

# **Une application des C.I.L. (A.op) : Circuits Oscillants : Entretien des oscillations à l'aide d'un circuit intégr $\acute{e}$ lin $\acute{e}$ aire\***

par J. Le DILY  
Lyc $\acute{e}$ e Technique Vauban - 29200 BREST

---

*Cette  $\acute{e}$ tude a  $\acute{e}$ t $\acute{e}$  en partie propos $\acute{e}$ e par son auteur lors d'une journ $\acute{e}$ e de formation en juin 1987  $\acute{a}$  Brest.*

*La r $\acute{e}$ ussite syst $\acute{e}$ matique des oscillations entretenues est le but recherch $\acute{e}$  ; souhaitons qu'il soit atteint.*

## **Plan**

- Introduction et position du probl $\acute{e}$ me ;
- Dip $\acute{o}$ les actifs  $\acute{a}$   $R_d$  n $\acute{e}$ gative ;
- Condition de fonctionnement lin $\acute{e}$ aire de l'A.op ;
- Association RLC s $\acute{e}$ rie - N.I.C. ;
- Association RLC parall $\acute{e}$ le - N.I.C. ;
- Autre exemple d'association ;
- Mat $\acute{e}$ riel utilis $\acute{e}$  et montages oscillographiques ;
- Bibliographie.

### **1. INTRODUCTION**

Les circuits rencontr $\acute{e}$ s dans cette  $\acute{e}$ tude pouvant  $\acute{e}$ tre le si $\acute{e}$ ge d'oscillations non forc $\acute{e}$ ment sinuso $\acute{i}$ dales, il est n $\acute{e}$ cessaire de les  $\acute{e}$ tudier de fa $\acute{o}$ n g $\acute{e}$ n $\acute{e}$ rale en r $\acute{e}$ gime lentement variable (r $\acute{e}$ seau lin $\acute{e}$ aire).

Rappelons d'autre part que toute oscillation non harmonique est appel $\acute{e}$ e oscillation de relaxation.

\*  $\acute{E}$ tude simplifi $\acute{e}$ e essentiellement exp $\acute{e}$ rimentale pouvant  $\acute{e}$ tre int $\acute{e}$ ressante dans le cadre des nouveaux programmes de Terminale C et E').

### 1.1. Position du problème

En général, dans les systèmes électroniques, les oscillations sont des parasites que l'on cherche à éviter ; dans le cas précis qui nous intéresse on cherche au contraire à les générer. Il faut alors partir d'un système capable d'osciller (circuit RLC), donc d'un système du second ordre.

Ce circuit RLC, soumis à une excitation d'entrée, est régi par l'équation différentielle.

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2z\omega_0 \cdot \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 \cdot y = f(t)$$

y étant la grandeur considérée ;

f(t) liée à la présence de l'excitation (génér. de commande par exemple) ;

$\omega_0$  pulsation naturelle d'oscillation ;

$$z = \frac{1}{2Q_0} \quad \text{coefficient d'amortissement.}$$

**La solution de cette équation** est la superposition de :

- la solution de l'E.S.S.M. (donc indépendante de l'excitation) qui est la **réponse naturelle du circuit** à toute sollicitation ;
- la solution particulière de l'E.Gale correspondant au régime forcé (régime permanent établi à la fin du transitoire).

Puisque nous recherchons les conditions d'aptitude du circuit à osciller naturellement, c'est donc l'étude de la réponse libre du système qui nous intéresse, c'est-à-dire les solutions de l'équation différentielle.

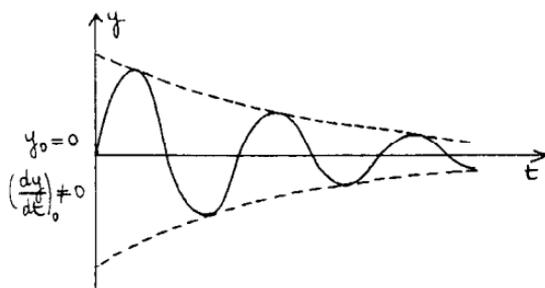
$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2z\omega_0 \cdot \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 \cdot y = 0$$

Les résultats sont bien connus :

**pour  $z < 1$**  la solution est de la forme  $y(t) = Y_{\text{MAX}} \cdot e^{-z\omega_0 t} \cdot \sin(\omega t + \Phi)$ .

$Y_{\text{MAX}}$  et  $\Phi$  dépendent des conditions initiales  $\omega = \omega_0 \sqrt{1-z^2}$  pseudo-pulsation.

Fonction oscillatoire amortie



### 1.2. Interprétation énergétique

L'amortissement correspond aux pertes d'énergie par effet Joule à chaque alternance (résistance du dipôle RLC).

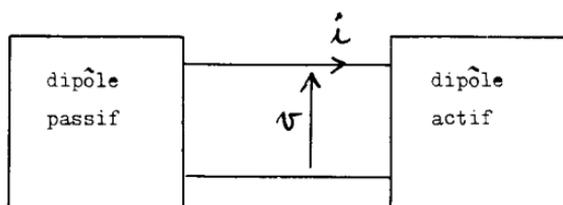
**Nous nous proposons donc d'entretenir les oscillations dans un dipôle RLC a priori peu amorti.**

### 1.3. Entretien des oscillations

Les deux considérations complémentaires sont classiques :

- **Considération énergétique**

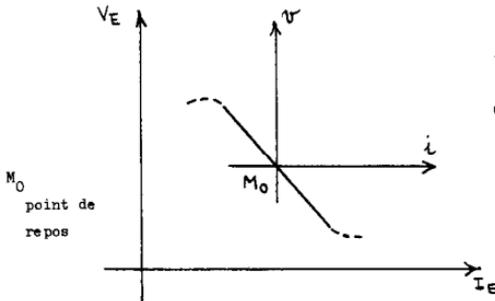
Compensation d'énergie, obtenue par apport extérieur ; cette considération nous conduit tout naturellement à rechercher une association dipôle passif - dipôle actif, le dipôle actif apportant l'énergie compensatrice indispensable à l'entretien des oscillations.



Puisque l'amortissement du dipôle passif seul est dû à sa résistance, le dipôle actif associé doit se comporter en régime dynamique comme une résistance négative.

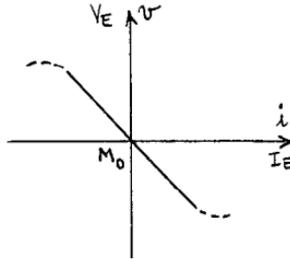
La caractéristique statique de ce dipôle actif doit donc comporter une région pour laquelle on peut écrire l'équation :

$$v = -R_0.i$$



$v$  et  $i$  étant les variations des valeurs instantanées des tension et courant d'entrée  $v_E(t)$  et  $i_E(t)$ .

1.4. **Remarque** : dans certains cas le point de repos est de coordonnées nulles. C'est cette situation que nous allons rencontrer pour les dipôles actifs à C.I.L. utilisés.



Dans ces conditions l'association dipôle passif - dipôle actif reste encore un système du second ordre d'équation

$$\frac{d^2}{dt^2} + 2m\omega'_0 \cdot \frac{dy}{dt} + \omega'_0{}^2 \cdot y = 0$$

dont la solution est pour  $m < 1$

$$y = Y_{MAX} \cdot e^{-m\omega'_0 t} \cdot \sin(\omega' t + \Phi') \quad \text{avec} \quad \omega' = \omega'_0 \cdot \sqrt{1 - m^2}$$

• d'où la **Considération analytique**

Suppression de l'amortissement global du système  $m = 0$

$$Y_{MAX} \cdot e^{-m\omega'_0 t} \Rightarrow Y_{MAX} \quad \text{et} \quad \omega' \Rightarrow \omega'_0$$

$$\text{soit} \quad y(t) = Y_{MAX} \cdot \sin(\omega'_0 t + \Phi')$$

**Remarque** : il est évident que, lors de la réalisation expérimentale, on va être confronté aux réalités physiques inhérentes à tout système ; dès lors, la condition  $m = 0$  devient une condition idéale, donc limite, dont on cherche à se rapprocher le plus finement possible.

1.5. Notations

Pour éviter toute confusion entre le dipôle RLC seul et l'association dipôle passif - dipôle actif, les notations utilisées sont :

	Dipôle passif RLC	Association
Pulsation naturelle d'oscillation	$\omega_0$	$\omega'_0$
Facteur de qualité	$Q_0$	
Coefficient d'amortissement	$z$	$m$

La notation  $Q$  sera réservée pour le facteur de qualité de la bobine.

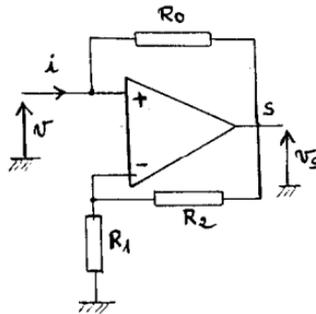
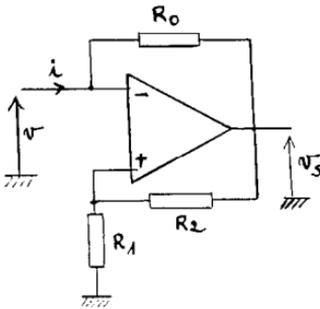
2. DIPÔLES ACTIFS À RESISTANCE DYNAMIQUE NÉGATIVE  
(obtenus à l'aide d'un C.I.L.)

2.1. Un tel dipôle est aussi appelé **Convertisseur d'Impédance Négative** (N.I.C. en américain).

Deux montages sont possibles :

- **HYPOTHÈSE fondamentale :**

Fonctionnement linéaire du C.I.L.  
donc  $v^- = v^+$



$$R_e = \frac{v}{i} \quad \text{avec} \quad i = \frac{v - v_S}{R_0}$$

$$\text{ou} \quad v^+ = v_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{soit} \quad v_S = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot v^+$$

$$= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v^- = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot v$$

Même démonstration

$$\text{avec} \quad v^- = v_S \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\text{soit} \quad v_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v^-$$

$$= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v^+ = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v$$

d'où 
$$i = \frac{1}{R_0} \left[ v - v - \frac{R_2}{R_1} \cdot v \right] = - \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot v$$

soit 
$$R_e = \frac{v}{i} = - R_0 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Pour simplifier on retiendra pour la suite :  $R_1 = R_2 = R$

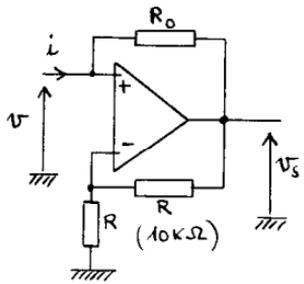
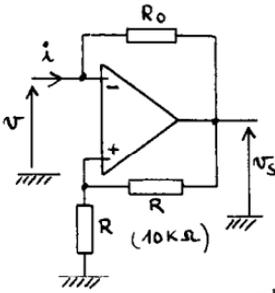
Il vient alors :  $R_e = -R_0$

2.2. Caractéristiques  $v = f(i)$  des deux N.I.C.

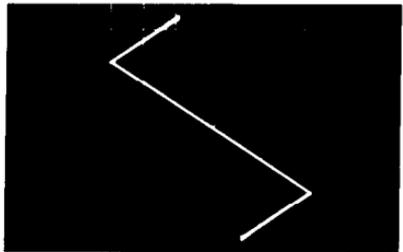
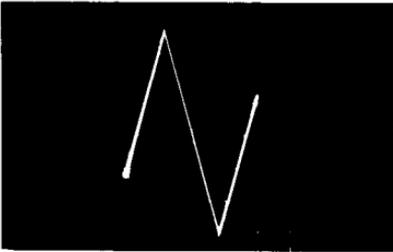
• *Dipôle en N*

(appellations reflétant les allures des caractéristiques)

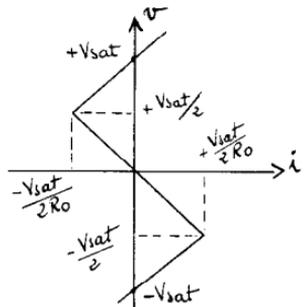
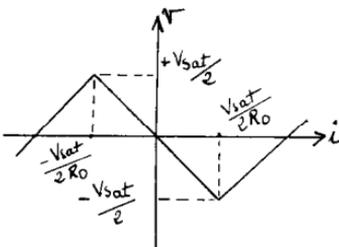
• *Dipôle en S*



relevés oscillographiques



La détermination des points remarquables est simple :



**Conclusion :** On remarque dans les deux cas **une brutale rupture de linéarité** correspondant bien entendu à la saturation de l'A.op.

Cette non-linéarité a son importance comme nous le verrons plus loin.

### 3. CONDITION DE FONCTIONNEMENT LINÉAIRE DE L'A.op.

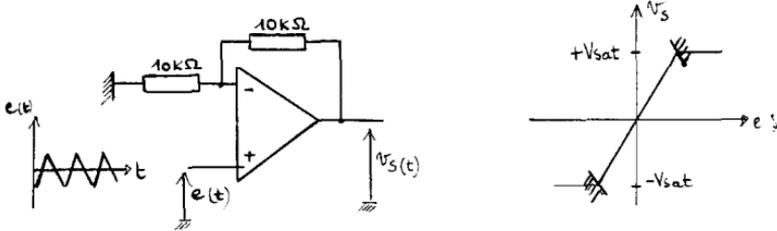
#### 3.1. Rappels sur l'A.op [1]

(alimentation :  $+V_{CC}$ ,  $-V_{CC}$ ).

Chacun sait que si un A.op est en saturation dès le repos, il devient impossible d'en obtenir un fonctionnement linéaire.

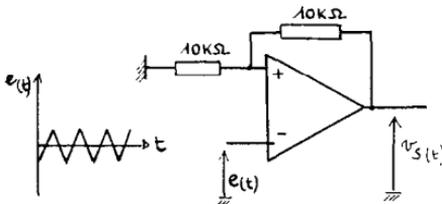
En effet :

- *A.op avec CR (contre-réaction)*



**fonctionnement linéaire possible au repos :  $e(t) = 0 \rightarrow v_S = 0$**

- *A.op avec réaction*



A.op saturé quel que soit le niveau de  $e(t)$ .

**fonctionnement linéaire impossible au repos :  $e(t) = 0 \rightarrow v_S = \pm V_{sat}$ .**

### 3.2. L'association dipôle passif - dipôle actif

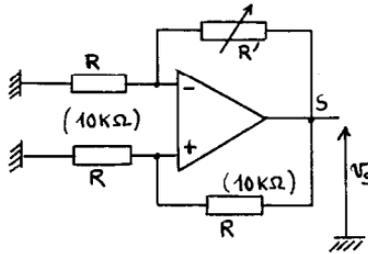
Elle aboutit a priori à l'un des deux montages ci-dessous :



Dans ce système, le C.I.L. est soumis à la fois à une CR et à une Réaction ; déterminons alors son mode de fonctionnement.

#### a) au repos

L'expérience ci-dessous illustre une propriété que l'on pouvait attendre intuitivement, compte tenu des rappels précédents :



**Taux de CR :** (notation TCR) fraction de la tension de sortie réinjectée à l'entrée -

$$\text{TCR} = \frac{R}{R + R'}$$

**Taux de Réaction :** (notation TR) fraction de la tension de sortie réinjectée à l'entrée +

$$\text{TR} = \frac{R}{R + R} = \frac{1}{2}$$

$R' = 9 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{TCR} > \text{TR} \rightarrow v_s = 0$  état stable

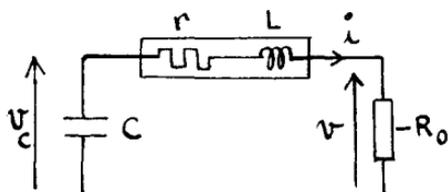
$R' = 11 \text{ k}\Omega \rightarrow \text{TR} > \text{TCR} \rightarrow |v_s| = V_{\text{sat}}$  état «stable»

**b) fonctionnement linéaire**

Un fonctionnement linéaire ne pouvant se concevoir à partir d'un point de repos en saturation, la condition nécessaire à un tel fonctionnement est donc :

$$TCR > TR$$

(Bien entendu cette condition nécessaire n'est pas suffisante : la linéarité peut être perdue par saturation en tension ou limitation en courant).

**4. ASSOCIATION RLC SÉRIE · N.I.C.****4.1. Étude du système**

fonctionnement linéaire de l'A.op  
réseau linéaire

Son équation de fonctionnement en régime quelconque s'écrit :

$$\frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{1}{L} (r - R_0) \cdot \frac{d v_c}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot v_c = 0$$

De la forme générale

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2 m \omega'_0 \cdot \frac{dy}{dt} + \omega'_0{}^2 \cdot y = 0$$

Dont la solution est, pour  $m < 1$  :

$$y = Y_{MAX} \cdot e^{-m\omega'_0 t} \sin(\omega'_0 t + \Phi')$$

Par identification il vient

$$\left( \begin{array}{l} \omega'_0{}^2 = \frac{1}{LC} = \omega_0{}^2 \\ 2m\omega'_0 = \frac{1}{L}(r - R_0) \end{array} \right.$$

( $\omega'_0 = \omega_0$  pulsation naturelle d'oscillation du circuit RLC).

d'où la condition d'oscillation entretenue  $m = 0 \rightarrow R_0 = r$

et  $v_c = V_{C \text{ MAX}} \cdot \sin(\omega_0 t + \Phi')$ .

Ce résultat était évident par la simple considération énergétique (compensation  $R_0 = r$ ) néanmoins la méthode analytique a été retenue parce qu'elle est d'application plus générale comme nous le verrons par la suite.

La condition  $m = 0$  à réaliser pour entretenir les oscillations étant très pointue, examinons ce qui se passe de part et d'autre de cette valeur 0.

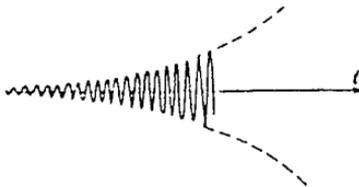
La solution générale de l'équation étant ( $m < 1$ )

$$v_c = V_{C \text{ MAX}} \cdot e^{-m\omega'_0 t} \cdot \sin(\omega' t + \Phi')$$

Il s'avère que :

si  $m > 0$   $e^{-m\omega'_0 t} \rightarrow 0$  toute tentative d'oscillation entretenue est vouée à l'échec.

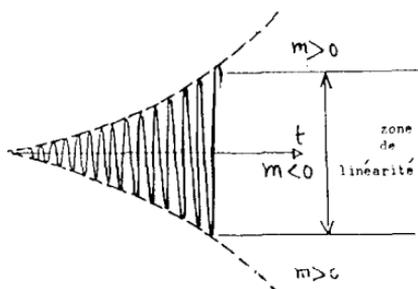
si  $m < 0$   $e^{-m\omega'_0 t} \nearrow$  c'est donc dans cette situation que nous devons impérativement nous placer pour **assurer l'amorçage des oscillations** : rappelons que tout circuit, sans exception, est le siège de f.é.m. perturbatrices d'origines diverses ; ainsi, pour petite qu'elle puisse être, une telle sollicitation assure l'amorçage des oscillations dès lors que  $m < 0$ .



Cet amorçage se traduisant par la naissance d'une oscillation d'amplitude exponentiellement croissante ( $e^{-m\omega'_0 t}$ ), on aboutirait inmanquablement à une instabilité (amplitude  $\nearrow \infty$ ) si le fonctionnement persistait à être linéaire.

**Fort heureusement ce n'est pas le cas** : nous avons vu précédemment que la caractéristique  $v = f(i)$  de **chacun des deux dipôles actifs** à notre disposition présente une brutale non-linéarité ; c'est cette non-linéarité qui conduit le régime oscillatoire d'amorçage à se stabiliser :

— l'amorçage débute en zone de linéarité à la condition  $m < 0$ , c'est-à-dire grâce au comportement en résistance négative du dipôle actif ;



— l'amplitude de l'oscillation croît donc exponentiellement ( $e^{-m\omega^2 t}$ ), mais dès qu'elle pénètre en non-linéarité, l'effet de résistance négative disparaît, stoppant ainsi la croissance exponentielle de l'amplitude (on montrera plus loin que  $m$  devient  $> 0$  dans cette zone).

— pour autant l'oscillation ne va pas s'amortir ; en effet, le point de fonctionnement repassant en zone de linéarité, l'amplitude va retrouver sa croissance exponentielle ( $m < 0$ ) pour à nouveau perdre en retrouvant la non-linéarité ( $m > 0$ )...

C'est ainsi que la non-linéarité conduit le régime oscillatoire d'amorçage à se stabiliser pour devenir un régime oscillatoire stationnaire (oscillations d'amplitude finie et stable).

Il ne nous reste plus alors qu'à nous placer, par réglage fin, à la limite  $m \rightarrow 0$  ; mais on aura compris que, **si fin que soit le réglage**, le point de fonctionnement doit **pénétrer un tant soit peu en non-linéarité** pour que le fonctionnement soit stabilisé ;

— la condition de réalisation devient donc  $m \leq 0$  et nous obtiendrons des oscillations quasi-sinusoïdales.

**Le PROCESSUS de réglage** sera donc le suivant :

— sachant que pour  $m > 0$   $v_c = 0$  ( $v = 0, v_s = 0$ ) ( $R_0 < r$ ) on se place à  $R_0$  légèrement  $> r$  pour satisfaire la condition  $m < 0$  : l'amorçage est suffisamment brutal pour constater à l'oscillo. des oscillations.

On se ramène alors à la limite  $m \leq 0$  ( $R_0 \geq r$ ) pour obtenir les oscillations quasi-sinusoïdales recherchées.

Ainsi, linéarité et non-linéarité se complètent donc :

— si la linéarité permet, par son effet de résistance négative, l'établissement des oscillations,

— c'est la non-linéarité qui en assure la stabilisation.

**Remarque :** bien entendu, si  $m$  très  $< 0$  le point de fonctionnement fera une excursion assez lointaine en non-linéarité avant d'être « contrôlé » par cette non-linéarité ; cela donne lieu à un régime stationnaire d'oscillations de relaxation très nettes.

#### 4.2. Choix du dipôle actif

L'étude complète du comportement dynamique du système n'est pas simple ; nous ne pouvons l'envisager dans ce document simplifié ; à défaut de cette étude complète nous pouvons nous limiter à une étude locale.

Nous savons qu'un fonctionnement linéaire de l'A.op n'est pas possible si, au repos, celui-ci se trouve en saturation.

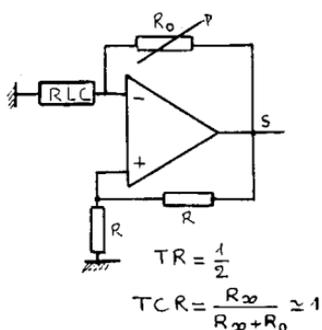
Cela nous conduit donc à retenir pour le montage celui des deux N.I.C. qui exclut cette situation, à savoir celui qui assure à l'A.op au repos la condition.

$$TCR > TR$$

L'état de repos de l'A.op étant essentiel, définissons-le dans le système global :

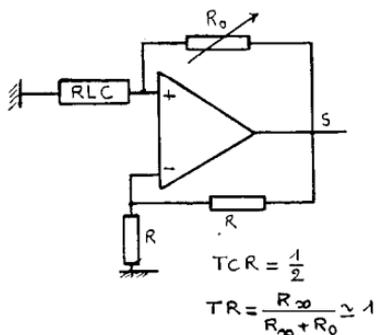
• *L'A.op est au repos :*

- quand aucune oscillation ne peut prendre naissance
- ou, dans le cas contraire, dans le court laps de temps qui suit la mise sous tension et qui précède l'amorçage des oscillations.



$$TCR > TR \rightarrow v_s = 0$$

fonctionnement linéaire possible



$$TR > TCR \rightarrow v_s = \pm V_{sat.}$$

fonctionnement linéaire impossible

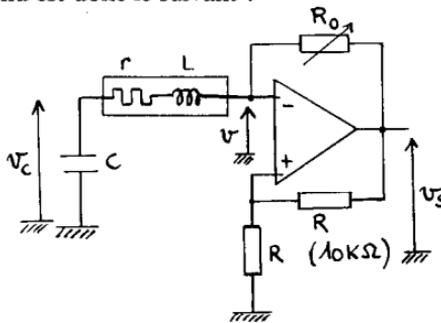
Dans ces deux cas on peut considérer que  $\omega' = 0$  ; on est donc amené à considérer la valeur du dipôle  $-\text{RLC}-$  pour  $\omega' = 0$  (donc en continu) afin de comparer les taux TCR et TR de l'A.op au repos dans les deux montages.

Pour le circuit RLC série :  $-\text{RLC}- \equiv R\infty$  (résistance infinie) d'où le choix du N.I.C. (on suppose le condensateur parfait)

#### 4.3. Réalisation expérimentale

(Rubrique MATÉRIEL à la fin de l'article)

Le montage retenu est donc le suivant :



Valeur retenue pour C : 0,1  $\mu\text{F}$  (une boîte de capacités variables permettra de modifier la fréquence des oscillations obtenues  $LC\omega_0^2 = 1$ ).

$R_0$  : boîte à décades (prévoir une boîte  $\times 0,1\Omega$  pour réglage fin).

Deux exemples de bobines vont nous permettre de bien cerner cette étude expérimentale :

Premier exemple :  $\begin{cases} L = 0,9 \text{ H} \\ r = 630 \Omega \text{ (choix volontaire d'une bobine de} \\ \text{résistance non négligeable)} \end{cases}$

Deuxième exemple :  $\begin{cases} L = 20 \text{ mH} \\ r = 22 \Omega \text{ (faible valeur)} \end{cases}$

##### 4.3.1. Premier exemple

$$\begin{cases} L = 0,9 \text{ H}, r = 630 \Omega \\ C = 0,1 \mu\text{F} \end{cases} \quad f_0 \text{ calculée} = 530 \text{ Hz}$$

Le montage étant réalisé, on suit le processus de réglage ; l'oscillation  $v_c$  sinusoïdale est obtenue pour un réglage  $R_0 = 640 \Omega$

$$f_0 \text{ mesurée} = 526 \text{ Hz}$$

### Réglage fin

Il consiste à obtenir que  $v_c$  soit aussi sinusoïdale que possible.

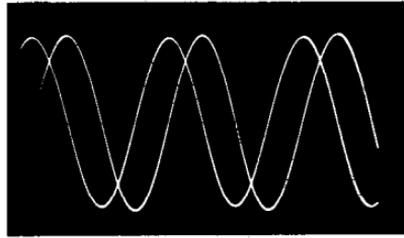
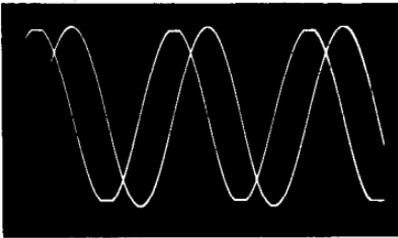
Or on remarque expérimentalement que la déformation du signal, due à la non-linéarité, est pour des valeurs de  $m$  faiblement négatives, plus sensible sur la tension de sortie  $v_s$  de l'A.op que sur  $v_c$  (circuit sélectif).

De ce fait la visualisation oscillographique de  $v_s$  s'avère indispensable pour obtenir ce réglage fin.

Le réglage limite à  $m \rightarrow 0$  s'effectuera à partir des valeurs faiblement négatives de  $m$ .

Dans cet exemple, la linéarité étant limitée par la saturation  $V_{sat}$  de l'A.op,  $m \leq 0$  se traduit par un léger écrêtage de  $v_s$  ; le bon réglage doit faire disparaître cet écrêtage.

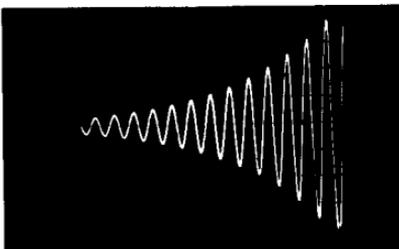
$m \rightarrow 0$



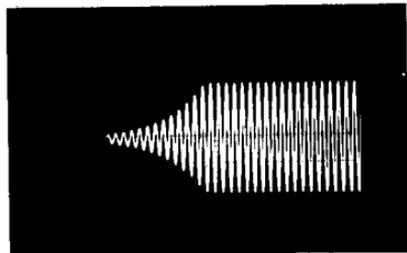
### Amorçage

$R_0$  étant une résistance étalon (réglage par bond), il suffira, pour visualiser le processus d'amorçage, de passer brutalement de  $m > 0$  ( $R_0 < r$ ) à  $m < 0$  ( $R_0 > r$ ).

Cependant, le phénomène étant furtif, il est infiniment plus confortable d'utiliser un oscillo. à mémoire :



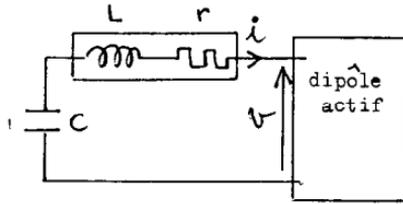
amorçage



amorçage et stabilisation

**Remarque** (peut être passée en première lecture)

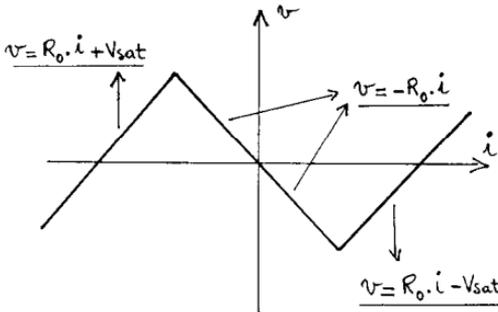
**a - montrons que  $m$  est bien  $> 0$  en non-linéarité**



L'équation qui régit le courant de ce système s'écrit :

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{r}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i + \frac{1}{L} \cdot \frac{dv}{dt} =$$

Or les équations des différentes branches de la caractéristique du dipôle actif s'obtiennent aisément.



• **Premier cas**

Zone de linéarité :  $v = -R_0 \cdot i \rightarrow \frac{dv}{dt} = -R_0 \cdot \frac{di}{dt}$

Il vient :  $\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{1}{L}(r - R_0) \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i = 0$  soit  $m < 0$

• **Deuxième cas**

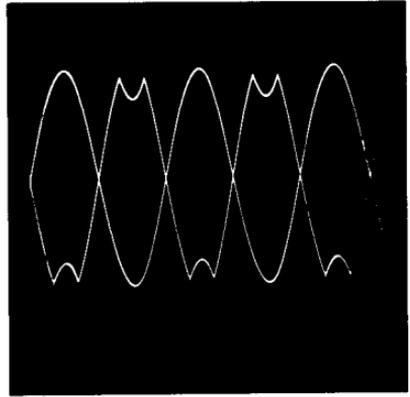
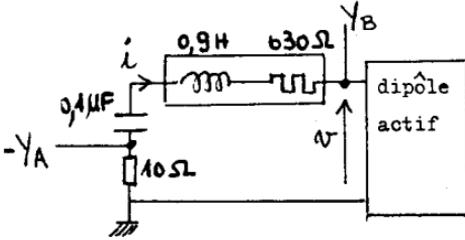
Zone de non-linéarité :  $v = R_0 \cdot i \pm V_{sat} \rightarrow \frac{dv}{dt} = R_0 \cdot \frac{di}{dt}$

Il vient :  $\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{1}{L}(r - R_0) \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0$  soit  $m > 0$

**b -** Il est intéressant de profiter de cette réalisation expérimentale pour suivre l'évolution du point de fonctionnement au niveau du dipôle actif :

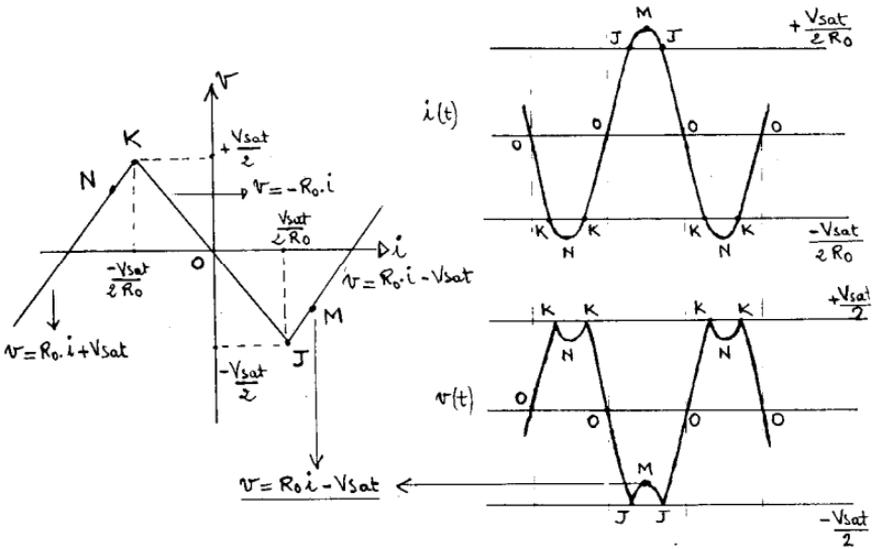
**Relevés oscillographiques**

(pour  $m < 0$ ).



**Interprétation**

(En suivant le fonctionnement entre les points M et N de la caractéristique).



avec  $i > \frac{V_{sat}}{2 R_0}$       donc  $R_0 i > \frac{V_{sat}}{2}$

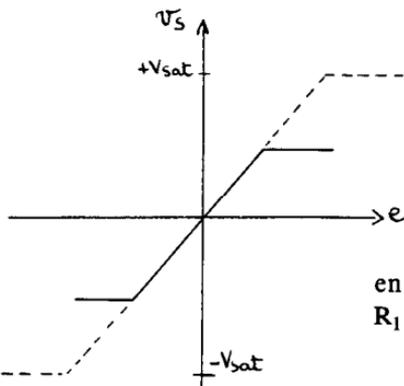
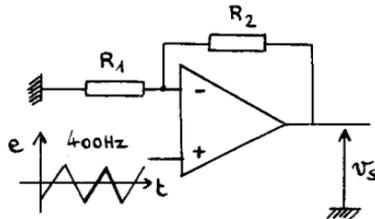
soit  $v > -\frac{V_{sat}}{2}$  ( $|v| < \frac{V_{sat}}{2}$ )

4.3.2. RLC série : deuxième exemple :

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 20 \text{ mH} , \quad r \approx 22 \Omega \\ C = 0,1 \mu\text{F} \end{array} \right.$$

Le montage est le même, mais, avant de réaliser l'expérience, souvenons-nous que l'A.op est caractérisé par une deuxième limitation : le constructeur a en effet prévu, afin de le protéger, un dispositif interne de limitation du courant débité par l'A.op ( $\approx 20 \text{ mA}$ ) ; dès que la charge vue de la sortie est insuffisante, le dispositif joue son rôle et cela se traduit pour l'A.op par un arrêt prématuré de linéarité.

Une expérience simple permet de s'en rendre compte :

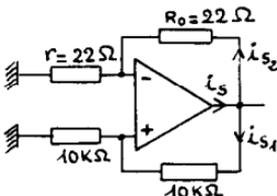


arrêt prématuré de linéarité

On se trouve dans cette situation en prenant dans le montage  $R_1 = R_2 = 150\Omega$  par exemple.

— Dans les montages usuels à A.op, les valeurs des composants passifs associés sont choisies de telle façon que cette situation soit évitée afin de profiter de la pleine linéarité.

— Or, dans le montage qui nous intéresse, à la pulsation  $\omega_0$ ,  $\boxed{\text{RLC}} \equiv r$  ; à cette pulsation le montage se résume donc à :



$$i_s = i_{s1} + i_{s2}$$

Si du côté de la réaction le courant  $i_{S1}$  est très faible, la limitation est par contre rapidement obtenue du côté de la CR où la charge vue par la sortie est faible (ici  $\approx 44 \Omega$ ) le dispositif interne va jouer son rôle et le courant débité sera donc limité.

Le domaine de linéarité de l'A.op n'est plus limité par la saturation en tension  $V_{sat}$  mais par son débit MAX.

### Réalisation expérimentale

$$\left\{ \begin{array}{l} L = 20 \text{ mH} \quad ; \quad r \approx 22 \Omega \\ C = 0,1 \mu\text{F} \\ f_0 \text{ calculée} = 3,56 \text{ kHz} \end{array} \right.$$

Le montage étant réalisé on suit le processus de réglage ; l'oscillation  $v_C$  quasi-sinusoidale est obtenue pour :

$$R_0 = 23,4 \Omega \quad ; \quad f_0 \text{ mesurée} = 3,57 \text{ kHz}$$

### Réglage fin

$m \leq 0$  ne se traduit par un écrêtage mais par des déformations à la crête de  $v_s$  ; ces déformations dépendent de l'A.op utilisé ; l'une d'elles consiste en une suroscillation et est liée à la forme de rupture de la linéarité (à la fréquence de travail la rupture n'est pas toujours très pure).

Le bon réglage s'obtient à la disparition de cette déformation ; (il est très pointu).

Voir Oscillogrammes.

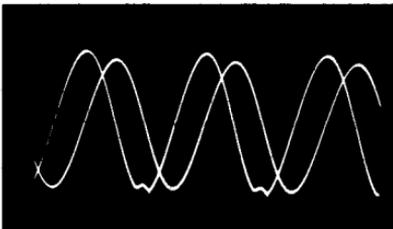
### Oscillogrammes

#### **Linéarité limitée par le débit max. de l'A.op**

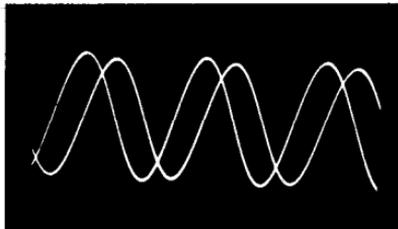
**Exemple :** dipôle RLC série très peu amorti.

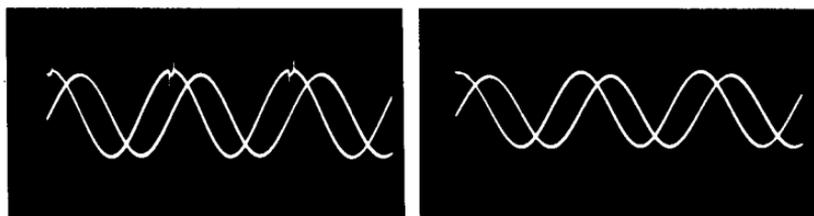
Les deux déformations rencontrées :

$m \leq 0$

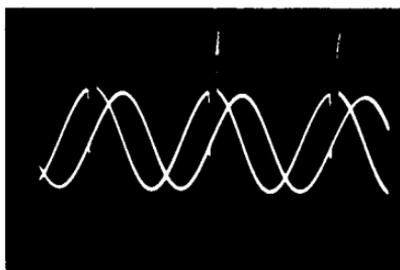


$m \rightarrow 0$

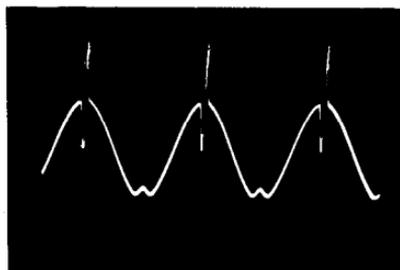




La suroscillation peut être plus ou moins importante selon l'A.op utilisé :



Lorsque la dissymétrie de la zone de linéarité est marquée, seule une alternance se trouve affectée par une de ces déformations ( $m \leq 0$ ) ; sinon les deux types de déformations peuvent coexister, chacune sur son alternance.

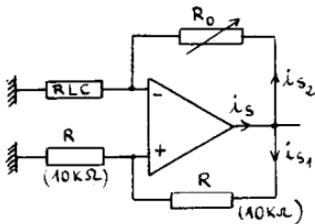


### Réglage fin (suite)

**Remarque :** on peut, si on le souhaite, sortir de cette deuxième situation et profiter ainsi de la pleine zone de linéarité pour  $v_s$  ; la solution consiste en une redistribution judicieuse [2] [3] des résistances associées à l'A.op pour constituer le N.I.C.

Ceci n'est pas indispensable à l'obtention d'une belle oscillation quasi-sinusoidale pour  $v_c$  (but recherché) mais il est intéressant de le vérifier expérimentalement.

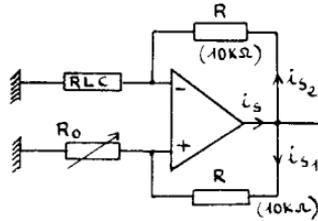
schéma 1



$$R_e = - R_0 \cdot \frac{R}{R} = - R_0$$

(N.I.C)

schéma 2



$$R_e = - R \cdot \frac{R_0}{R} = - R_0$$

(N.I.C)

La disposition des résistances R selon le schéma 2 assure des courants  $i_{s2}$  et  $i_{s1}$  suffisamment faibles pour que  $i_s$  n'atteigne pas la valeur limite fixée par le constructeur.

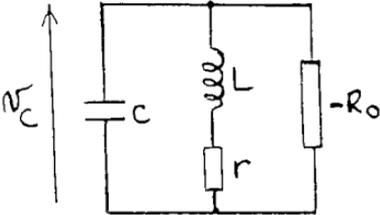
Pour autant il ne faut pas croire que la disposition du schéma 1 est préjudiciable à l'A.op lorsque la zone de linéarité est réduite par le débit maximum ; en effet, mis à part un modèle désuet comme le 709 (SFC 2709 à stabilité conditionnelle) les A.op sont désormais très bien protégés par leur dispositif interne de limitation du courant débité, si bien que leur durée de court-circuit en sortie est donnée pour illimitée.

On ne peut toutefois passer sous silence un petit défaut des montages évoluant jusqu'au débit max. de l'A.op : ils présentent une plus grande sensibilité aux charges capacitatives ; c'est pourquoi, avec certains A.op et pour des dispositions particulières des fils ou des appareils de mesure, il est possible de rencontrer un accrochage intempestif sur  $v_s$  ; il n'y a alors pas lieu de dramatiser : une modification de la disposition des fils et du matériel ou, au pire, un changement du type d'A.op suffira pour éliminer cet accrochage.

Si le choix généralisé de la disposition du schéma 2 permet un réglage fin identique pour tous les dipôles et peut donc être pédagogiquement avantageux, il est bon de noter que la disposition du schéma 1 présente une sélectivité bien meilleure ( $v_c$  plus sinusoïdale et valeur de crête élevée).

## 5. ASSOCIATION // RLC - N.I.C.

## 5.1. Étude du système



(fonctionnement linéaire de l'A.op)  
(réseau linéaire)

L'équation de fonctionnement en régime quelconque s'écrit :

$$\frac{d^2v_C}{dt^2} + \left( \frac{r}{L} - \frac{1}{R_0 C} \right) \frac{dv_C}{dt} + \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{r}{R_0} \right) v_C = 0$$

En identifiant à l'équation générale, il vient :

$$\omega'_{0^2} = \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{r}{R_0} \right)$$

il vient

$$2m\omega'_0 = \frac{r}{L} - \frac{1}{R_0 C}$$

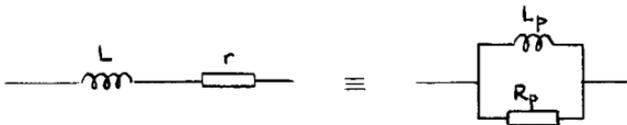
La condition d'oscillation harmonique entretenue,  $m = 0$ , entraîne :

$$\boxed{R_0 = \frac{L}{Cr}} \quad \text{d'où} \quad v_C = V_{C \text{ MAX}} \cdot \text{Sin}(\omega'_{0t} + \Phi')$$

avec

$$\boxed{\omega'_{0^2} = \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{r^2 C}{L} \right)}$$

Or on sait qu'en régime harmonique basse fréquence deux structures (série et parallèle) peuvent représenter une même bobine.



$$\text{avec } R_p = (1 + Q^2).r$$

A la pulsation  $\omega'_0$  cette résistance  $R_p$  prend la valeur :  $R_{p0} = \frac{L}{Cr}$

La condition  $m = 0$  s'obtient donc en réglant  $R_0$  à la valeur :

$$R_0 = \frac{L}{C.r} = R_{p0} ;$$

D'autre part l'équation différentielle pouvant s'écrire aussi :

$$\frac{d^2v_c}{dt^2} + \left( \frac{1}{C} \frac{1}{R_{p0}} - \frac{1}{R_0} \right) \cdot \frac{dv_c}{dt} + \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{r}{R_0} \right) v_c = 0$$

On constate que :

$m > 0$	si	$R_0 > R_{p0}$
$m < 0$	si	$R_0 < R_{p0}$

— Les considérations sur l'amorçage ( $m < 0$ ) et l'installation d'un régime oscillatoire stationnaire (légère incursion en non-linéarité) ont été évoquées précédemment (RLC série) et restent valables ici.

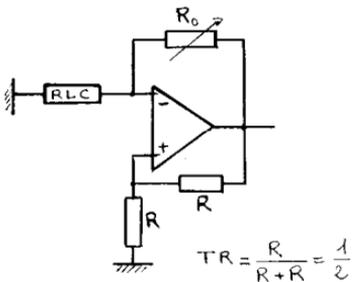
**D'où le processus de réglage**

— Sachant que pour  $m > 0$  la naissance des oscillations n'est pas possible, on se place à  $R_0 < R_{p0}$  ; l'amorçage puis les oscillations de relaxation étant obtenus, on se ramène alors à la limite  $m \rightarrow 0$  ( $m \leq 0$ ) par  $R_0 \rightarrow R_{p0}$  pour obtenir les oscillations quasi-sinusoidales recherchées. (voir réglage fin).

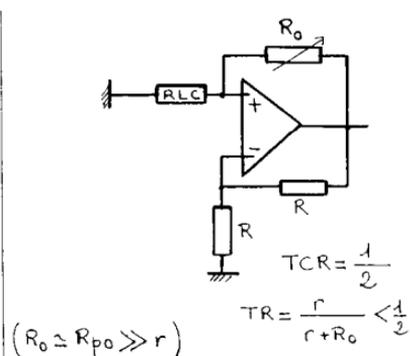
**5.2. Choix du dipôle actif**

— Il faut donc que pour  $\omega' = 0 \Rightarrow TCR \geq TR$

or pour le RLC //,  $\omega' = 0 \Rightarrow \boxed{\text{RLC}} \equiv r$ , d'où le choix du N.I.C.



fonctionnement linéaire impossible



fonctionnement linéaire possible

### 5.3. Condition d'existence de l'oscillation

Elle découle de l'expression de  $\omega'_0$ .

Les valeurs des composants passifs doivent donc répondre à la condition :

$$\frac{r^2 C}{L} < 1$$

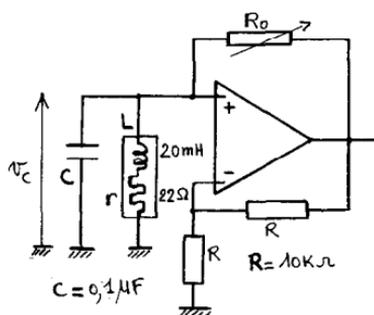
d'où le choix de C en fonction de la bobine.

**Remarque :**

on retrouve  $\omega \approx \omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  pour  $\frac{r^2 C}{L} \ll 1$  soit  $r \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$

On peut aisément montrer que cette condition correspond à un facteur de qualité  $Q \gg 1$  pour la bobine.

### 5.4. Réalisation expérimentale



$$Q \gg 1$$

Fréquence attendue :  
 $f'_0 \approx f_0 = 3,57 \text{ kHz}$

Calcul de  $R_{p0}$  :  $R_{p0} = \frac{L}{C \cdot r} = 9090 \Omega$

#### • Recherche de l'oscillation :

Réglage de  $R_0$

– On se place à  $R_0 \approx 10 \text{ k}\Omega$  ( $m > 0$ ) pour vérifier que  $v_c = 0$  ; puis, les oscillations de relaxation ayant été obtenues pour  $m < 0$ , on règle alors finement  $m \rightarrow 0$  et on aboutit pour  $R_0 = 8987 \Omega$  à une tension  $v_c$  quasi-sinusoidale :  $f'_0 = 3,57 \text{ kHz}$ .

### 5.5. Oscillogrammes

#### • Dipôle RLC parallèle

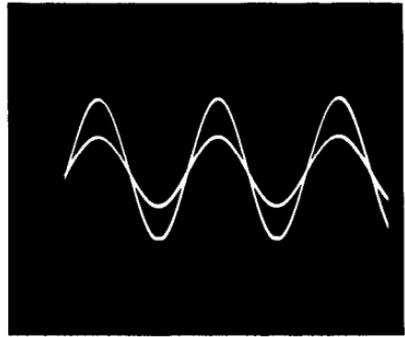
#### Linéarité limitée par la saturation en tension $V_{sat}$

(La valeur de  $R_0$  est telle que la limitation en courant ne sera jamais atteinte).

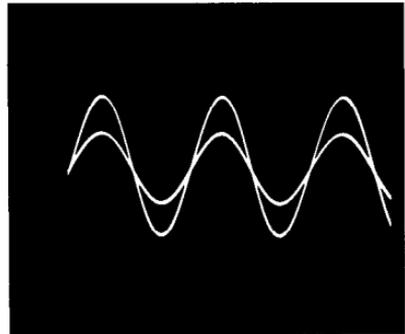
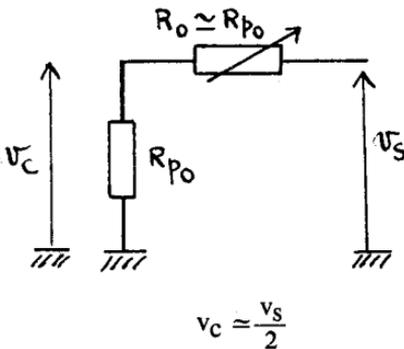
$$m < 0$$

Léger écrêtage sur l'alternance négative (légère dissymétrie entre saturation haute et basse).

Si  $m$  plus négatif  $\rightarrow$  écrêtage sur les 2 alternances.



$$m \rightarrow 0$$

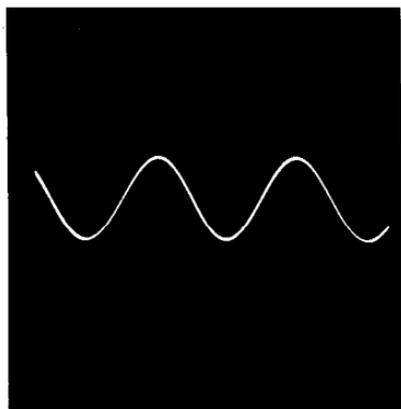
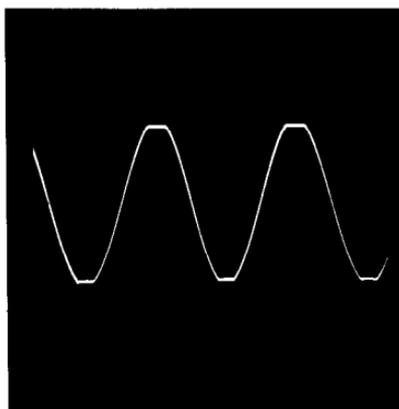
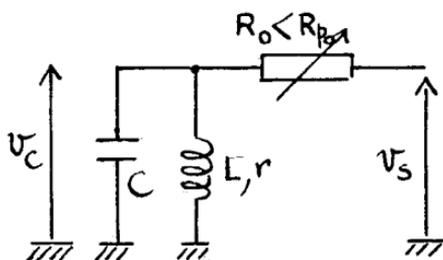


**Remarque :** chacun pourra constater que pour des valeurs de  $m$  pas trop fortement négatives, la tension  $v_c$  est déjà quasi-sinusoidale.

**Ceci s'explique :** (sélectivité déjà évoquée pour le circuit RLC série). Le circuit extérieur associé à l'A.op se comporte comme un filtre (pulsation  $\omega'_{0}$ ).

### Exemple

- *Dipôle RLC parallèle*



Ainsi, une tension  $v_s$  pas trop déformée (fondamental + harmoniques) est filtrée par ce circuit, et on recueille aux bornes de  $C$  une fraction (1/2) du fondamental ; (si  $m$  devient très négatif cela devient impossible :  $v_s$  et  $v_c$  deviennent des oscillations de relaxation très marquées).

— Néanmoins, le réglage fin est nécessaire pour se placer à la forme optimum de  $v_c$ , condition qui permet aux résultats expérimentaux de confirmer les prévisions théoriques.

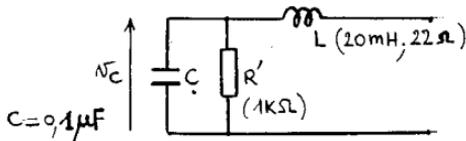
— Je me permets de penser que le lecteur a désormais à l'esprit la règle systématique de travail qui doit le conduire à coup sûr au résultat recherché, compte tenu bien entendu de la condition éventuelle d'existence de l'oscillation.

Afin de confirmer la méthode du choix du N.I.C. il me semble intéressant de proposer un autre exemple.

## 6. APPLICATION À UN CIRCUIT RLC MIXTE

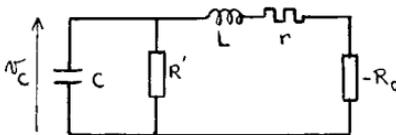
### 6.1. Circuit RLC mixte

Nous partons encore d'un circuit susceptible d'osciller.



Ayant retenu la même bobine et le même condensateur que précédemment, j'ai choisi pour  $R'$  une valeur assurant l'existence de l'oscillation (voir plus loin).

### 6.2. Association Dipôle - N.I.C.



fonctionnement linéaire de l'A.op ;  
réseau linéaire

Équation de fonctionnement en régime quelconque :

$$\frac{d^2 v_C}{dt^2} + \left( \frac{1}{R'C} - \frac{R_0 - r}{L} \right) \cdot \frac{dv_C}{dt} + \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{R_0 - r}{R'} \right) \cdot v_C = 0$$

Par identification à la forme générale

il vient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0'^2 = \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{R_0 - r}{R'} \right) \\ 2m\omega_0' = \frac{1}{R'C} - \frac{R_0 - r}{L} \end{array} \right.$$

L'oscillation entretenue sera obtenue pour :

$$m = 0 \rightarrow \frac{1}{R'C} = \frac{R_0 - r}{L} \quad \text{Soit} \quad \boxed{R_0 = \frac{L}{R'C} + r}$$

Sa pulsation sera  $\omega'_0$  telle que  $\omega'^2_0 = \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{L}{R'^2C} \right)$

En se reportant à l'équation différentielle on constate que

$$m > 0 \quad \text{pour} \quad R_0 < \frac{L}{R'C} + r$$

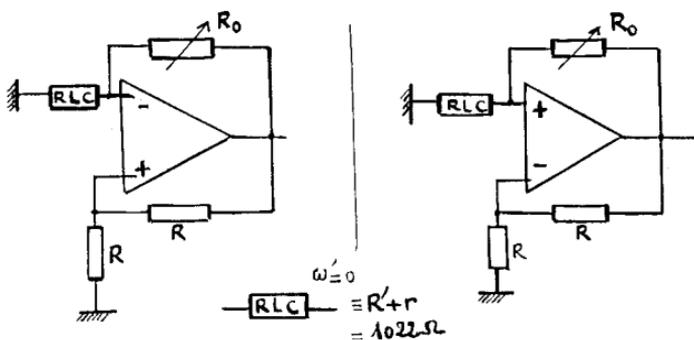
$$m < 0 \quad \text{pour} \quad R_0 > \frac{L}{R'C} + r$$

d'où le processus de réglage

On vérifie tout d'abord que pour  $m \geq 0 \rightarrow v_c = 0$  et  $v_s = 0$ . On règle alors  $R_0 < \frac{L}{R'C} + r$  ; l'amorçage et les oscillations étant obtenus, on se ramène à la limite  $m \rightarrow 0$  ( $m \leq 0$ ) par  $R_0 \rightarrow \frac{L}{R'C} + r$  pour obtenir les oscillations quasi-sinusoidales.

### 6.3. Choix du dipôle actif

Il faut donc que pour  $\omega' = 0 \rightarrow \text{TCR} > \text{TR}$ .



$$\text{TR} = \frac{1}{2}$$

$$\text{TCR} = \frac{R' + r}{R' + r + R_0} > \frac{1}{2}$$

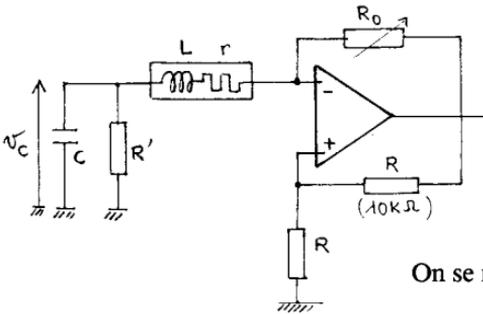
fonctionnement linéaire possible

$$\text{TCR} = \frac{1}{2}$$

$$\text{TR} = \frac{R' + r}{R' + r + R_0} > \frac{1}{2}$$

fonctionnement linéaire impossible

## 6.4. Réalisation expérimentale



## • Valeurs calculées

$$R_0 = 222 \Omega$$

$$f'_0 = 3,18 \text{ kHz}$$

## • Réglage

Départ à  $R_0 = 200 \Omega$   
soit  $m > 0$  pour vérifier  
que  $v_c = 0$  et  $v_s = 0$ .

On se ramène ensuite à  $m \rightarrow 0$  ( $m \leq 0$ ).

$$v_c \text{ quasi-sinusoidale pour } \begin{cases} R_0 = 218 \Omega \\ f_0 = 3,2 \text{ kHz} \end{cases}$$

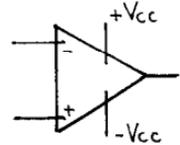
## 6.5. Existence des oscillations

$$\omega'^2 = \frac{1}{LC} \left( 1 - \frac{L}{R'^2 C} \right)$$

$$\omega'_0 \text{ existe si } 1 - \frac{L}{R'^2 C} > 0 \text{ soit } \frac{L}{R'^2 C} < 1 \rightarrow R'^2 > \frac{L}{C} \rightarrow R' > \sqrt{\frac{L}{C}}$$

d'où le choix de  $R'$  compte tenu des valeurs de  $L$  et  $C$ .

— Dans toutes ces expériences, l'A.op utilisé est un A.op à double alimentation ( $+V_{CC}$  ;  $-V_{CC}$ ) afin de permettre une excursion symétrique du signal.



Il ne faut jamais perdre de vue que c'est cette alimentation ( $+V_{CC}$  ;  $-V_{CC}$ ) qui fournit l'énergie nécessaire à l'entretien des oscillations.

### 6.6. Matériel et montages oscillographiques

Le matériel nécessaire est tout-à-fait banal.

- **Bobines :**

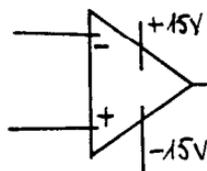
Petites bobines de téléphonie (encombrement réduit) à pot de ferrite ou à noyau de fer.

- **Condensateur :**

De bonne qualité (au polyester par exemple) ; plusieurs valeurs à envisager afin de changer de fréquence d'oscillation ; (pourquoi pas une boîte de capa. étalon classique).

- **A.op :**

A priori tout A.op à stabilité inconditionnelle du type  $\mu A$  741 ou similaire, à double alimentation  $\pm 15$  V.



– Les 2 résistances R de réaction (ou de CR) devront être bien appairées ; prendre par exemple R de 2,2 k $\Omega$  à 10 k $\Omega$ .

–  $R_0$  doit être une résistance étalon variable de bonne qualité ; il est souhaitable qu'elle soit finement variable, car les réglages sont pointus.

- **Appareils de mesures :**

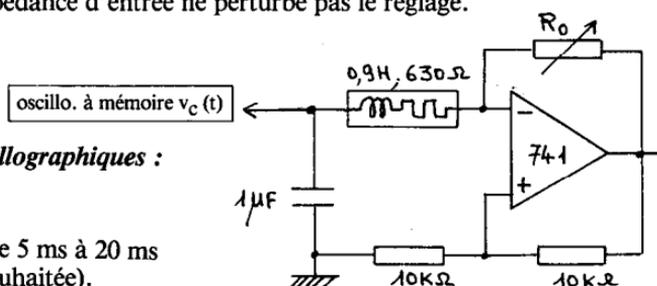
OSCILLO. bicourbe classique (un oscillo. à mémoire n'est indispensable que pour visualiser l'amorçage).

**Remarque :** si vous avez la chance de pouvoir utiliser un fréquence-mètre pour mesurer  $f_0$ , placez le plutôt en sortie d'A.op et non sur  $v_C$  pour que son impédance d'entrée ne perturbe pas le réglage.

- **Montages oscillographiques :**

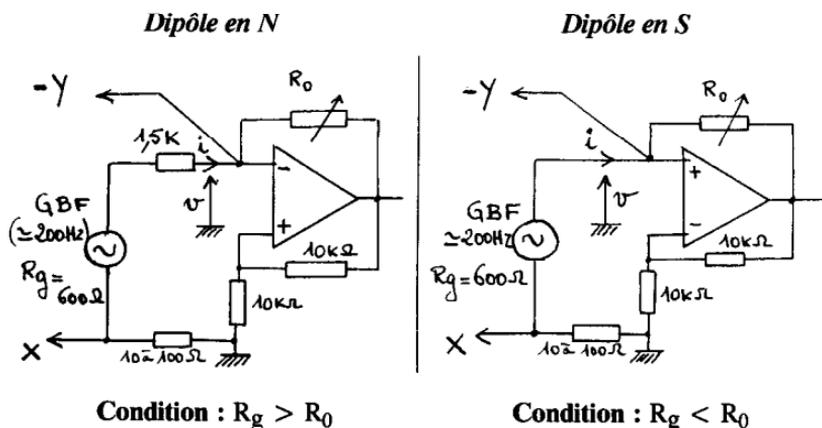
#### Amorçage

(Base de temps de 5 ms à 20 ms selon la partie souhaitée).



L'amorçage a été obtenu par variation discontinue de  $R_0$  : passage de  $600 \Omega$  à  $700 \Omega$ .

- **Caractéristiques** :  $v = f(i)$



Dans les deux cas  $R_0$  a été réglée à  $1,4 \text{ k}\Omega$ .

**Important** : le Générateur BF doit être à sorties symétriques (ou symétrisées).

## 7. BIBLIOGRAPHIE : Documents intéressants

- **Document général** : Éditions J.B. Baillière

[1] Circuits électriques et électroniques - par : R. BEAUVILLAIN, H. GIÉ, J.P. SARMAnt.

Stabilité de l'A.op (Tome 1 - p. 263 exercice corrigé).

Stabilité des systèmes bouclés (Tome 2 - p. 165).

- **Documents spécifiques** :

[2] Article B.U.P. n° 691 (p. 209 à 239).

[3] Article B.U.P. n° 628 (p. 211 à 231).