P de la figure 18 de telle façon qu'il faille au moins 20 s pour que l'amplitude des oscillations tombe de moitié.

Rappelons ici que, pour déclencher les oscillations, il suffit d'effleurer le point (H) par un fil relié au point commun des deux résisteurs de 1 kΩ.

Avec une durée de 21 s (plus de 2 200 oscillations) pour réduire l'amplitude de moitié, cela correspond à un facteur Q de plus de 10 000.

On s'aperçoit que le fait de mettre en série avec C' (fig. 20a) un résistor de 2,2 Ω (nous disons bien : 2,2 Ω, sans M ni k) seulement fait tomber à près de 6 s le temps nécessaire pour réduire l'amplitude de moitié. C'est normal : un bobinage de 10 H, à une fréquence de 107 Hz, a une impédance de 6,72 kΩ. Supposons-le « parfait » ; si l'on place en série une 2,2 Ω, cela fait :

$$Q = \frac{6\,720}{2,2} = 3\,056.$$

On doit donc trouver une amplitude réduite de moitié au bout de $3\,056/4,53 = 674$ périodes, soit une durée de $674/107 = 6,3$ s.

On arrive au même résultat en mettant en parallèle avec C' (fig. 20b) un résistor d'environ 22 MΩ (ces composants, si utiles, sont souvent difficiles à trouver, mais il y a chez Verospeed des 10 MΩ type SFR 25 très peu chères, même vendues par 50 pièces, et des modèles VR 37, de 10, 15, 22 et 33 MΩ, plus chères mais accessibles).

Cet amortissement était à prévoir. Pour avoir un facteur Q de l'ordre de 3 056 comme tout à l'heure, il faut mettre, en parallèle sur C', un résistor dont la résistance vaut :

$$3\,056 \times 6\,720 = 20,5\text{ M}\Omega$$

LE POINT N POUR L'OSCILLOSCOPE

Nous pouvons maintenant justifier le choix du point (N) des figures 14 et 18 pour y bran-

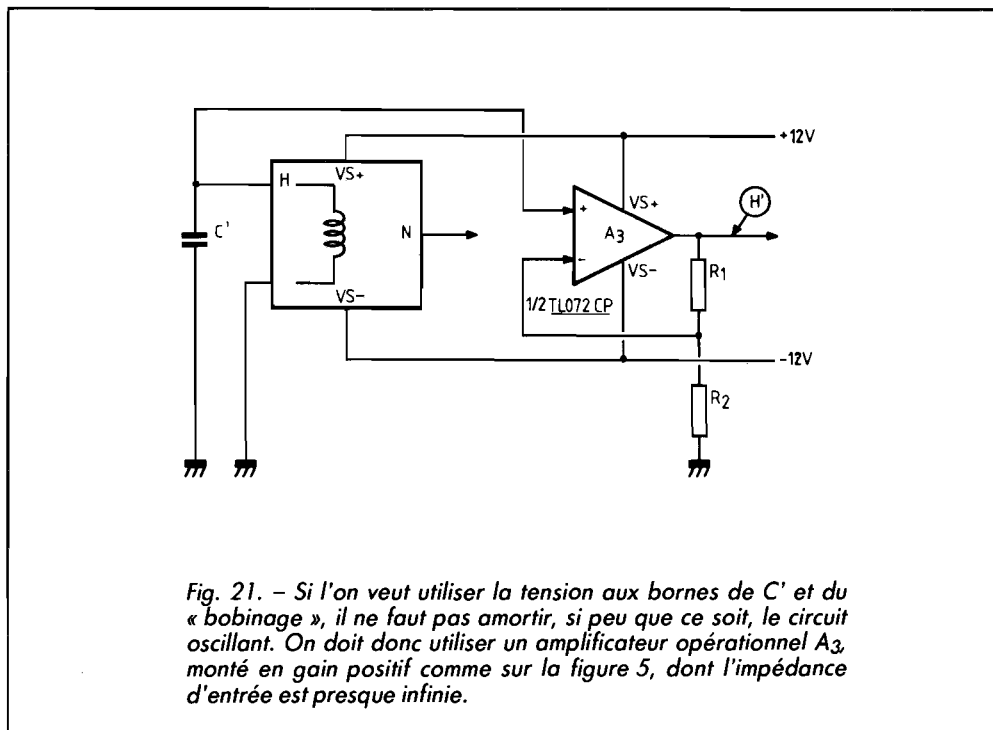


Fig. 21. — Si l'on veut utiliser la tension aux bornes de C' et du « bobinage », il ne faut pas amortir, si peu que ce soit, le circuit oscillant. On doit donc utiliser un amplificateur opérationnel A₃, monté en gain positif comme sur la figure 5, dont l'impédance d'entrée est presque infinie.

cher l'oscilloscope. L'idée qui vient naturellement à celui qui commence à essayer les gyrateurs est de connecter l'oscilloscope au point (H)... et le résultat est désastreux.

Pourquoi ? Tout simplement parce que, en supposant que vous utilisiez un oscilloscope avec une sonde passive de rapport 1/10 (ce qu'il faut toujours faire, sauf si c'est absolument impossible), cette sonde se comporte comme un résistor de 10 MΩ.

Dans le cas de notre exemple, on aurait ainsi, en admettant le tout réglé pour un Q infini, réduit le facteur Q à :

$$\frac{10\,000\,000}{6\,720} = 1\,490$$

soit une perte de 50 % de l'amplitude en $1\,490/4,53 = 328$ oscillations, soit un temps de 3 s.

Donc, dans ce cas précis, la résistance d'entrée de la sonde, 10 MΩ, parfaitement « infinie » pour bon nombre d'applications, est très insuffisante. L'auteur avoue d'ailleurs franchement qu'il n'y a pas pensé tout de suite, et que

les premiers résultats du gyrateur l'ont déçu, jusqu'au moment où, ayant branché la sonde en (J) et (N), il a vu le montage devenir excellent et s'est écrié, comme un acteur regretté : « Bon sang, mais c'est bien sûr ! ».

Si l'on veut « utiliser » la tension alternative en (H) sans amortir le « bobinage », c'est très simple : il suffit de relier ce point à l'entrée « + » d'un troisième amplificateur opérationnel, A₃, monté en gain positif (fig. 21).

L'entrée d'un amplificateur de gain positif réalisé avec un amplificateur opérationnel a, en effet, une impédance qui se chiffre en milliers de mégohms : aucun amortissement n'est plus à craindre.

Le plus souvent, un gain de +1 sera le mieux (on prend alors $R_1 = 0$, soit une connexion directe de la sortie de A₃ à son entrée « - », et on supprime R₂). Il y a cependant des cas, que nous verrons plus loin, où l'on a intérêt à réaliser, avec A₃, un gain de 2 ou 3, tout simplement pour obtenir en (H') (sortie de A₃) la

même amplitude qu'au point (J), en sortie de A₁.

En effet, ces deux tensions sont exactement « en quadrature » (déphasées de 90°), et, en les appliquant aux entrées X et Y d'un oscilloscope, on fait parcourir un cercle au spot.

Dans ce cas, attention ! L'amortissement tend à réduire à zéro l'amplitude des tensions en (J) et (H'), le spot s'arrête au centre de l'écran, et, s'il est intense, brûle l'écran en ce point. C'est un danger que l'on court toujours dans l'utilisation d'un oscilloscope « en X-Y », en particulier en faisant des « figures de Lissajoux » : il faut, sans cesse, garder la main sur le bouton de commande de la luminosité du spot.

L'auteur, membre actif de la S.P.T.C. (Société protectrice des tubes cathodiques) ne veut, à aucun prix, avoir sur la conscience la destruction de l'oscilloscope d'un lecteur.

J.P. OEHMICHEN