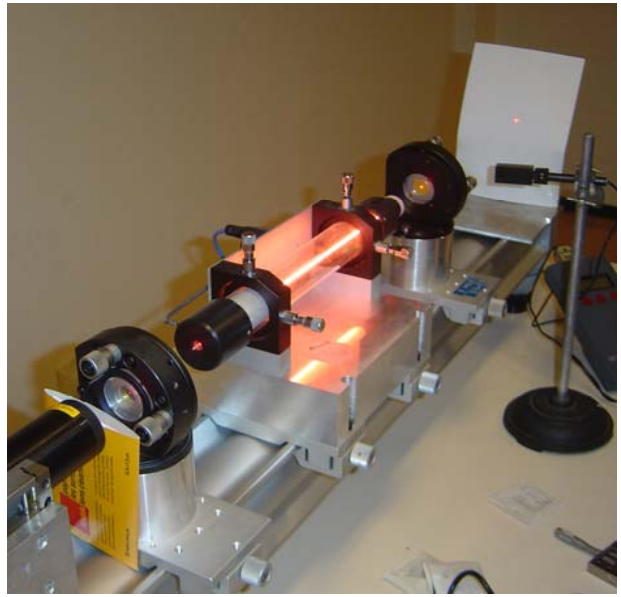
Dynamique des lasers: passé et présent

Thomas Erneux
Université Libre de Bruxelles
Optique Nonlinéaire Théorique

1. Historique
2. ABC de la dynamique des lasers
3. L’équation d’Adler: synchronisation, accrochage, brisure de rythme
4. Applications: injection optique – gyro laser
5. Feedback optique avec retard
6. L’équation d’Adler avec retard: bistabilité de régimes synchronisés
7. Applications: réactions chimiques et synchronisation de deux lasers
8. Oscillateurs avec retard: nouvelles applications et feedback opto-électronique

Laser: lumière monochromatique,
une seule longueur d'onde,
rayon étroit



Dates

- 1974 première application dans la vie courante: scanner code barre au supermarché
- 1978 le lecteur de disque laser
- 1982 le lecteur de CD suivi par les imprimantes lasers

Puissances

- Graveur de CD: 250 mW Sony SLD 253 VLC diode laser rouge (en/wikipedia.org/)
- Coupure et forage dans l'industrie 100 - 3000 W

Première apparition du laser au cinéma

1964 Goldfinger

projet AirBone Laser (ABL)

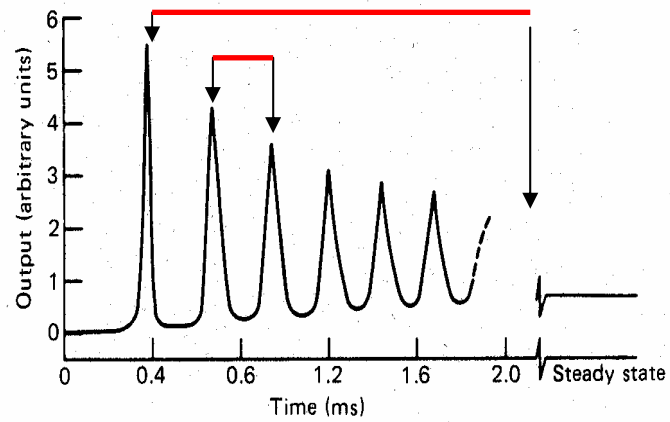
Laser chimique: Mega W
but: déstabiliser les missiles

Boeing 747-400F modifié

Premier test en vol prévu en 2008

1. Historique

Des pulsations d'intensité spontanées furent observées dès les premières études du laser (1960)



Experimental observation of damped relaxation oscillations in a ruby maser. (After STATZ and DEMARS [1960].)

Deux échelles de temps: période des oscillations + lent amortissement

1960-1964: première formulation d'équations cinétiques
début 1980: premières conférences sur les instabilités dynamiques
1980-1990: les laser à semiconducteurs

2. ABC

Idée: les instabilités du laser sont le résultat de propriétés matérielles globales et non du type de laser

Les équations cinétiques

$$\frac{dI}{dt} = I(-\kappa + N)$$

$$\frac{dN}{dt} = A - N(\gamma_{\parallel} + I)$$

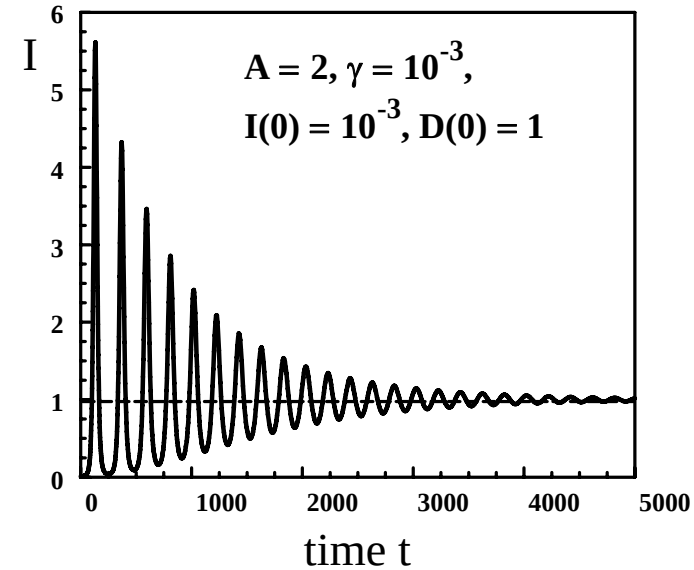
Laser	κ (s^{-1})	$\gamma_{\parallel}$ (s^{-1})
CO_2	10^8	$2.5\ 10^5$
État solide	10^6	$4\ 10^3$
semiconducteur	10^{12}	10^9

$$\gamma = \gamma_{\parallel}/\kappa = 10^{-3}$$

Equations cinétiques sans dimension

$$\frac{dI}{dt} = I(-1+D)$$

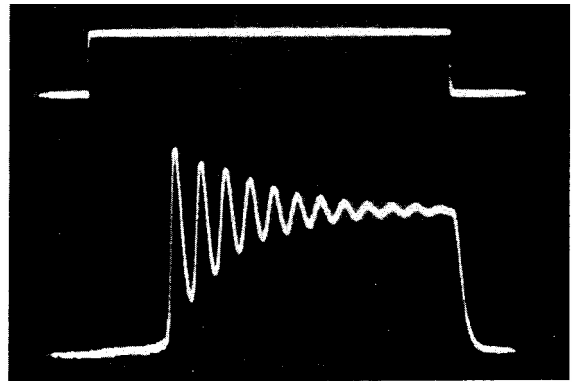
$$\frac{dD}{dt} = \gamma[A - D(1+I)]$$



Etats stationnaires et stabilité linéaire

$\gamma \to 0$

$$\omega_{RO} \approx \sqrt{\gamma(A-1)} \qquad \Gamma_{RO} \approx \frac{\gamma A}{2}$$

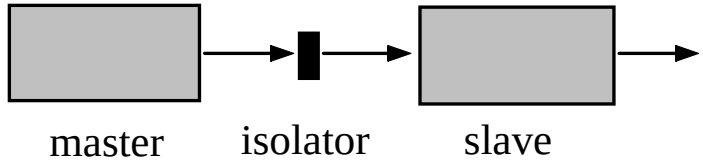


RO: Oscillations de relaxation inévitables

Le laser est faiblement stable

Problèmes clés

Laser soumis à un signal injecté



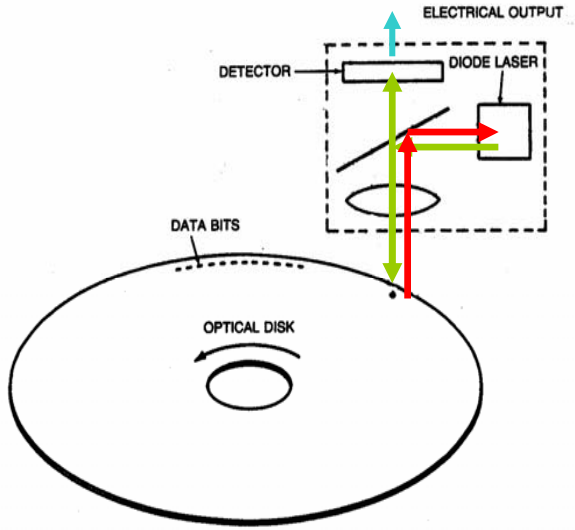
$$2\frac{dE}{dt} = E(-1+D) + \boxed{E_{in}\exp(i\Delta t)}$$

$$\frac{dD}{dt} = \gamma[A - D(1+|E|^2)]$$

Laser soumis à un feedback optique

$$2\frac{dE}{dt} = E(-1+D) + \boxed{\eta E(t-\tau)}$$

$$\frac{dD}{dt} = \gamma[A - D(1+|E|^2)]$$

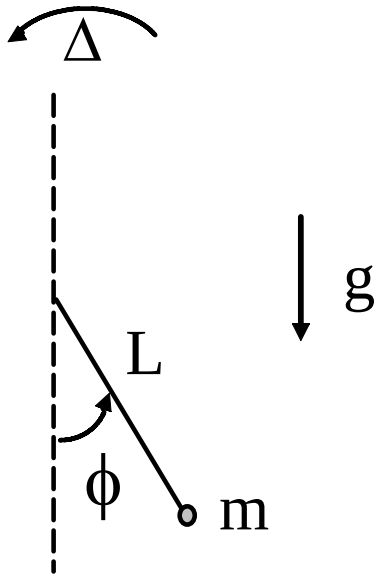


3. L'équation d'Adler

$$\phi' = \Delta - a\sin(\phi)$$

Apparaît en différents domaines de la physique

$$\cancel{mL^2}\phi'' + b\phi' + mgL\sin(\phi) = \Delta$$

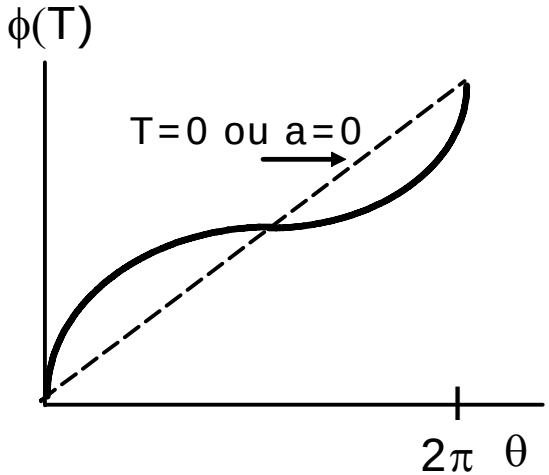


En biologie: courbe de changement de phase

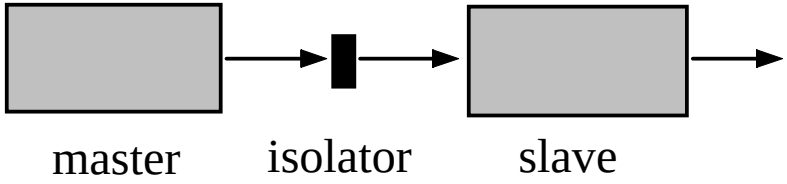
$$\phi' = \Delta - a\sin(\phi)$$

a = stimulus pendant une durée T

$\phi(0) = \theta$ que vaut $\phi(T)$?



Laser soumis à un signal injecté



$$laser \quad maitre : \omega_{in} \quad très \ stable$$

$$laser \quad esclave : \quad \omega_0 \quad peu \ stable$$

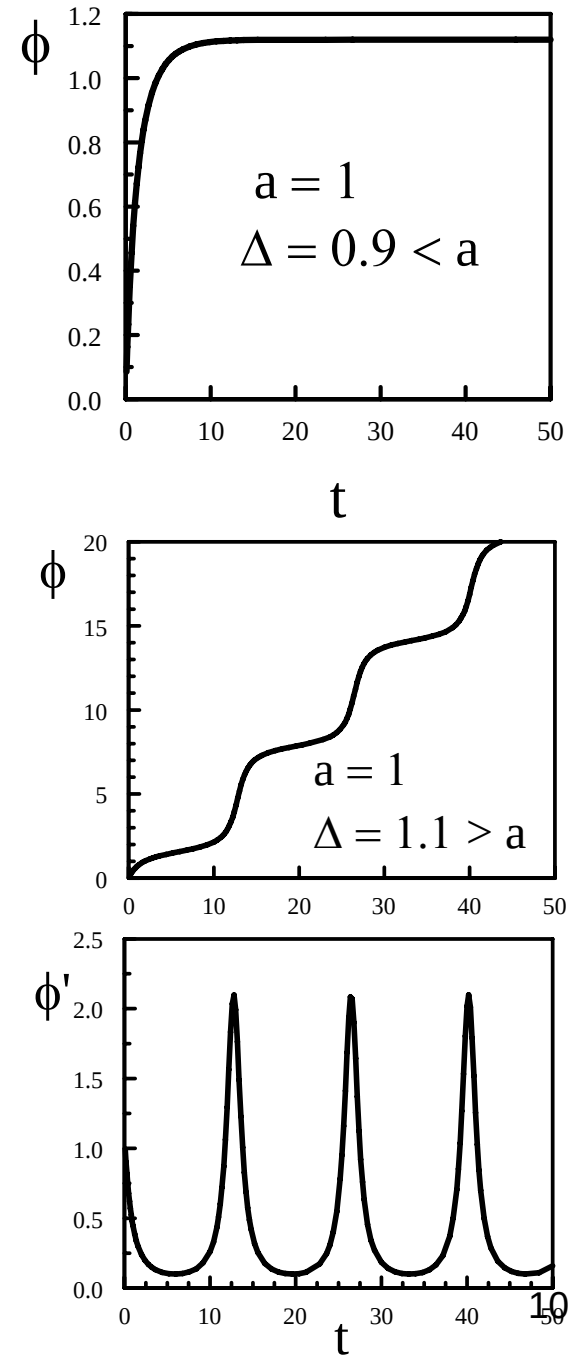
Un problème d'accrochage

Equation d'Adler

$$\phi' = \Delta - a\sin(\phi)$$

$$\Delta = \omega_{in} - \omega_0$$

$$a \propto puissance \quad injectée$$

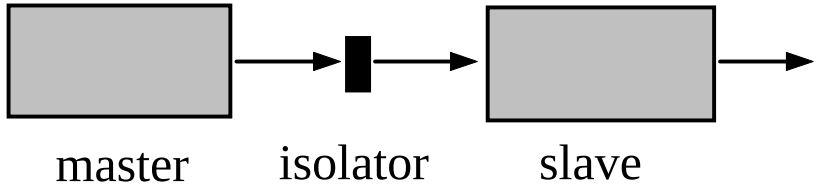


4. Applications

Laser soumis à un signal injecté

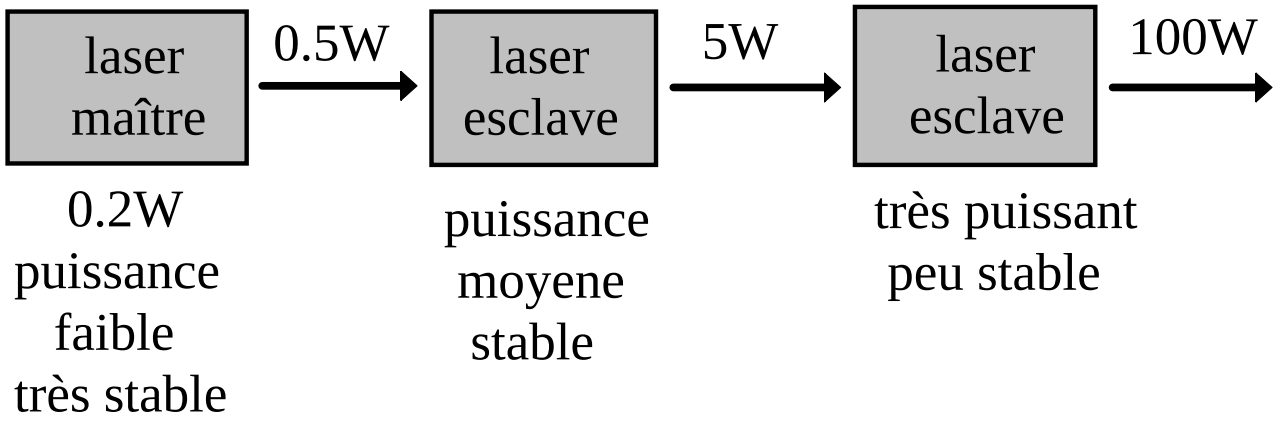
$$laser \quad maitre : \omega_{in} \quad très \ stable$$

$$laser \quad esclave : \quad \omega_0 \quad peu \ stable$$



Des lasers puissants sont recherchés pour les applications en métrologie de haute - précision

Fort demandés: interféromètres laser pour détecter des ondes gravitationnelles

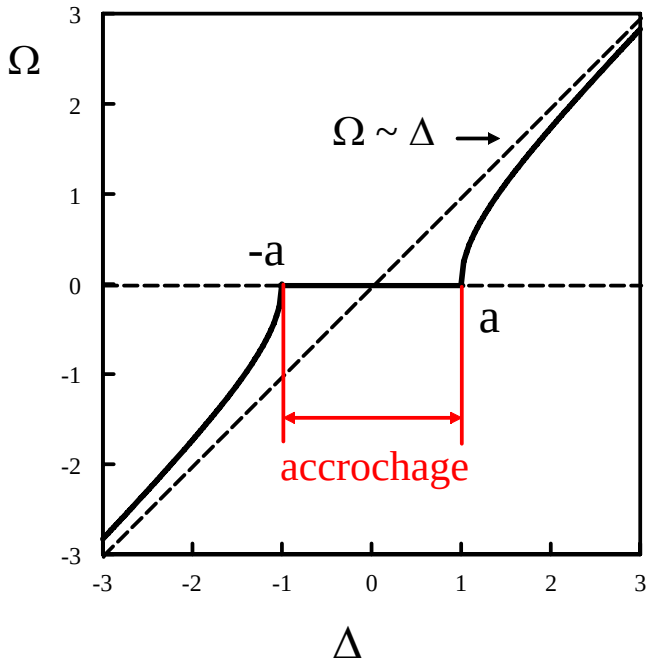


Ottaway et al Appl. Phys. B 71, 163 (2000)

$|\Delta|/a < 1$: $\phi' = 0$ –> accrochage

$|\Delta|/a > 1$: $\phi' = f(t)$ –> brisure de rythme

$$\Omega = \sqrt{\Delta^2 - a^2}$$



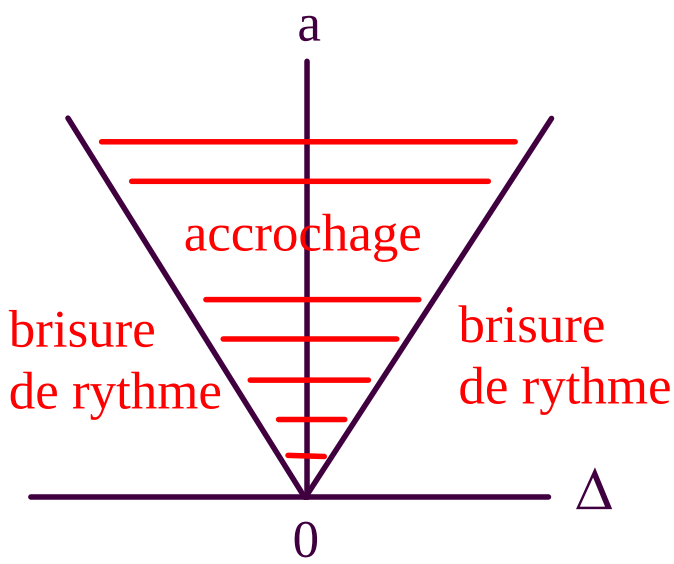
Et les oscillations de relaxation ?

Responsable d'instabilités

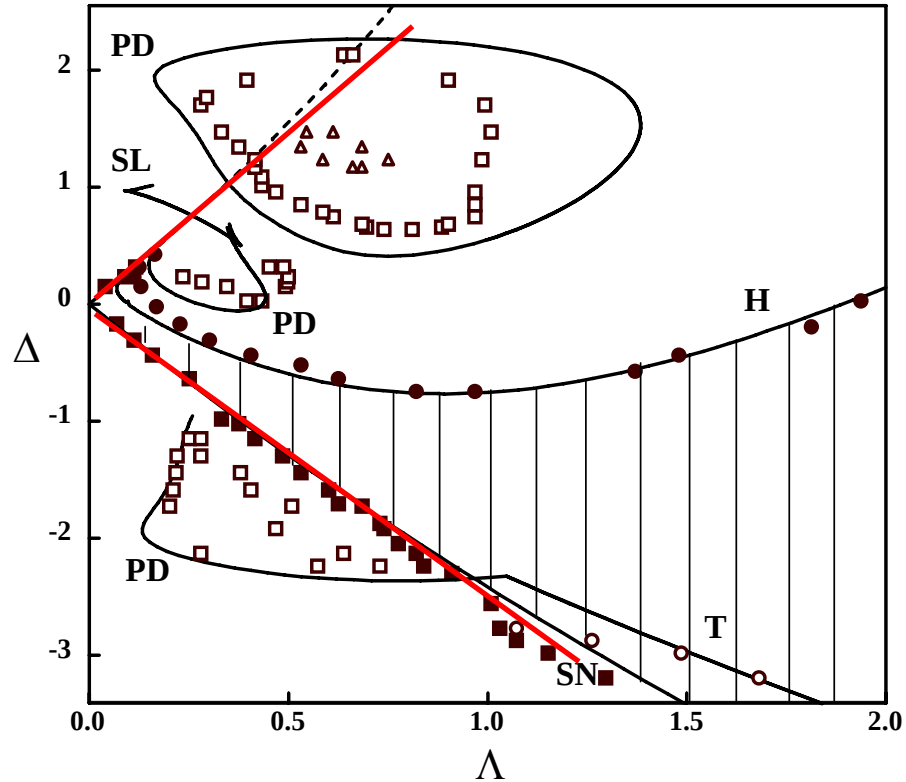
Ignorées jusqu'aux années 1980

Injection forte possible

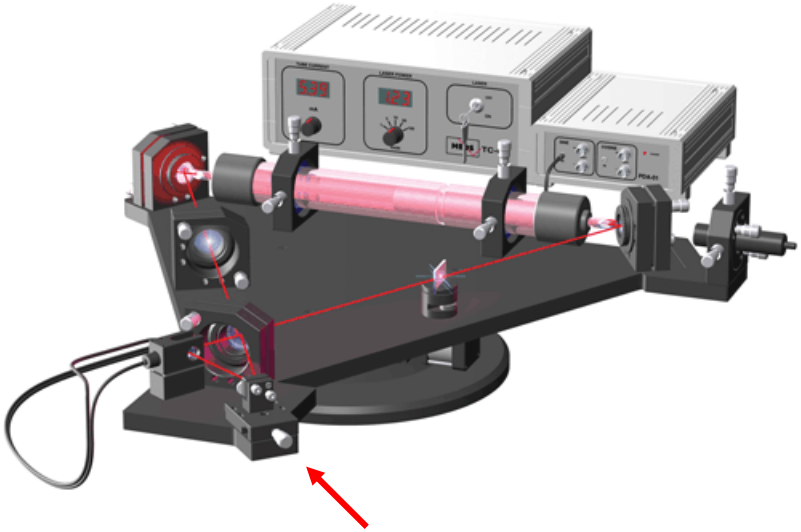
Simulations et diagramme de stabilité systématiques



Comparaisons quantitatives possibles (Pascal Besnard)



Wieczorek et al, Opt. Comm. 215, 125 (2003)
Simpson, Opt. Comm. 215, 135 (2003)



Gyroscope laser

Table tournante + laser

Utilisé par Airbus et Boeing

Haute précision, stabilité et durée de vie

portée: $\omega = 10^{-6} - 10^{3}\ \mathrm{deg/sec}$

résolution: 2 arc sec

Principe: dans un laser en anneau (3 miroirs + tube laser He-Ne), 2 ondes progressives se propagent dans des sens opposés.

Si le résonateur ne bouge pas, les deux ondes ont la même fréquence $f_1 = f_2$

Si le résonateur tourne avec une vitesse angulaire ω, ces fréquences changent comme

$$\boxed{|f_2 - f_1| = k\omega}$$

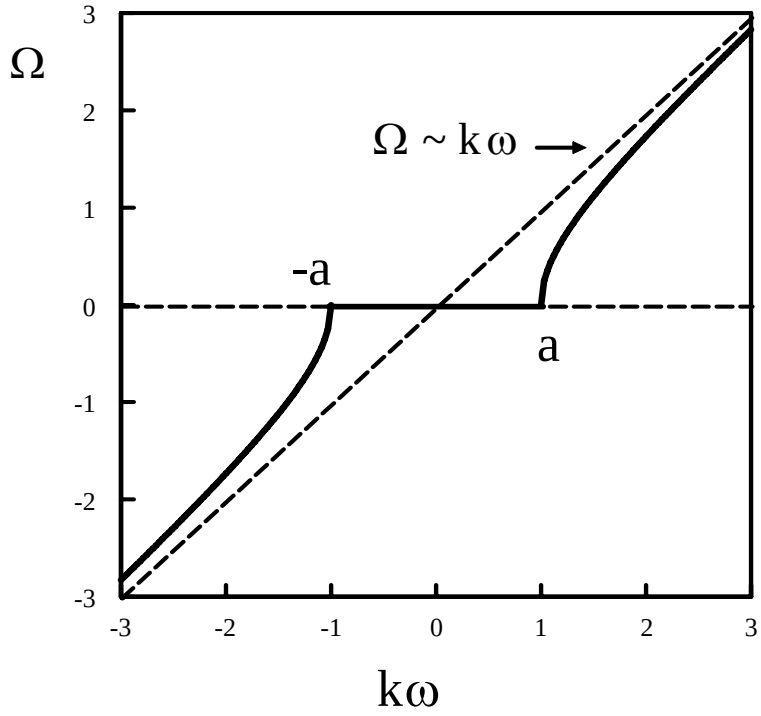
théorie

$$\phi' = k\omega - a\sin(\phi)$$

Fréquence d'Adler si kω > a

$$\Omega = \sqrt{(k\omega)^2 - a^2}$$

Comment réduire la zone d'accrochage ?



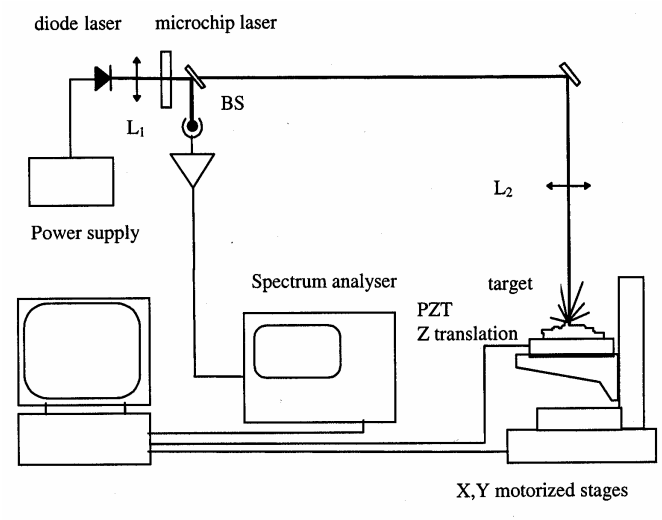
$$\phi' = k\omega - a\sin(\phi) + \boxed{b\sin(\sigma t)}$$

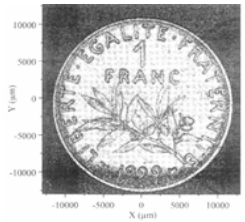
$$b \quad et \quad \sigma >> 1$$

5. Feedback optique

Imagerie par feedback optique

Eric Lacot Univ. Joseph Fourier à Grenoble





Lacot et al, Opt. Lett. 26, 1483 (2001)

Technique LFI: FO change l'état stationnaire du laser

Technique LOFI: FO change la fréquence des oscillation de relaxation

$$\frac{\Omega_{OF}-\Omega_{RO}}{\Omega_{RO}}=-\sqrt{R_{eff}}\,\gamma_c\frac{d}{c}$$

$\uparrow 10^2-10^3$

6. L'équation d'Adler avec retard

Beta et al, Phys. Rev. E, 046224 (2003)

Prés d'une bifurcation de Hopf et pour un feedback retardé très faible

$$X \approx X_0 + \varepsilon A \sin(\sigma t + \boxed{\phi(t)})$$

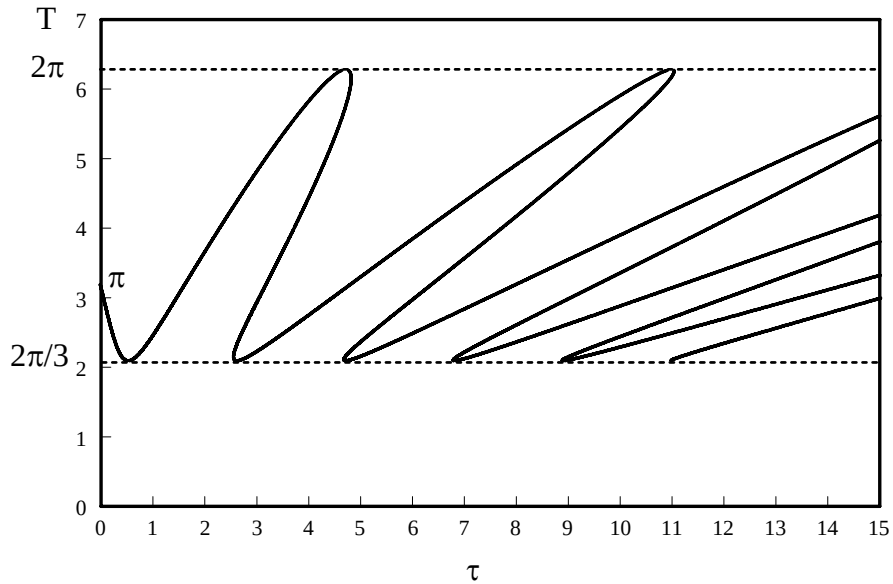
$$\phi' = \Delta - a \sin[\phi(t-\tau) - \phi]$$

$$Essaye:$$

$$\phi = \Omega t \rightarrow \Omega = \Delta + a \sin(\Omega \tau)$$

$$Représente:$$

$$T = 2\pi / \Omega(\tau)$$

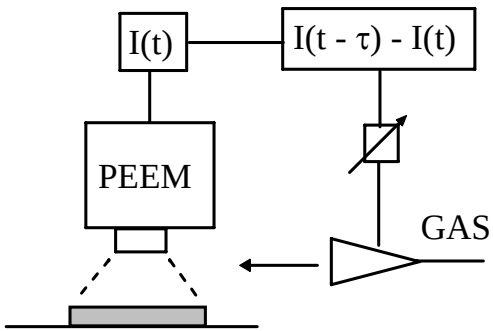


$\Delta = 2$ **a = -1**

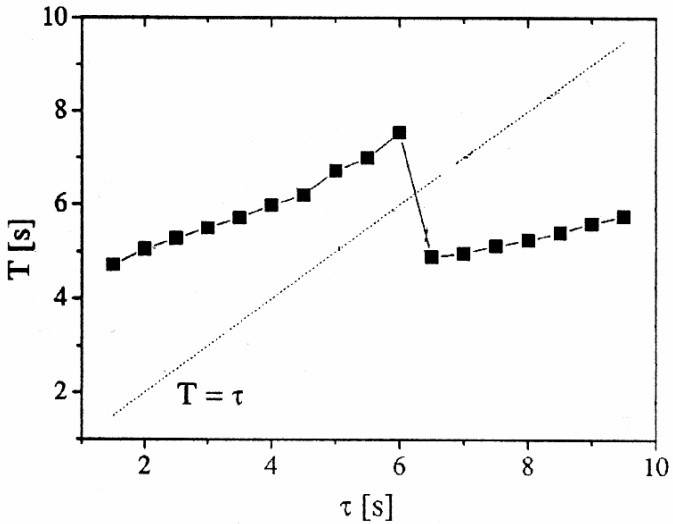
7. Applications

Oscillateurs chimiques

Oxydation catalytique du CO sur Platine **Beta et al, PRE 67, 046224 (2003)**



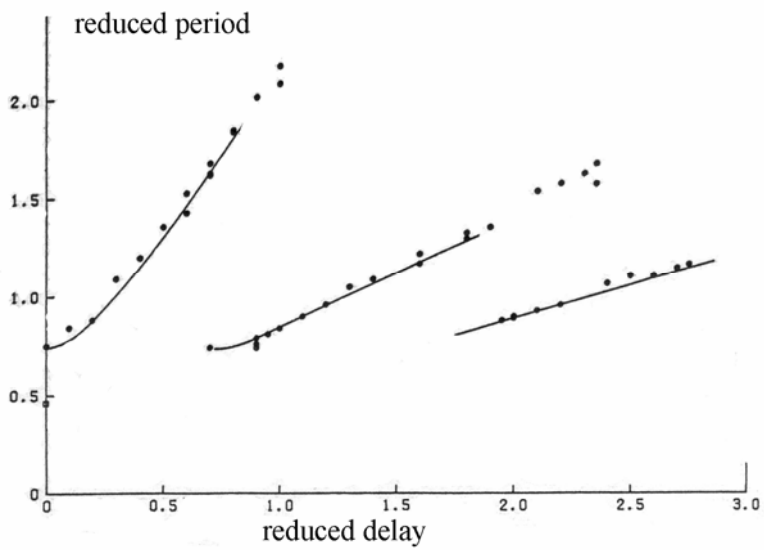
$$p_{CO} = p_{CO}^{0} + \beta[I(t-\tau) - I]$$



La période des oscillations homogènes en fct du retard

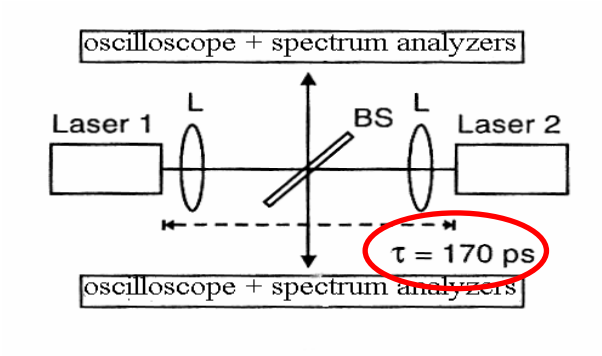
Oscillateur bromate minimal dans un CSTR **Weiner et al, J. Phys. C. 93, 2704 (1989)**

$$k = k_0 + \beta[C(t-\tau) - C_{av}]C_{av}^{-1}$$

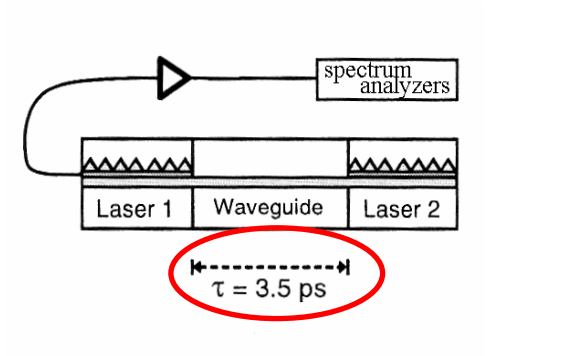


Un autre problème de synchronisation: deux lasers mutuellement injectés

Wünsche et al, Phys. Rev. Lett. 94, 163901 (2005)



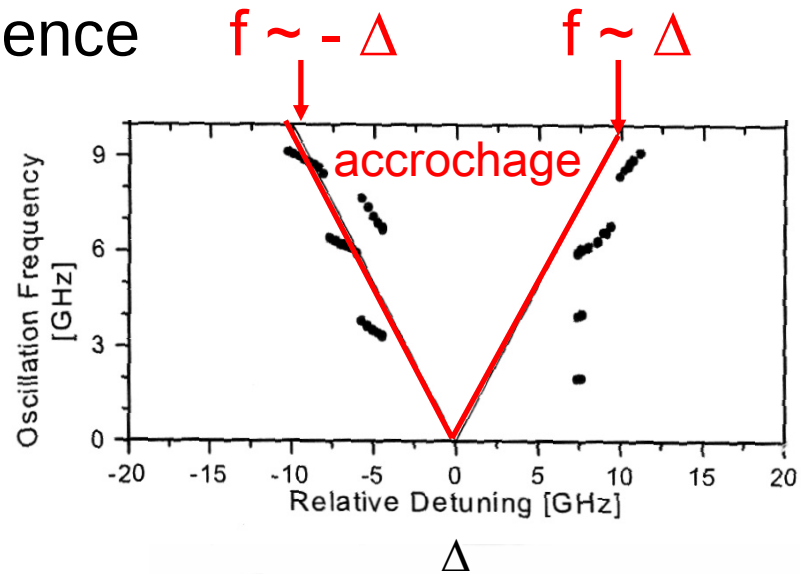
Darmstadt: espace libre entre les deux lasers



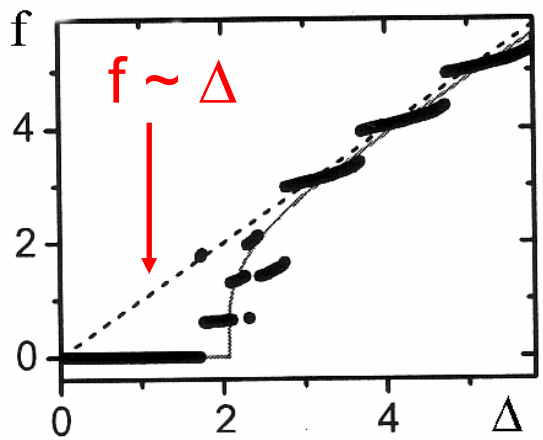
Berlin: deux lasers intégrés en tandem

Accrochage à une même fréquence optique

expériences



simulations



Modèle simple

$$\Phi' = \frac{\Delta}{2} - \kappa \sin(\Phi(t-\tau) + \Phi)$$

$\longrightarrow$ La fréquence <Φ> en fonction de Δ serpente

Les équations d'Adler avec retard

$$\phi' = \Delta - a\sin[\phi(t-\tau) - \phi]$$

$$\Phi' = \frac{\Delta}{2} - \kappa\sin(\Phi(t-\tau) + \Phi)$$

Synchronization

Adler: $\phi' = 0$ accrochage

$\phi'(t)$ fct parabolique continue de Δ

Adler avec retard: $\phi' = 0$ accrochage

$\phi'(t)$ fct bistable de τ

en palier de Δ

8. Oscillateurs avec retard

L'équation d'Adler à retard = équation pour une phase mesurant la synchronisation de deux oscillateurs

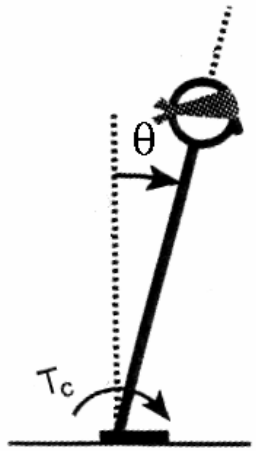
Math: solutions bornées ou non dans le temps

Les équations du second ordre pour des oscillateurs contrôlés par un retard

Contrôle de la position debout

$$I\theta'' = mgh\sin(\theta) + T_c(t)$$

$$T_c = a\theta(t-\tau) + b\theta(t-\tau)$$



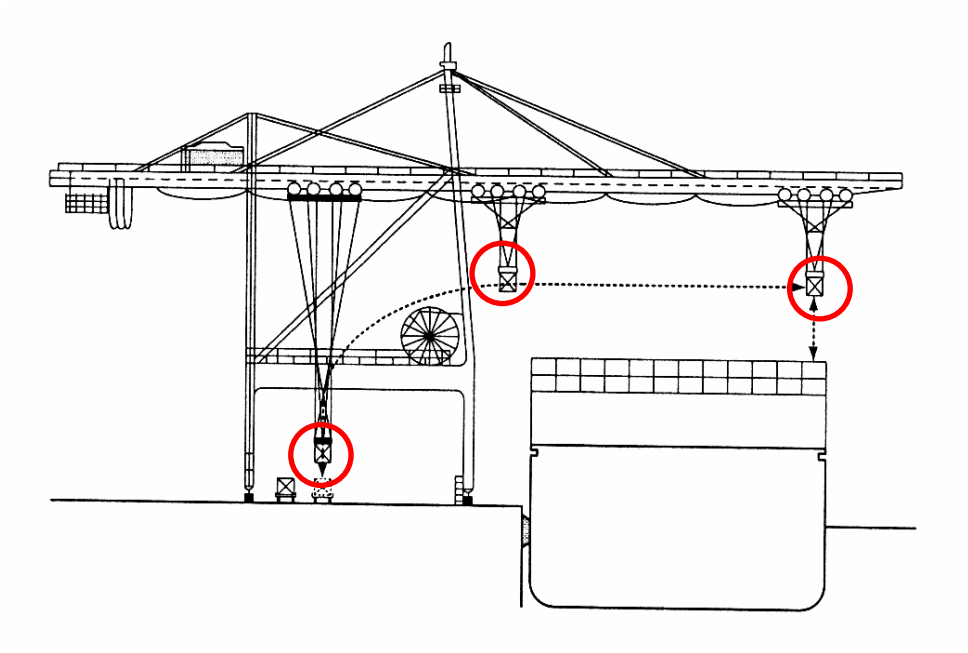
Bifurcation de Hopf f ~ 1 Hz

Grues pour containeurs

But: transporter le containeur rapidement

Besoin: contrôler le balancement

Idée: contrôle à retard Erneux and T. Kalmar-Nagy, J. Vib. & Control (2006)



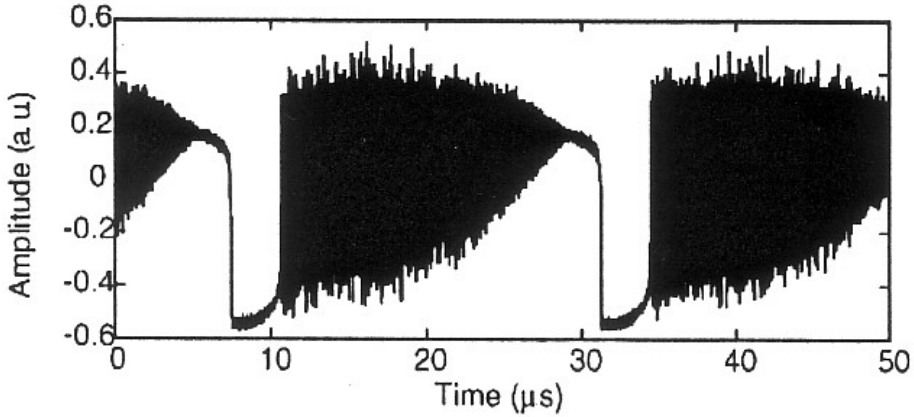
$$y'' + \varepsilon y' + \sin(y) = -k\cos(y)(y(t-\tau) - y)$$

Laser + feedback opto-électronique

Laurent Larger
Université de Franche-Comté Besançon, France

Kouomou et al, Phys. Rev. Lett. 95, 203903 (2005)

Oscillateurs à très haute fréquences



Nouveau type d'oscillations en rafale (parabolique – elliptique)

$$\tau x'' + x' + \frac{1}{\theta} x = \beta \boxed{\cos[2x(t-T)]x'(t-T)}$$

$\uparrow$ $\uparrow$ $\uparrow$ $\uparrow$

$25\,ps$ $5\mu s$ $30ns$

Résumé

1. **Dynamique de lasers et synchronisation**

Synchronisation: l'équation d'Adler, accrochage, rupture de rythme

Dynamique: oscillations de relaxation

L'interaction des deux: Pascal Besnard et l'injection optique

2. **Feedback optique:** stabiliser, déstabiliser, détecter (Eric Lacot et l'imagerie)

3. **La synchronisation avec retard** (Laurent Larger) Des équations de la famille d'Adler avec retard: bistabilité, accrochages partiels

4. **Oscillateurs avec retard**: oscillations à multiple échelles