« Les sonochimistes sont des gens qui font des plasmas sans s'en rendre compte. »

Gérard Henrion, IJL, Nancy, 07/2018

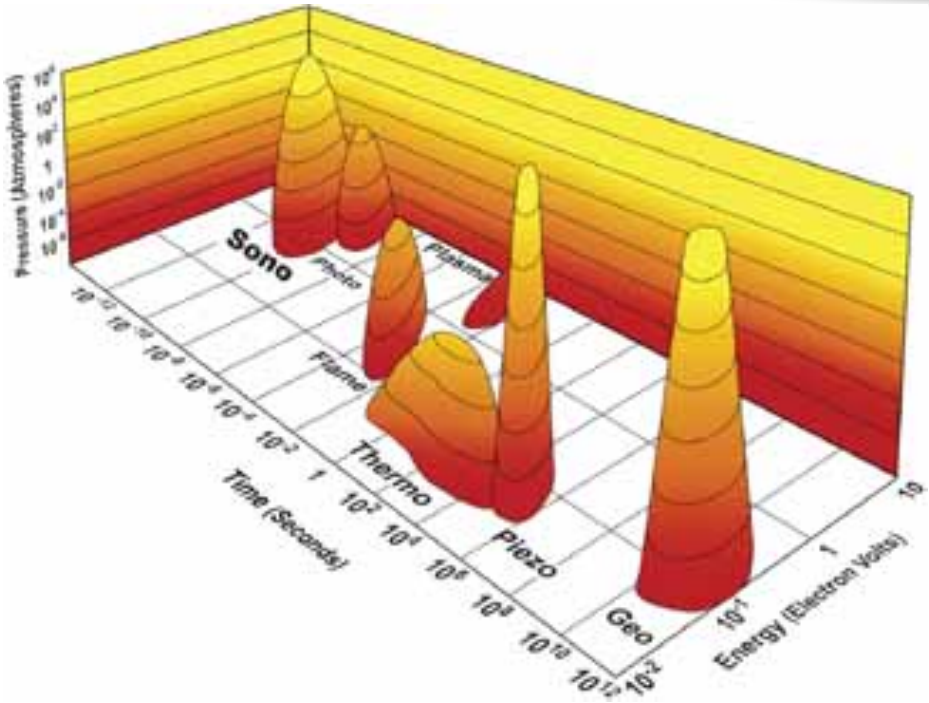
Communauté des sonochimistes & CNRS :

Section 13 de l'INC : Chimie physique, théorique et analytique

Section 14 de l'INC : Chimie de coordination, catalyse, interfaces et procédés

Section 10 de l'INSIS: Milieux fluides et réactifs : transports, transferts, procédés de transformation

Sonochimie



Sonochimie : chimie sous haute énergie, hautes pression et température pendant de courts instants

Sous US, nucléation & croissance de bulles de cavitation acoustique
Implosion violente, compression rapide du gaz : formation d'un **plasma**

2 écoles:

- Formation d'un point chaud lors de l'implosion violente (chauffage adiabatique, onde de choc…)
- Charge sur la surface des bulles, et claquage

Suslick, *Science* (1990)

Plan

- ICSM/LSFC
- Aperçu de l'histoire de la sonochimie
- Dynamique des bulles de cavitation et concentration de l'énergie
- Sonochimie et sonoluminescence
- Quelques exemples d'application

L'Institut de Chimie Séparative de Marcoule
ICSM UMR 5257

- Création : janvier 2007
- Lieu : Marcoule, Bagnols-sur-Cèze (30)
- Statut juridique : UMR CEA, CNRS, UM, ENSCM
- Objectif : développer de nouvelles techniques de séparation pour le nucléaire du futur ou le recyclage
- Directeur : Stéphane PELLET-ROSTAING
- Effectifs : 46 permanents + ≈50 non-permanents

Institut de Chimie Séparative de Marcoule

SÉPARER, TRIER ET RECYCLER

chimie séparative, afin d'économiser les ressources et recycler les matières valorisables (métaux stratégiques)

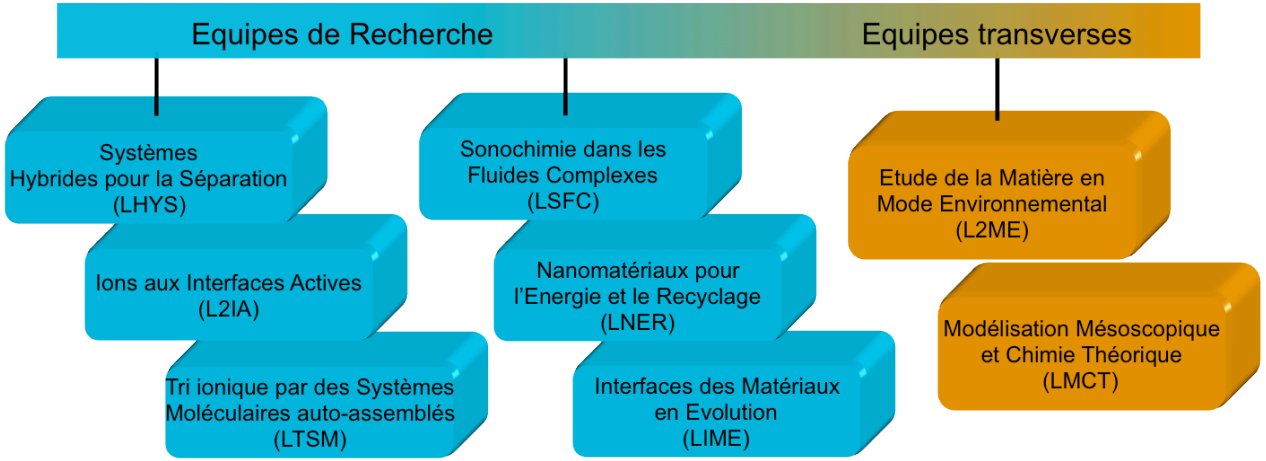
RECHERCHE FONDAMENTALE EN CHIMIE ET PHYSICO-CHIMIE

pour un nucléaire durable

pour les énergies décarbonées

CONCEVOIR ET OPTIMISER DES MATÉRIAUX POUR ANTICIPER LES CYCLES DU FUTUR

chimie séparative, afin d'économiser les ressources



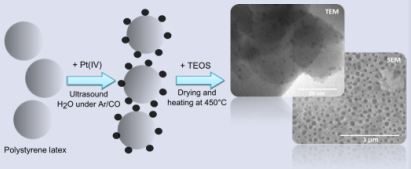
LSFC: Sonochimie dans les Fluides Complexes

4 permanents:
- **Sergueï NIKITENKO (DR CNRS)**
- Tony CHAVE (CR CNRS)
- Rachel PFLIEGER (chercheur CEA/DEN)
- Matthieu VIROT (chercheur CEA/DEN)

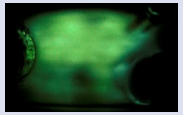
3 thésards, n stagiaires

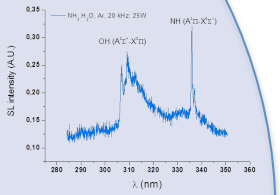
- ➢ études fondamentales sur les mécanismes des réactions sonochimiques en solutions homogènes et dans des systèmes hétérogènes
- ➢ pour partie, en lien avec le nucléaire

Synthèse de nanoparticules et sonocatalyse



Sono-luminescence et sonochimie fondamentale

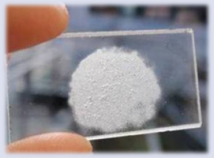




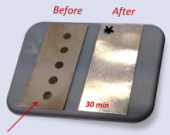
Sonochimie des actinides

Dissolution de PuO_2
Colloïdes de Pu

Sonochimie aux interfaces



Erosion
Décontamination



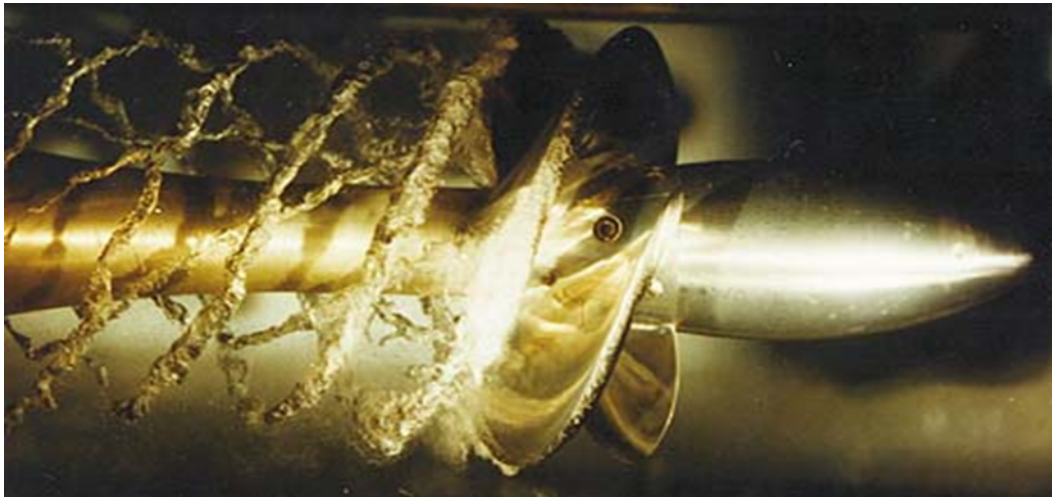
Un peu d'histoire

Cavitation

L'origine de l'activité sonochimique est la cavitation acoustique.

Phénomène de cavitation décrit par Thornycroft et Barnaby en 1895:

« Abnormal vibrations of the helix of their submarine were due to large bubbles caused by the movement of the blades and that were imploding under water pressure. »



Érosion rapide des hélices de sous-marins

Cavitation hydrodynamique : formation de bulles (air + vapeur d'eau)

leur effondrement provoque de forts gradients locaux de T, p.

J.Thornycroft and S.W.Barnaby, "Torpedo boat destroyers", Proc.Inst.Civil.Engineers (1895) **122**, 51

Activité sonochimique
17 kHz - 1 MHz

Les effets chimiques des ultrasons (US) sont connus depuis la fin des années 1920

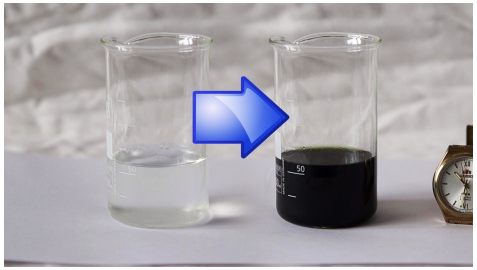
1927 : Richards et Loomis [1] rapportent l'accélération de réactions chimiques sous US

- hydrolyse du diméthylsulfate

$$(CH_3O)_2SO_2 + 2\ H_2O \rightarrow H_2SO_4 + 2\ CH_3OH$$

- réduction de l'iodate de potassium par l'acide sulfureux

$$IO_3^- + 3\ HSO_3^- \rightarrow I^- + 3\ HSO_4^-$$
$$IO_3^- + 5\ I^- + 6\ H^+ \rightarrow 3\ I_2 + 3\ H_2O$$
$$I_2 + HSO_3^- + H_2O \rightarrow 2\ I^- + HSO_4^- + 2\ H^+$$



1929 : Schmitt et al. [2] décrivent la sonolyse de l'eau et la formation de radicaux H et OH·

$$H_2O\ )))\rightarrow H + OH^{\cdot}$$

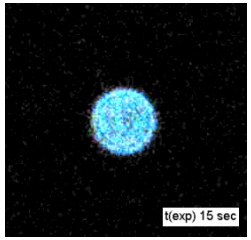
[1] W.T. Richards, A.L. Loomis, The chemical effects of high frequency sound waves. I. A preliminary survey, J. Am. Chem. Soc., 49 (1927) 3086-3100.

[2] F.O. Schmitt, C.H. Johnson, O. A.R., Oxidation promoted by ultrasonic radiation, J. Am. Chem. Soc., 51 (1929) 370-375.

1933 : découverte de la sonoluminescence

- Marinesco et Trillat (1933) : soumise à des US, une plaque photographique se brouille
- Frenzel et Schultes (1934) observent en parallèle une faible luminescence ; c'est elle qui brouille la plaque photo
- Nombreuses mesures (PMT…) : flashs lumineux, cycliques, dépendant de la fréquence etc. Mais mesures moyennes…
- **Révolution** en 1962 (Yosioka et Omura) - 1970 (Temple) – 1990 (Gaitan et Crum) : découverte de la **SL monobulle (SBSL)**

Crum, 1994

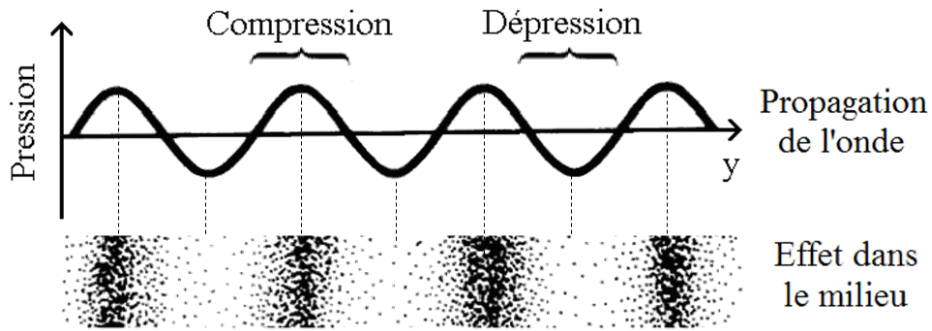


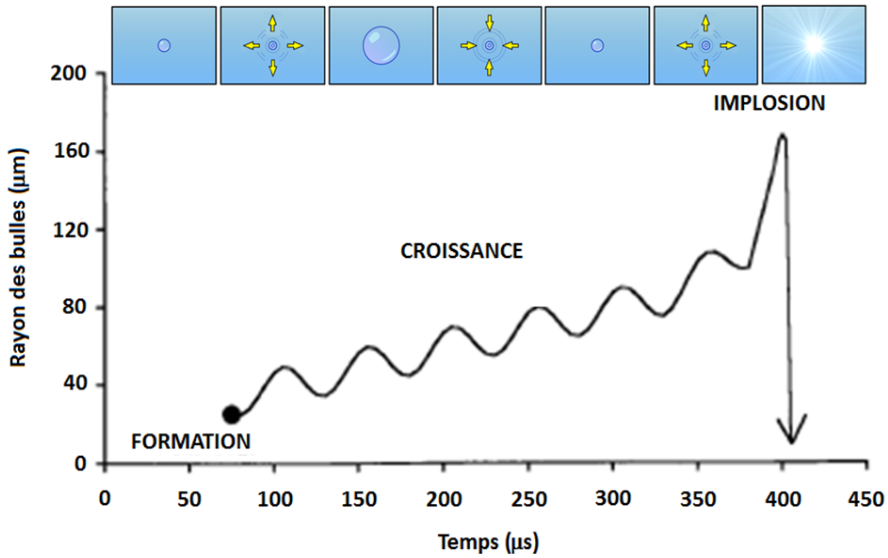
SBSL: possibilité de mesurer la dynamique, l'émission de lumière etc.

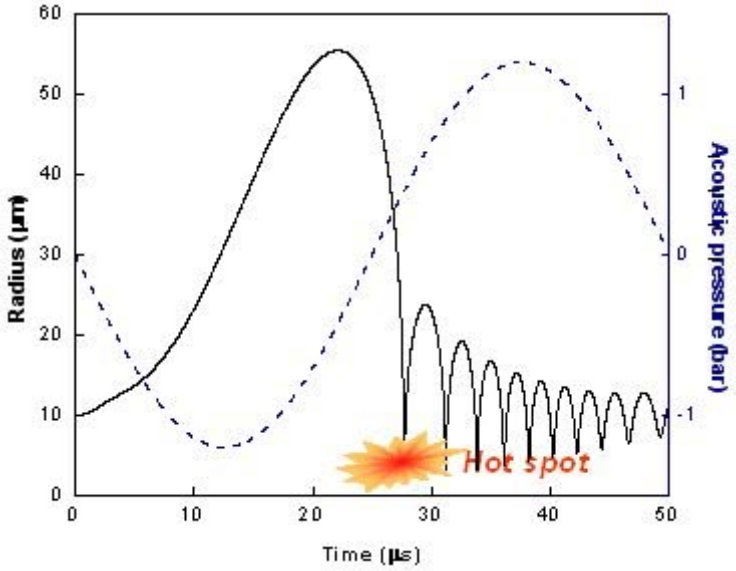
SL : au total, plus de 15 théories ont émergé, pour la plupart mises en défaut aujourd'hui.

Dynamique des bulles de cavitation

Vie et mort d'une bulle de cavitation







Pression dans une bulle

$$p_{in} = p_{gaz} + p_{vapeur}$$

Bulle immobile :

$$p_{in} = p_{liq} + 2\sigma/R$$

Pression dans la bulle

Pression du liquide à l'interface de la bulle

Pression de Laplace

σ: tension de surface

R: rayon de la bulle

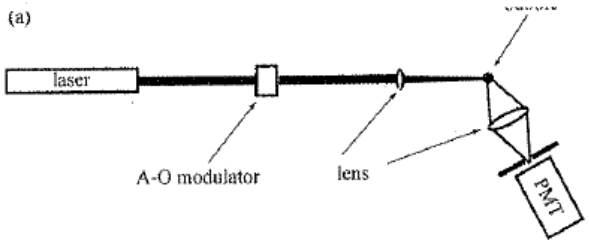
Interface de la bulle en mouvement :

$$p_{in} = p_{liq} + 2\sigma/R + 4\mu R/R$$

Effet de la viscosité du fluide

Sous US: $\boldsymbol{p_{liq} = p_{hydrostatique} + p_{acoustique}}$

Dynamique des bulles



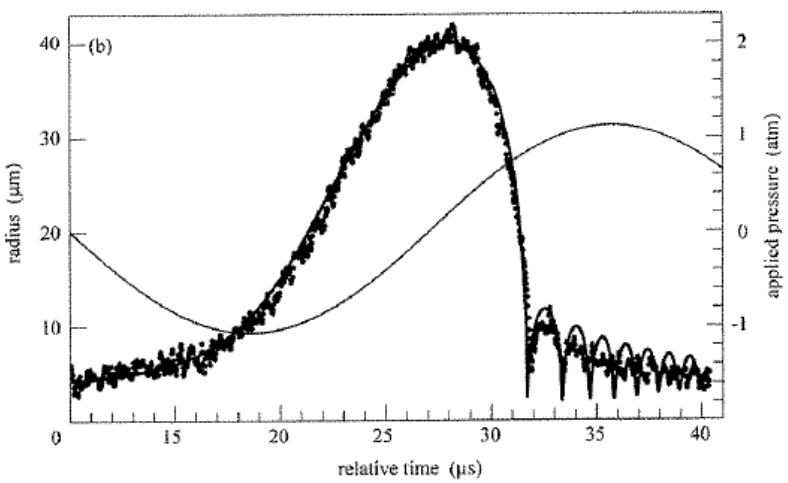


Figure 3.12 (a) Light-scattering technique for measuring the radial oscillations of a sonoluminescence bubble. (b) Instantaneous scattered intensity collected from a pulsating bubble. In the geometrical optics limit, the scattered intensity is proportional to the square of the bubble radius. The normalized drive pressure is shown as well. The data (non-averaged) fit nicely with the Keller–Miksis nonlinear bubble-dynamics equation (Keller and Miksis (1980)). Reproduced with permission from Matula (1999) *Phil Trans Roy Soc Lond A* **357**, 225.

Équation de Rayleigh-Plesset

$$RR + 3/2\ R^2 = 1/\rho\ [(p_h - p_v + 2\sigma/R_0)(R_0/R)^{3\gamma} - 2\sigma/R - 4\mu R/R + p_v - p_h - p_a]$$

ρ - densité du solvant

R – rayon de la bulle

p_h – pression hydrostatique

p_a – pression acoustique

p_v – pression de vapeur

$\gamma = C_p/C_v$

σ – tension de surface

Équation améliorée pour prendre en compte compressibilité du fluide…: équation de Keller-Miksis

Formation d'un « point chaud »

Hypothèse usuelle : chauffage quasi-adiabatique du contenu des bulles lors de leur effondrement

$$T_{max} = T_0 \, (p_h + p_a)^{(\gamma-1)/p_0} = T_0 \, (V_{max}/V_0)^{\gamma-1}$$

$$p_{max} = p_0 \, ((p_h + p_a)^{(\gamma-1)/p_0})^{\gamma/\gamma-1} = p_0 \, (V_{max}/V_0)^{\gamma}$$

$\gamma = C_p/C_v$, p_0 pression initiale dans la bulle, T_0 température initiale dans la bulle, p_h+p_a pression ressentie, V_{max} (V_0) volume maximal (d'équilibre) de la bulle

Ex: bulle d'azote dans l'eau à T_{amb}, p_{atm}

T_{max} = 4200 K

P_{max} = 975 atm

Gaz rare : $\gamma=5/3$
Gaz diatomique : $\gamma=7/5$

+ excitations & réactions chimiques

→ **T, p plus élevées pour les gaz rares**

B.E.Noltingk, E.A.Neppiras, Proc. Phys. Soc. B, 63B (1950) 674, 64B (1951) 1032

Réalité plus complexe

- Interaction entre les bulles
- Déformation
- Injection de gouttelettes de liquide
- Coalescence
- Fragmentation

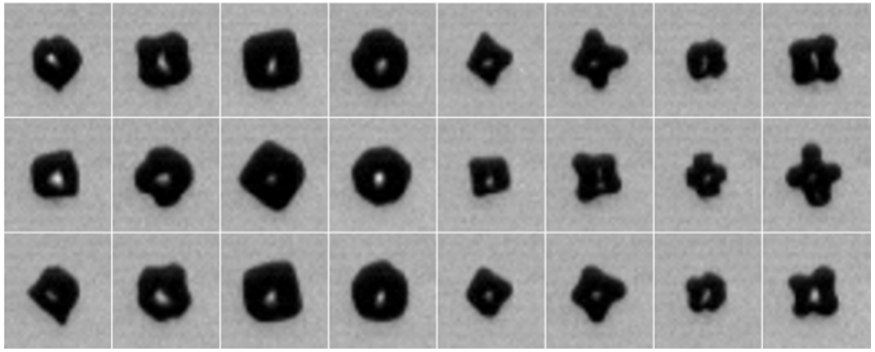
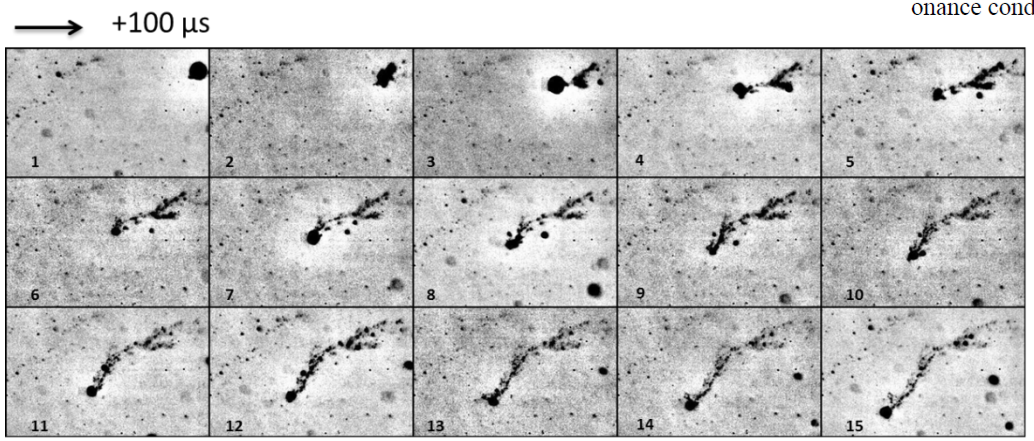


Fig. 1.7: Surface modes of a bubble moderately driven at 18 kHz in partly degassed water. Frames from left to right and top row to bottom row, frame height is about 500 µm, and the mean bubble radius is about 110 µm. Interframe time is 6.7 µs, and roughly the 8 frames of a row correspond to one acoustic driving period. Clearly modal oscillations of n=4 are visible with some addition of n=3, and the bubble size indeed falls close to the resonance condition for the 4th mode stated in the text (image C. Cairós and A. Troia).

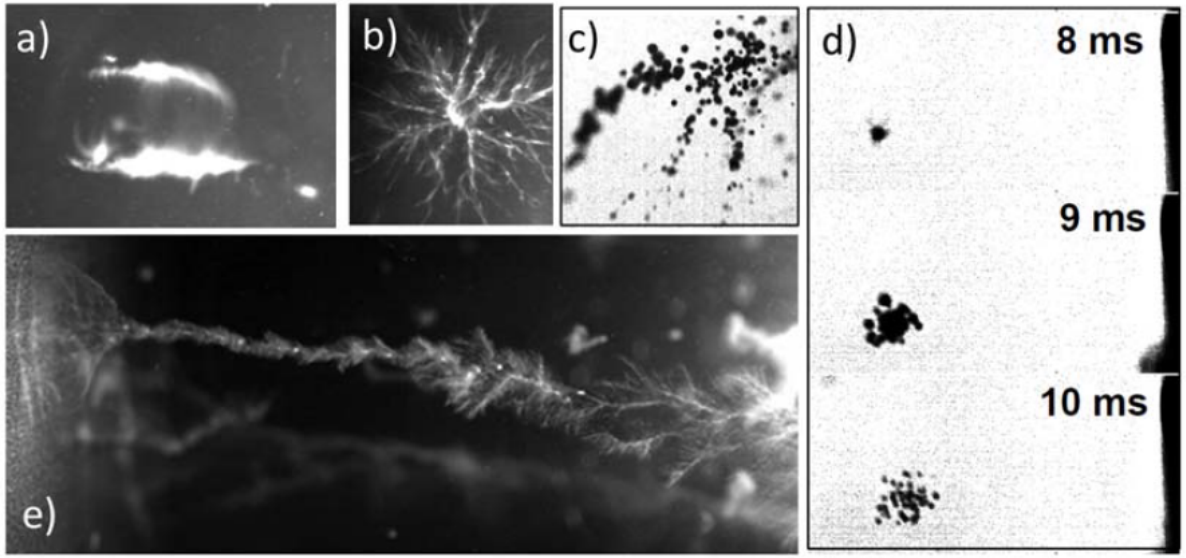


Vidéo : 3 M NaCl, 90 kHz (12 W, Ar 46 mL/min)

Cairos et al. *Ultrason. Sonochem*. (2014)

Réalité plus complexe

Formation de structures



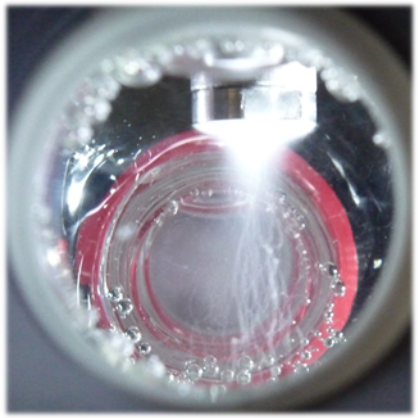


Fig. 1.13: Different typical bubble structures as found in ultrasonic cavitating systems. a) Double layer around the nodal plane of a horizontal standing wave field. b) Filament at the focus of a cylindrical standing wave field. c) Detail of a filament. d) Small bubble cluster at different phases of bubble oscillation: nearly collapsed at 8 ms, expanded at 9 ms, intermediate bubble sizes at 10 ms. e) Flare structure near a submerged transducer [Images a), b) and e) from [70], © Research Signpost 2005. Images c) and d) from [14], © Universitätsverlag Göttingen 2007].

[70] R. Mettin, Bubble structures in acoustic cavitation, in: A. A. Doinikov (ed.): Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields: Modern Trends and Applications (Research Signpost, Kerala, 2005), pp. 1-36.

[14] R. Mettin, From a single bubble to bubble structures in acoustic cavitation, in: T. Kurz, U. Parlitz, U. Kaatze (eds.): Oscillations, Waves and Interactions (Universitätsverlag Göttingen, Göttingen, 2007), pp. 171-198.

Activité sonochimique et Sonoluminescence

Sonochimie

Génération de **radicaux** dans le plasma sonochimique :

$H_2O \rightarrow))) H + {}^{\bullet}OH$

Puis recombinaison :

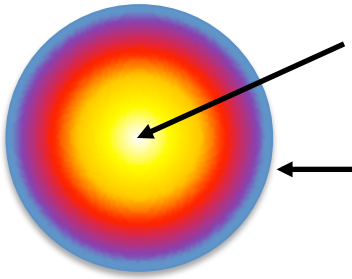
$H + OH \rightarrow H_2O$

$H + H \rightarrow \mathbf{H_2}$

${}^{\bullet}OH + {}^{\bullet}OH \rightarrow \mathbf{H_2O_2}$

} Base de l'activité sonochimique en solutions aqueuses

3 zones de réactivité sonochimique :



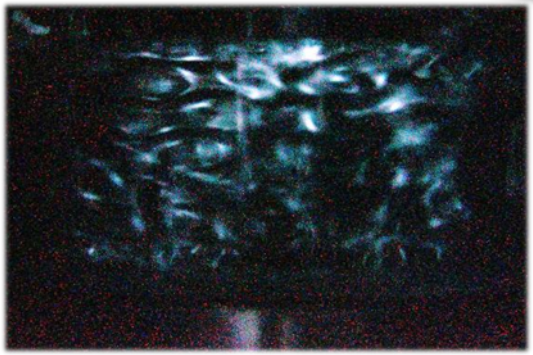
Cœur très chaud de la bulle, plasma (milliers de degrés et centaines de bars) (< 1 µm, 100 ps)

Interface surchauffée solution-bulle (centaines de degrés)

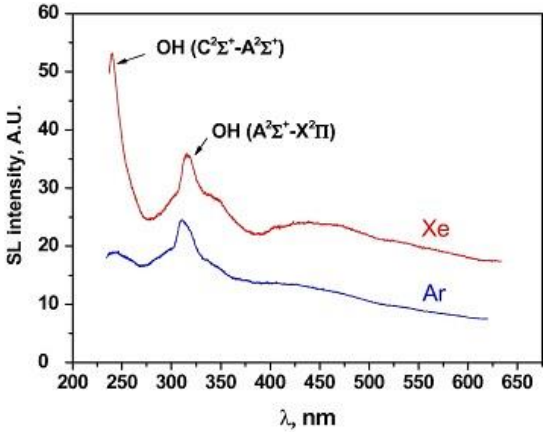
Volume de la solution

Suslick, *Science* (1990)

Sonoluminescence



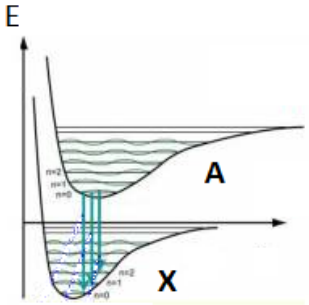
Mesure du rayonnement émis par le plasma sonochimique
→ conditions atteintes dans les bulles

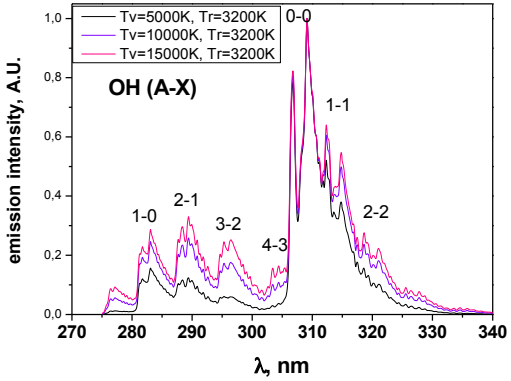


Continuum intense + émissions d'espèces électroniquement excitées

- Indication sur les espèces formées, sur les mécanismes réactionnels
- Emissions caractéristiques de l'espèce et de son état d'excitation

Permettent l'estimation de températures





Moyenne spatiale et temporelle

Longueur d'onde dans l'eau :
4,1 mm à 362 kHz

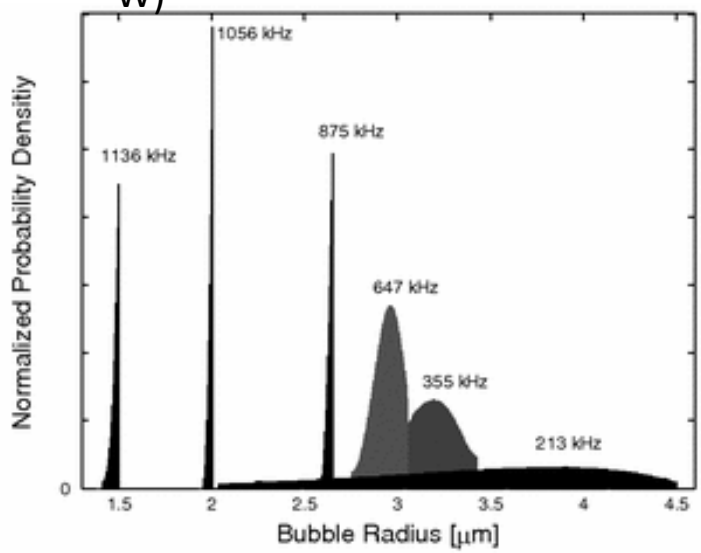
Mesure d'un spectre 10-600 s
Durée de vie du plasma < 1 µs
Période US : 50 µs à 20 kHz, 2,8 µs à 362 kHz

Importance de la fréquence ultrasonore

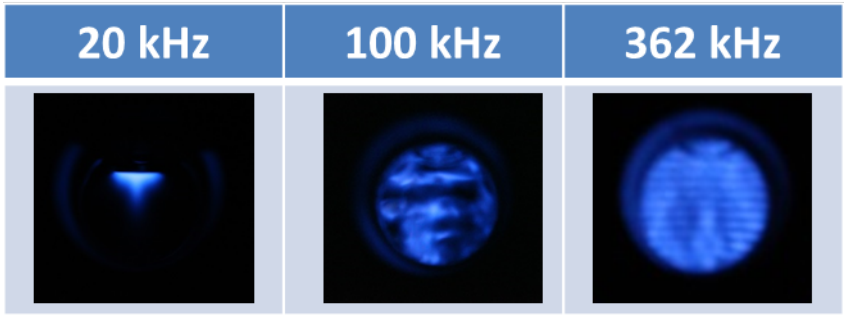
Fréquence ultrasonore = paramètre majeur
Conditionne l'activité sonochimique, sa répartition, la sonoluminescence…

Basses fréquences : 17 – 100 kHz → effets physiques des US
Hautes fréquences : 200 – 1000 kHz → effets chimiques des US

Taille des bulles chimiquement actives (air, 1,5 W)



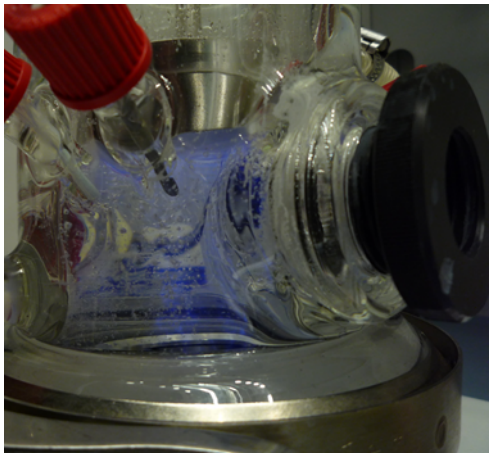
SCL du luminol à différentes fréquences US (Ar)



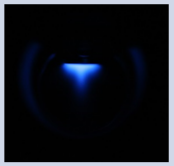
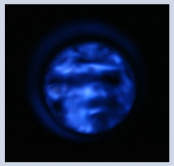
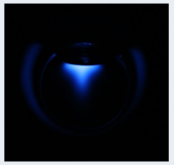
Zone active très localisée à 20 kHz, dans tout le réacteur à haute fréquence

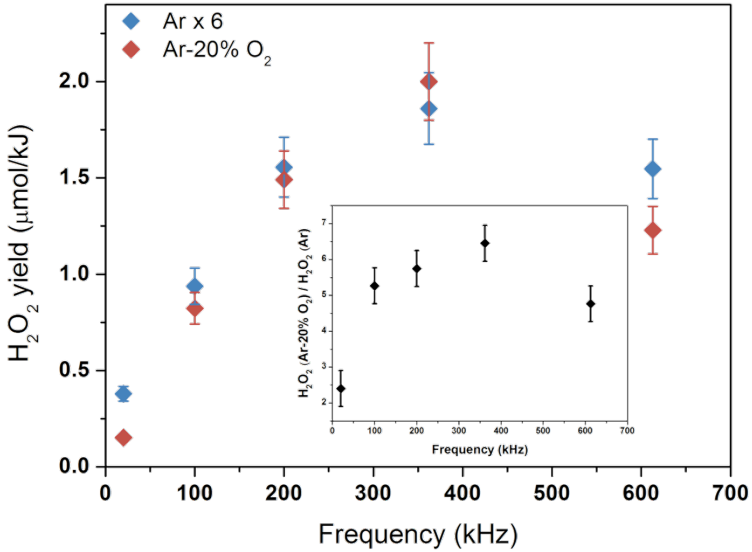
Brotchie, Grieser, Ashokkumar, Phys. Rev. Lett. **102**, 084302 – 2009
Ji et al., *J Phys Chem C* 2018

Ar vs. Ar/O_2 : effet de la fréquence US



SCL du luminol à différentes fréquences US

	20 kHz	100 kHz	362 kHz
Ar			
Ar-20%O_2			



Sous Ar :

H_2O —)))→ $H^\bullet + OH^\bullet$

$2\ H^\bullet \rightarrow H_2$

$2\ OH^\bullet \rightarrow H_2O_2$

En présence d'O_2 :

$O_2 + H^\bullet \rightarrow HO_2^\bullet$

$2\ HO_2^\bullet \rightarrow H_2O_2 + O_2$

O_2 —)))→ 2 O (5.15 eV/bond)

$O + H_2O \rightarrow 2OH^\bullet$

$O + H^\bullet \rightarrow OH^\bullet$

Augmentation du rendement en H_2O_2 plus élevée à HF

Pflieger et al., Ultrason Sonochem 2015

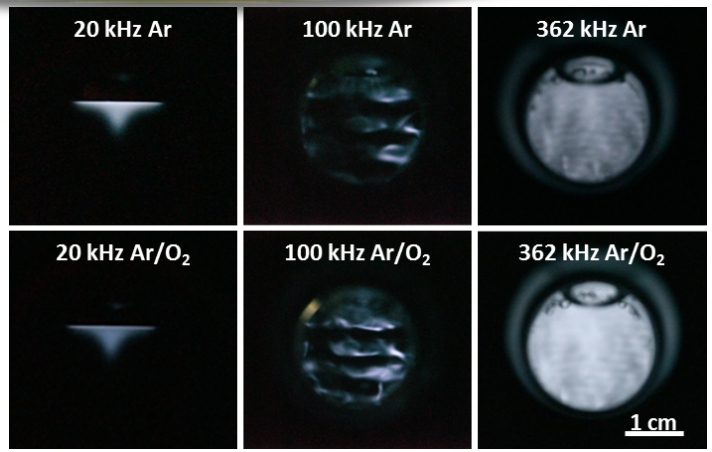
Ji et al., *J Phys Chem C* 2018

Ar vs. Ar/O_2 : effet de la fréquence US

Ar-20%O_2 vs. Ar :

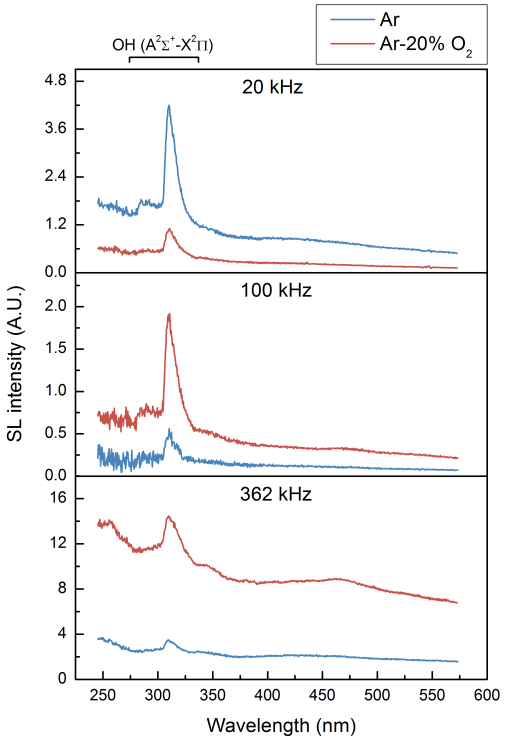
HF : H_2O_2 ↑, SL ↑

BF : H_2O_2 ↑, SL ↓



Importance de la dissociation de O_2 à HF

- Des mécanismes de dégradation différents peuvent être observés à HF et BF

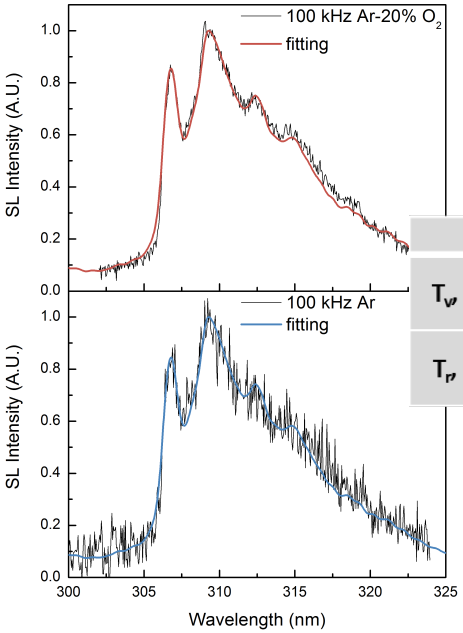


Ar : T_v(OH) (Specair)

20 kHz : 5750 ± 250 K

100 kHz : 6500 ± 500 K

362 kHz : 8000 ± 1000 K



	Ar	Ar/O_2
T_v, K	6500 ± 500	7250 ± 250
T_r, K	4750 ± 250	5200 ± 200

Pflieger et al., *Ultrason. Sonochem.* (2015)

Ji et al., *J Phys Chem C* 2018

Effet de la fréquence US

Fort élargissement des émissions à HF

T_v estimées (Specair) HF > BF

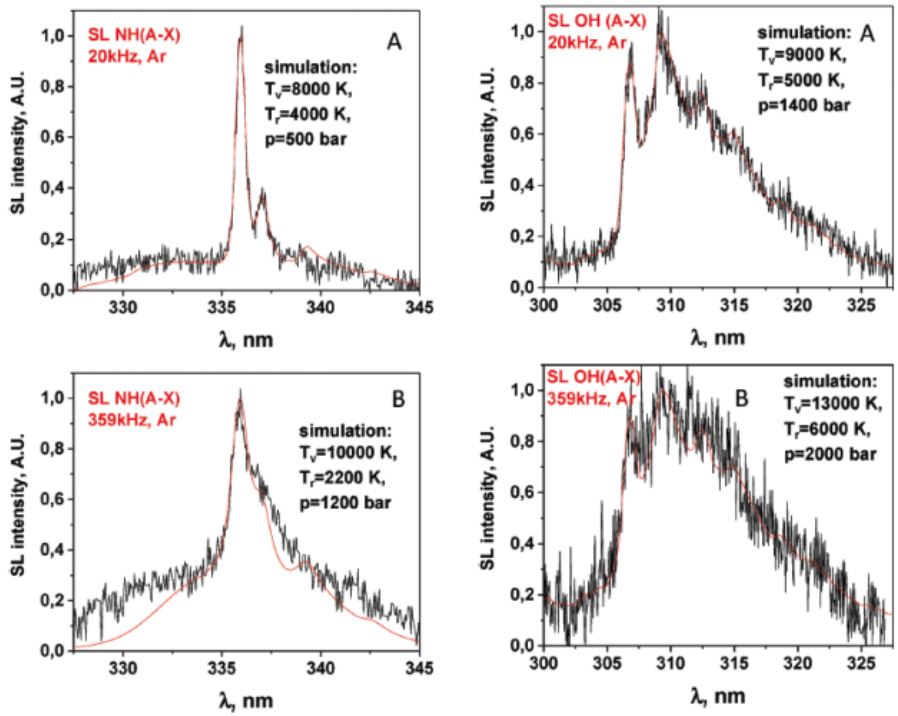
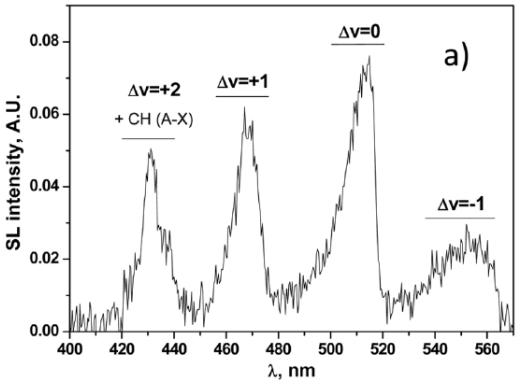
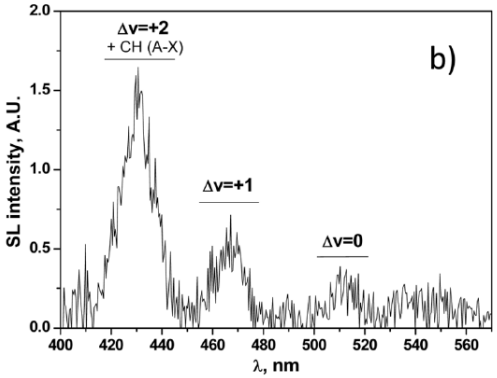


Fig. 5: Molecular emission of OH ($A^2\Sigma^+$-$X^2\Pi$) and NH ($A^3\Pi$-$X^3\Sigma^-$) in SL spectra of 0.1 M ammonia solutions sonicated under Ar at 20 kHz and 359 kHz, and their simulations with Specair



20 kHz : 6300 / 4800 K



362 kHz : 8000 / 4000 K

t-BuOH aq, 20 kHz 0,1M Ar (a) & 362 kHz 8,5 10^{-4}M Ar (b)

Pflieger et al., PCCP 2017

Pflieger et al, J Phys Chem B, 2015

Qu'en est-il de la pression ?

Valeurs estimées via Specair sur les émissions de OH (A-X) et NH (A-X)
Solutions aqueuses d'ammoniaque 0,1 M, Ar

20 kHz

transition	$T_v \pm 1000$	$T_r \pm 500$	p, bar
NH ($A^3\Pi$-$X^3\Sigma^-$)	7000 K	4000 K	**500 ± 50**
OH ($A^2\Sigma^+$-$X^2\Pi$)	9000 K	5000 K	**1400 ± 200**

1400 >> 500

359 kHz

transition	T_v, K	T_r, K	p, bar
NH ($A^3\Pi$-$X^3\Sigma^-$)	10000 ± 1000	2200 ± 500	**1200 ± 100**
OH ($A^2\Sigma^+$-$X^2\Pi$)	13000 ± 2000	6000 ± 1000	**2000 ± 500**

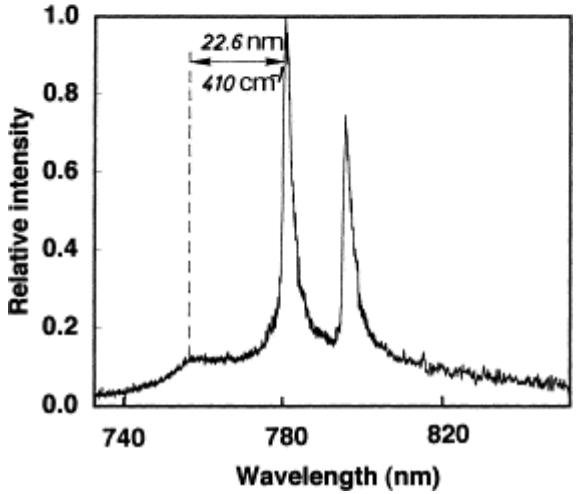
2000 >> 1200

La valeur de pression obtenue en reproduisant la largeur des émissions de OH et NH dans Specair dépend grandement de l'espèce considérée.
Il ne s'agit pas d'une pression « réelle ».

Estimation de la pression par SL

Deux techniques expérimentales de détermination de la pression / densité à l'intérieur des bulles :

- **Décalage en longueur d'onde**
  - Lepoint-Mullie (*Ultrason Sonochem* 2001) (Rb*, 20 kHz, Ar) : $d_{rel} = 18 \pm 2$
  - McNamara (*Nature* 1999) (Cr*, 20 kHz, Ar, huile de silicone) : $d_{rel} = 19 \pm 2$ (correspondant à 300 bar à 4700 K)



		Transitions in Ar gas			
		$^2P_{3/2}$–$^2S_{1/2}$		$^2P_{1/2}$–$^2S_{1/2}$	
		(nm)	(cm^{-1})	(nm)	(cm^{-1})
Shift					
	H_2O	0.41	6.7	0.56	8.9
	1-octanol	0.58	9.5	0.67	10.6
		$\times 10^{-26}$ (m^{-3}) (amagats)		$\times 10^{-26}$ (m^{-3}) (amagats)	
Density					
	H_2O	4.2	15.7	5.0	18.7
	1-octanol	5.4	20.2	5.6	20.9

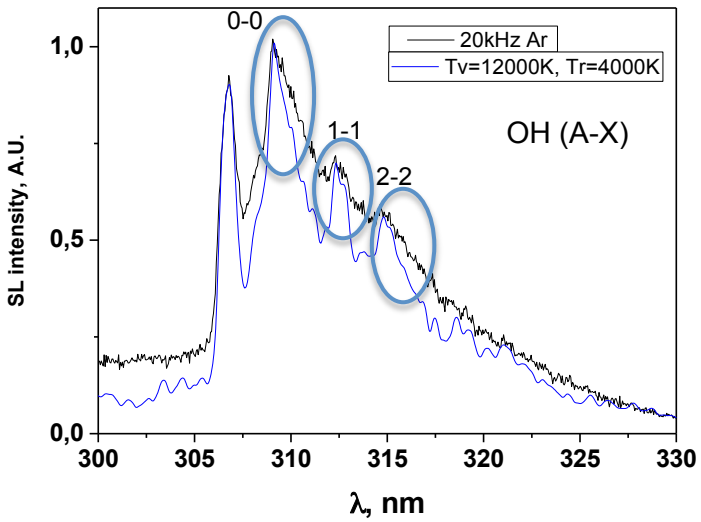
Lepoint-Mullie (*Ultrason Sonochem* 2001)

Estimation de la pression par SL

- **Élargissement des pics** (approche également de Specair)
  - Hypothèse : pression = source principale de l'élargissement
  - Sehgal (*J Chem Phys* 1979) (Na*, 460 kHz, Ar) : d_{rel} = 36-50
  - Choi (*J Phys Chem B* 2008) (Na*, 138 kHz, Ar) : d_{rel} = 59,5 (i.e. 880 bar à 4300 K)
  - Kazachek (*Techn Phys Lett* 2009) (Na*, 22/44 kHz, Ar) : 800-1200 bar

Valeurs obtenues >>> d_{rel} = 18 ± 2 donnée par Lepoint-Mullie

⇒ Autres sources d'élargissement non négligeables, en particulier la perturbation par les espèces chargées du plasma (effets Stark)



Approche adoptée par Flannigan (*Phys Rev Lett* 2006) sur une monobulle (Ar*, H_2SO_4)

Émissions moléculaires (MBSL, H_2O) beaucoup plus complexes à modéliser…

Système exotique riche d'informations

Acides concentrés

Systèmes exotiques riches d'informations
Mais éloignés des applications

Pression de vapeur = celle de l'eau; très faible

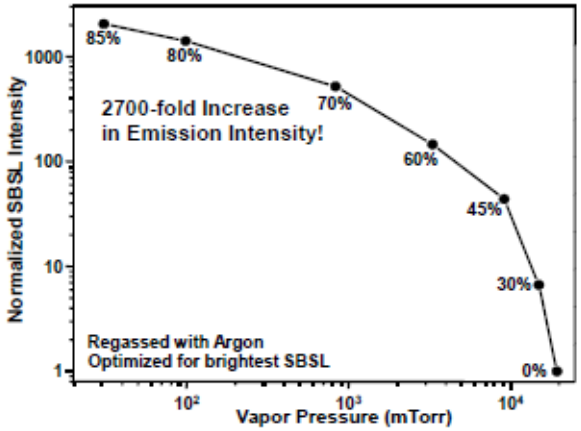
H_2SO_4 95 wt % : 2.10^{-3} mbar

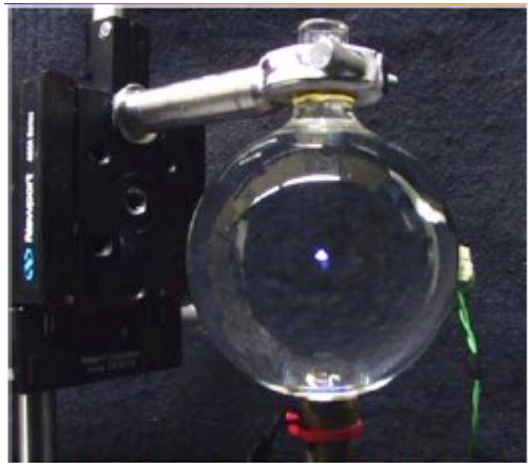
⇒ Contenu de la bulle = gaz dissous

(gaz rare : monoatomique)

⇒ Concentration de l'énergie plus efficace

Intensité de SBSL dans H_3PO_4

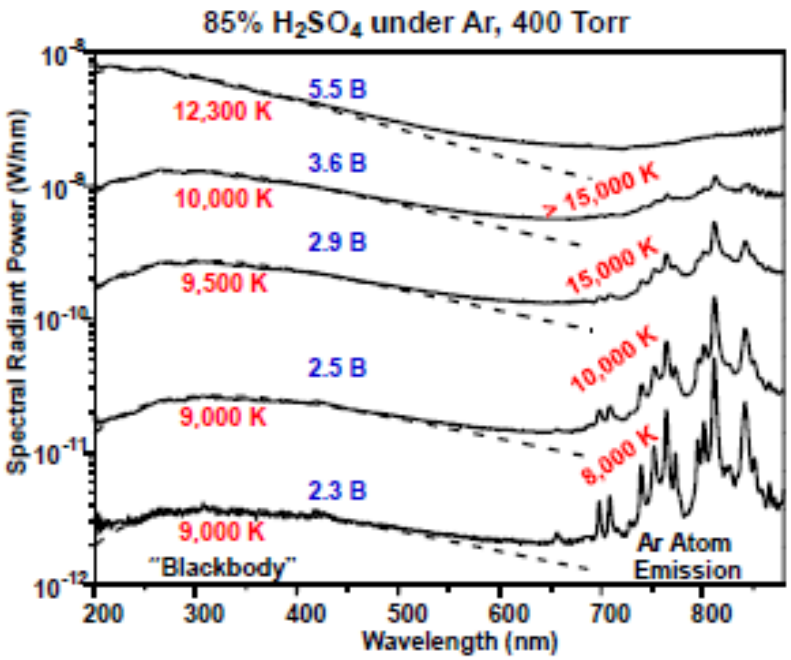


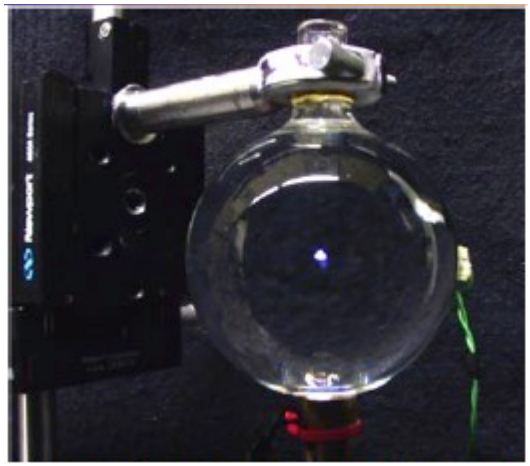


SBSL dans H_2SO_4 : visible dans une pièce éclairée (labo Suslick)

- SL extrêmement intense
- Contenu des bulles différent : pas de molécules d'eau / polyatomiques

Émission de l'Ar en SBSL dans H_2SO_4





Lignes de l'Ar visibles, contrairement à SL dans l'eau

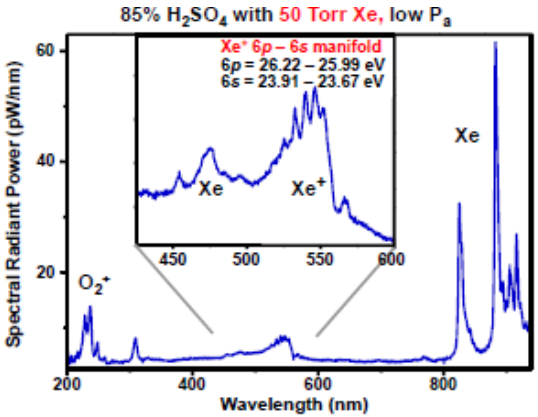
- Conditions plus extrêmes
- Pas (peu) d'eau ⇒ pas de désexcitation non radiative

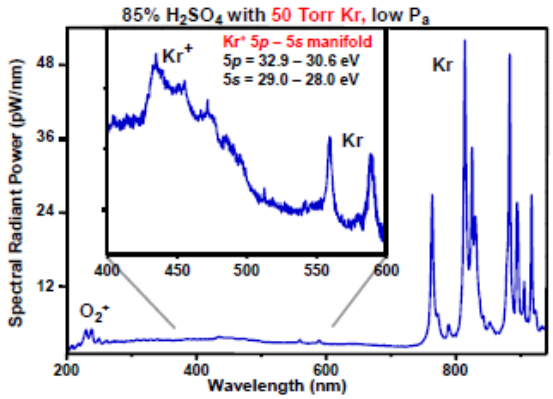
Température correspondant à l'émission de l'Ar :

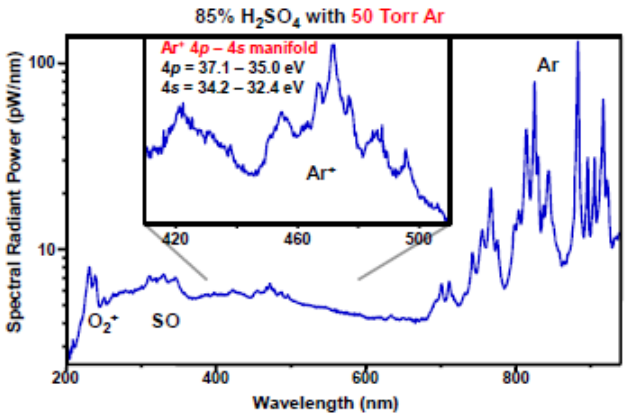
de 8000 K à > 15000 K (p_{ac} de 2,3 à 5,5 bar)

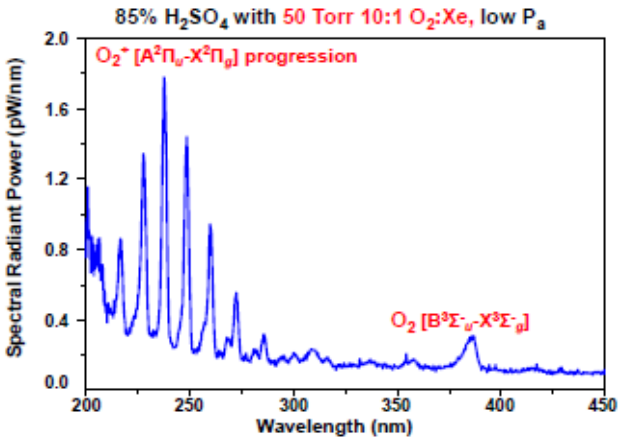
Émission d'ions !

SBSL, 85% H_2SO_4, 67 mbar Ar / Kr / Xe



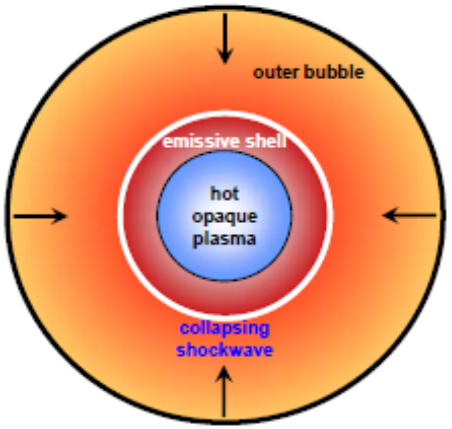






Niveaux émetteurs très hauts en énergie >>> T_{Ar}

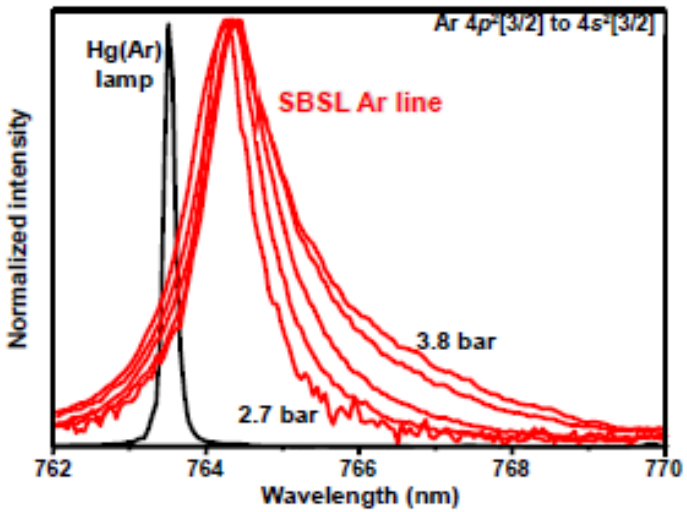
O_2^+ ne peut pas être généré thermiquement (en général : par impact électronique 50-100 eV)



Suslick et al., The Chemical History of a Bubble, Accounts of Chemical Research, 2018

Asymétrie des lignes d'Ar et caractérisation du plasma

SBSL, H_2SO_4, Ar



Décalage + élargissement

Réduction du temps de vie par collisions (pression) → Lorentzienne, symétrique

Changement dans les niveaux d'énergie (particules chargées) → Asymétrique

P_a (bar)	Obs. T_{Ar} (K)	Obs. Ion Broadening parameter, A	Calc. N_e (cm^{-3})	Degree of Ionization, α
2.7	7,000	0.093	4×10^{17}	3×10^{-4}
3.0	10,000	0.10	1×10^{18}	8×10^{-4}
3.3	13,000	0.20	2×10^{19}	0.02
3.6	15,000	0.45	5×10^{20}	0.4
3.8	16,000	0.69	4×10^{21}	3

Degree of Ionization = avg. charge of Ar in the SL Plasma.
Ionization energies of Ar: Ar^+ 15.8, Ar^{2+} 27.6, Ar^{3+} 40.7 eV

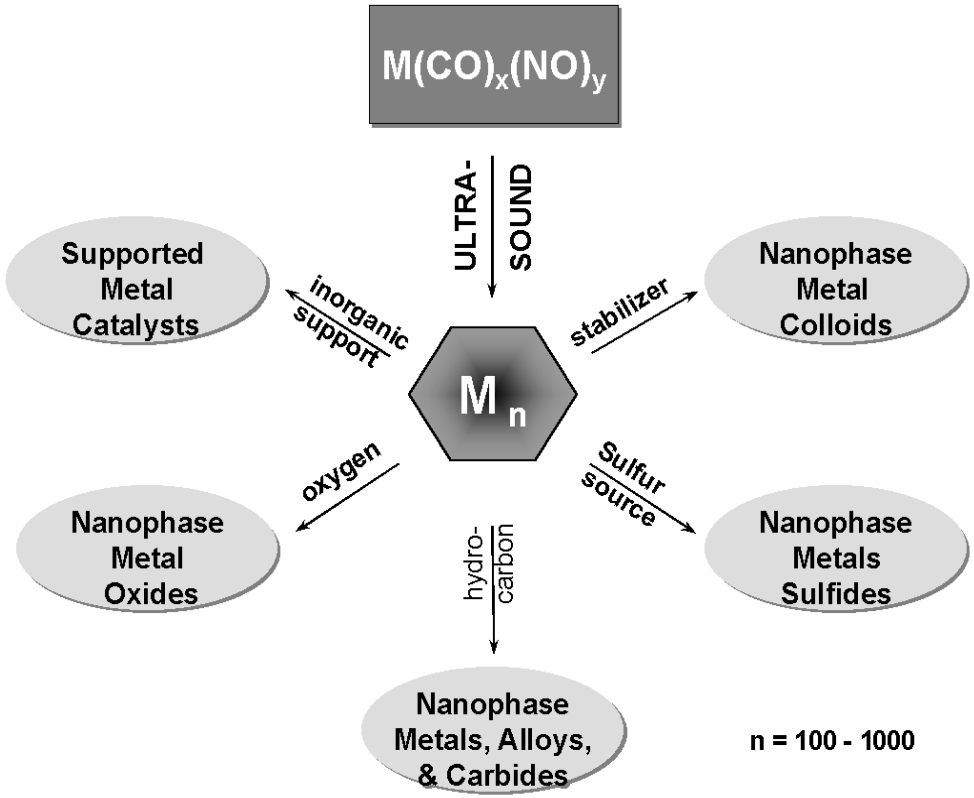
Total Energy required for $Ar \rightarrow Ar^{3+} + 3e^-$ is 84 eV.
(i.e., ~10^6 K if thermal).

SBSL, H_2SO_4, Ar
Densités électroniques de 10^{17} à 10^{21}
degré d'ionisation de 3.10^{-4} à 3 !

Flannigan (*Phys Rev Lett* 2006)

Activité sonochimique : quelques exemples d'applications

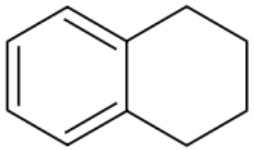
Synthèse sonochimique de nanoparticules (NP) à partir de précurseurs volatiles



$Fe(CO)_5$ —))) Fe

$Co(NO)(CO)_3$ —))) Co

$Mo(CO)_6$ —))) Mo_2C

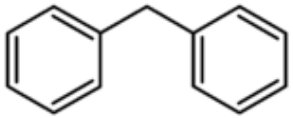


$W(CO)_6$ —))) WC_{1-x}

$Mo(CO)_6 + S$ —))) MoS_2

$W(CO)_6 + S$ —))) WS_2

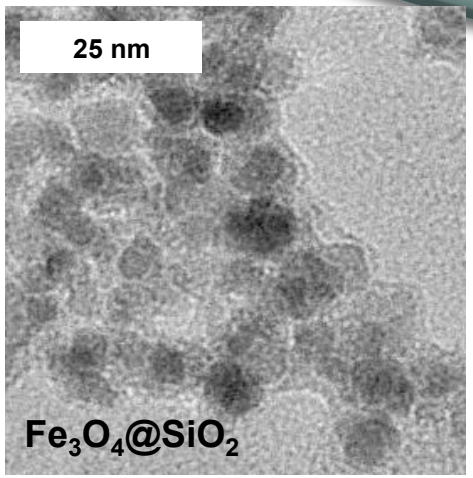
$Fe(CO)_5$ —))) Fe/Fe_3C



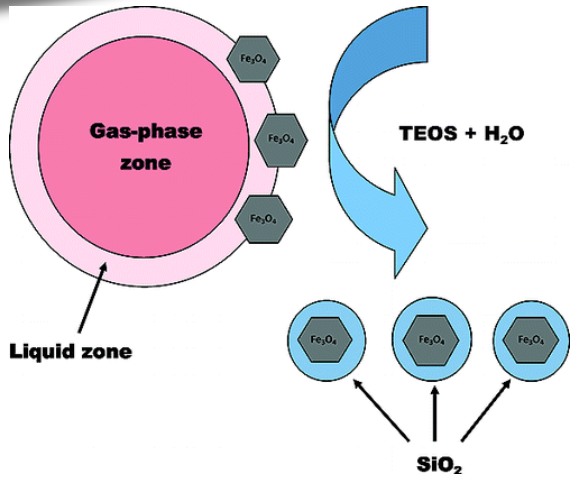
$W(CO)_6$ —))) WC

J. H. Bang and K. S. Suslick, *Adv. Mater.*, 2010, **22**, 1039

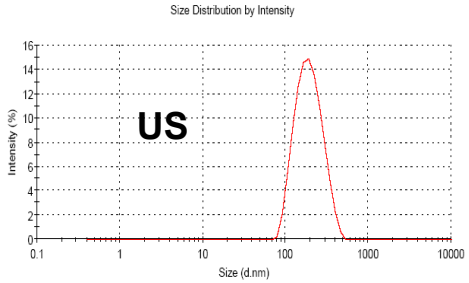
Synthèse sonochimique de NP « cœur coquille »

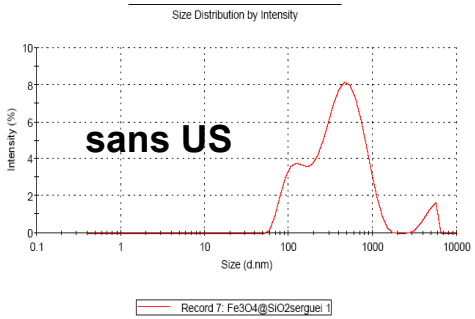


$Fe_3O_4 + (EtO)_4Si$ —))) Fe_3O_4@SiO_2



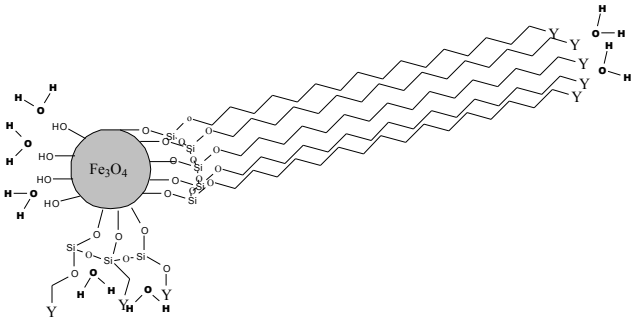
DLS





Séparation magnétique

Fonctionnalisation

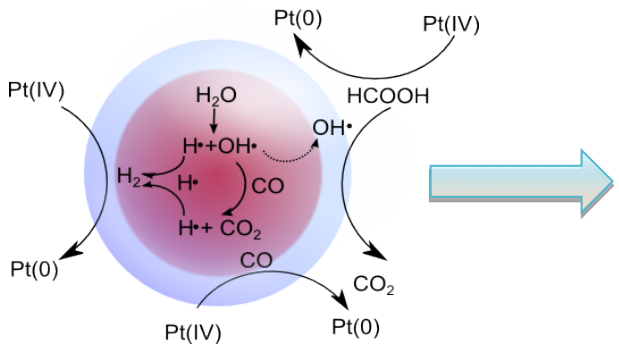


Morel et al., ACS NANO 2008

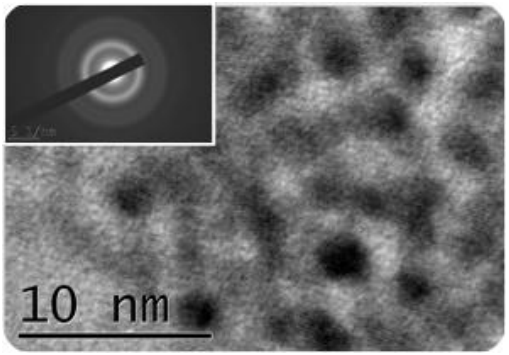
Synthèse sonochimique de NP de métaux nobles

Couplage effet chimique - effet mécanique

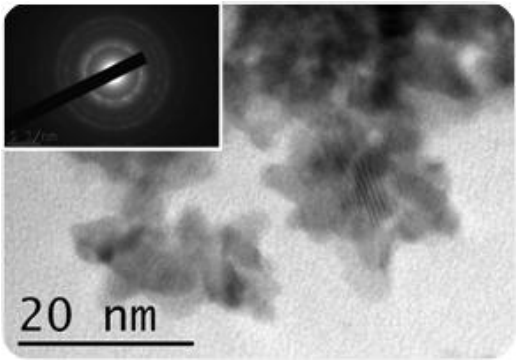
Synthèse de nanoparticules de métaux nobles et dépôt sur support sono-assisté

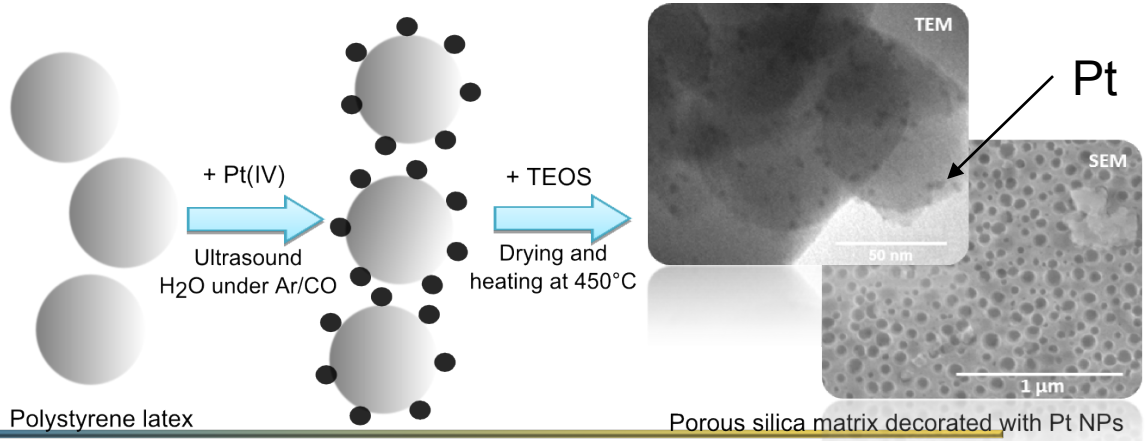


Ar/CO dans l'eau pure



Ar milieu formique 1M





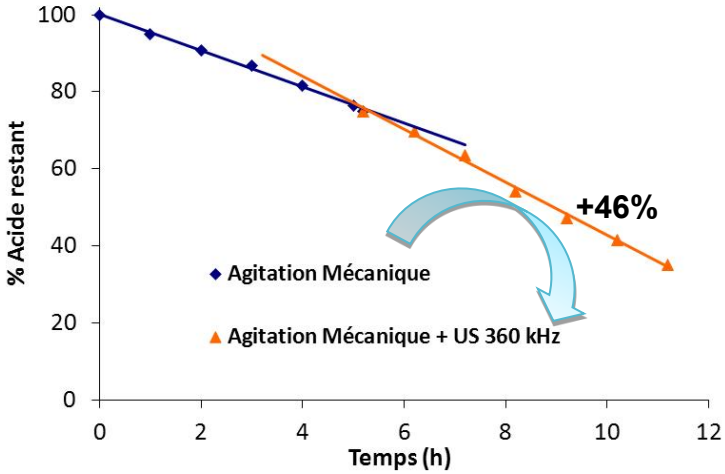
Dépôt de nanoparticules de Pt sur des matériaux thermosensibles

Designs originaux avec contrôle de la porosité, de la fonctionnalité et du site catalytique

A. F. Sierra Salazar, T. Chave, A. Ayral, S. I. Nikitenko, V. Hulea, P. J. Kooyman, F. D. Tichelaar, S. Perathoner, P. Lacroix-Desmazes, *Micropor. Mesopor. Mat.* 234 (2016) 207-214

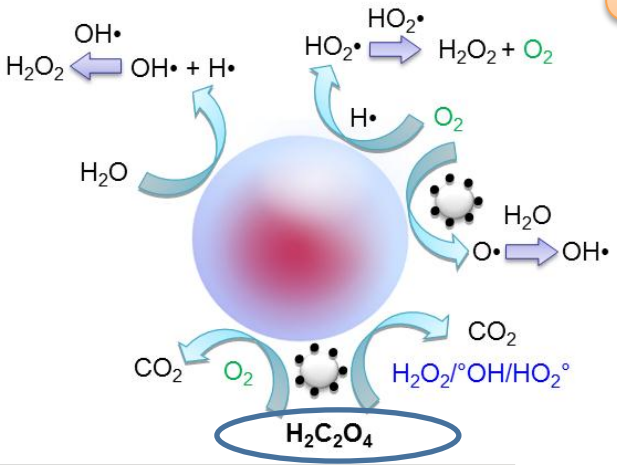
Sonocatalyse

Couplage effets mécaniques et effets chimiques



Atmosphère	Vitesse dégradation agitation (mmol/h)	Vitesse dégradation agitation + US (mmol/h)
Ar	~0	~0
Ar/O_2 (80/20)	0,48	0,7

Synergie observée en couplant O_2, Pt/TiO_2 et les ultrasons



Chave et al., Catalysis Today, 2015

Effets physiques : quelques exemples d'applications

Ondes de choc et microjets

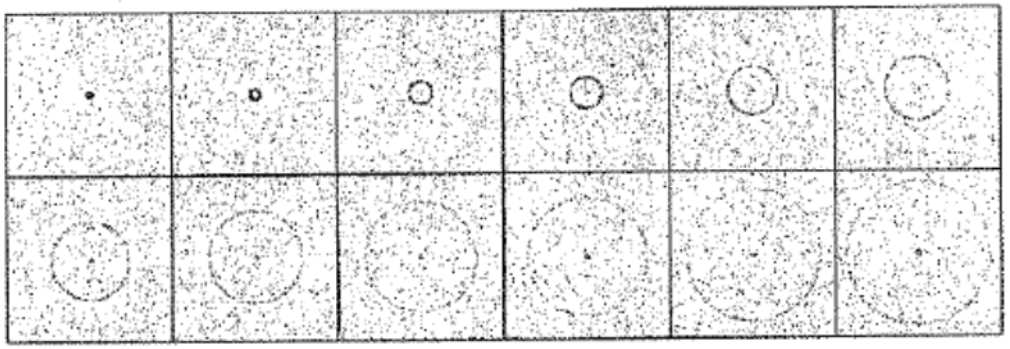
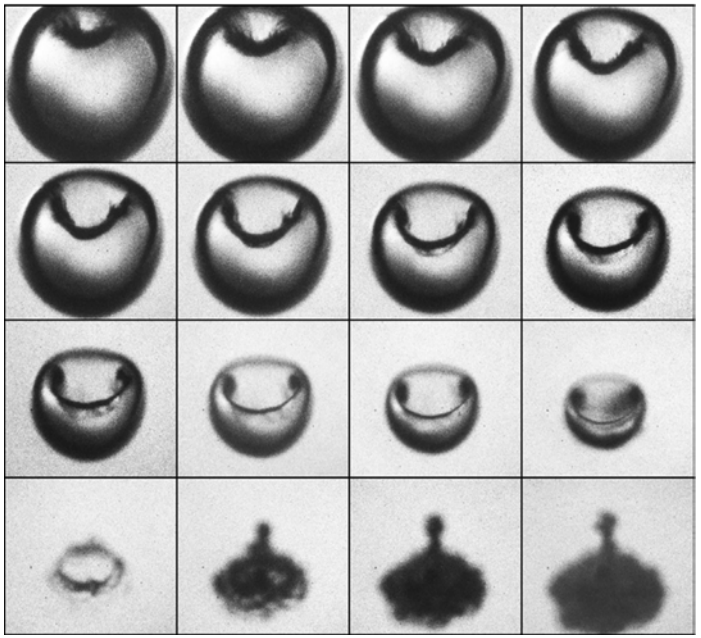


Figure 3.26 Shockwave from a trapped sonoluminescing bubble driven at 21.4 kHz and at a pressure amplitude of 132 kPa. The interframe time is 30 ns. Picture size is 160 μm × 160 μm. (Courtesy of R. Geisler.) (Lauterborn et al. (1999).)



Bulle laser (R_{max} = 1,5 mm) à proximité d'une surface[2]

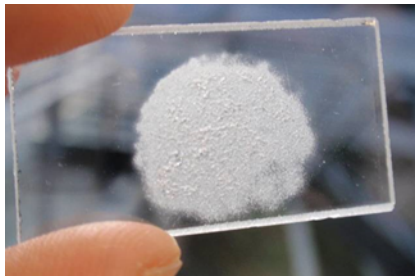
Érosion de surfaces, accélération des transferts de masse, diminution de l'épaisseur des couches de diffusion

[1] Lauterborn et al, 1999

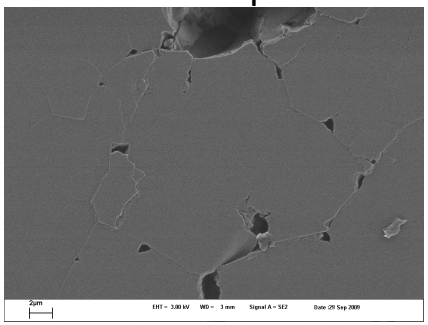
[2] Lauterborn and Kurz, *Rep. Prog. Phys* (2010)

Applications pour la dissolution de matériaux

Erosion de verre

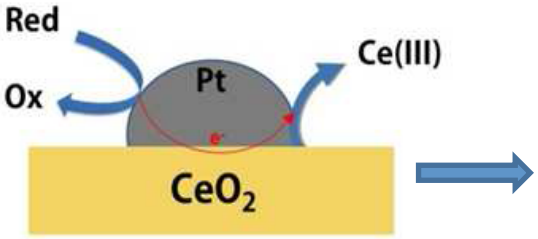


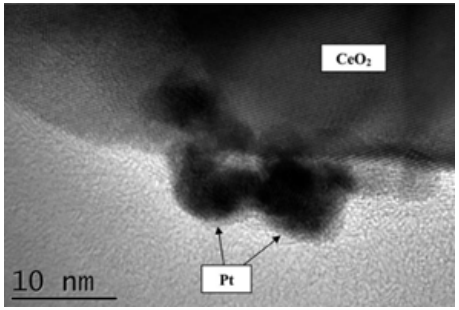
Observation par MEB

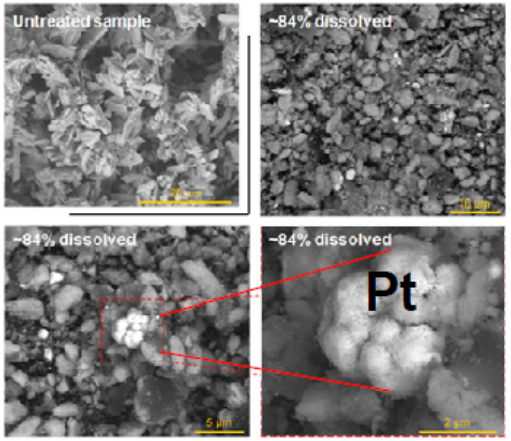


- Développement de nouvelles voies de dissolution douce en présence d'US pour des matières nucléaires réfractaires

Sonodissolution catalytique: dépôt de Pt sur CeO_2 ; Pt catalyse réduction $Ce(IV)_{solide} \rightarrow Ce(III)_{solution}$

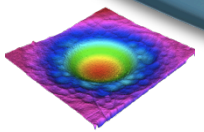


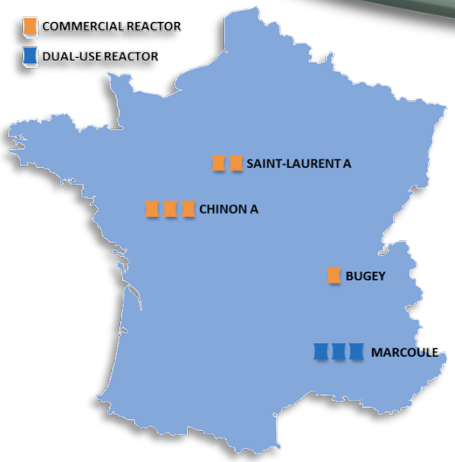


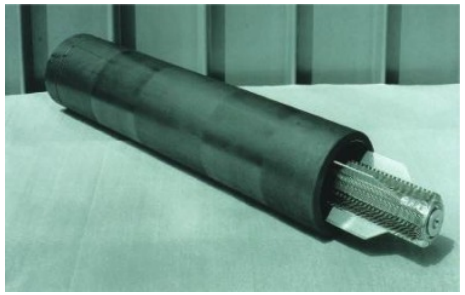


Virot M. et al., J. Phys. Chem. C, 2010
Virot et al., J. Mater. Chem. 2012

Décontamination de surfaces métalliques



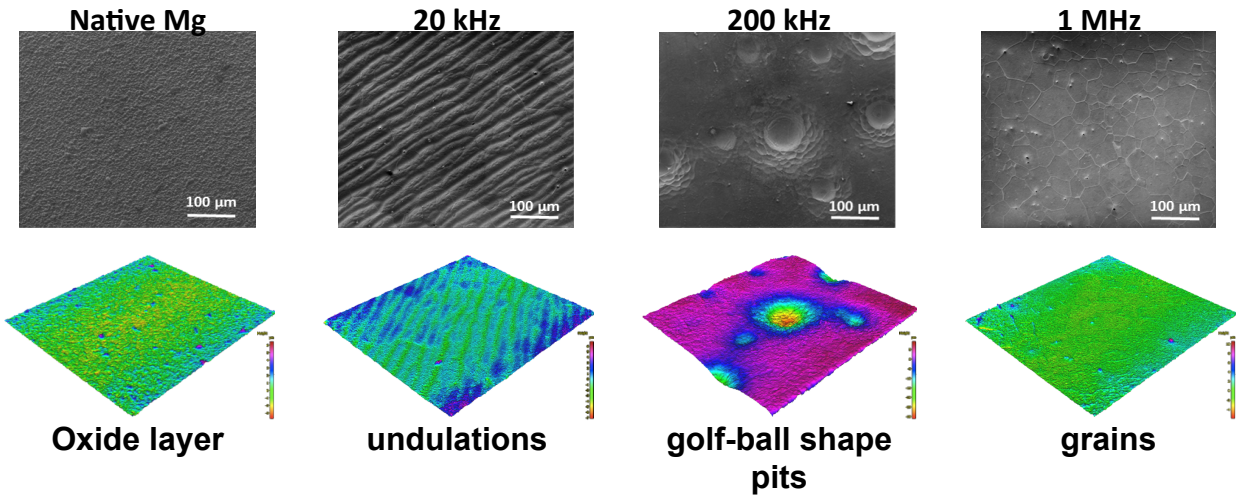




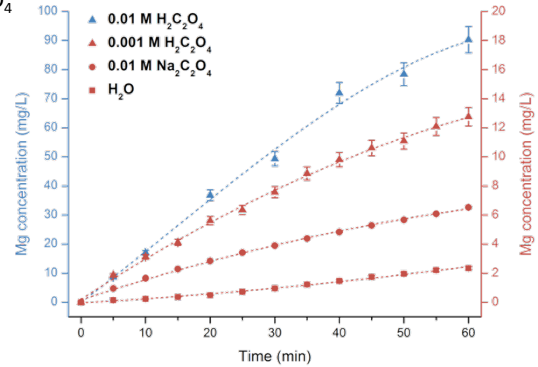
Gaine en MgZr (UNGG)

- Gaines de combustible des réacteurs UNGG en alliage MgZr
- Contaminées en U
- Actuellement démantèlement (7500 m^3 de gaines)

➢ Traitement US de surfaces de Mg (thèse Ran Ji)



20 kHz (P_{ac}= 18 W), **200 kHz** (P_{ac}= 20 W), **1 MHz** (P_{ac}= 40 W)
250 mL H_2O, 0,01 M acide oxalique ou 0,01 M $Na_2C_2O_4$
Ar
18 ± 2 °C, 100 rpm



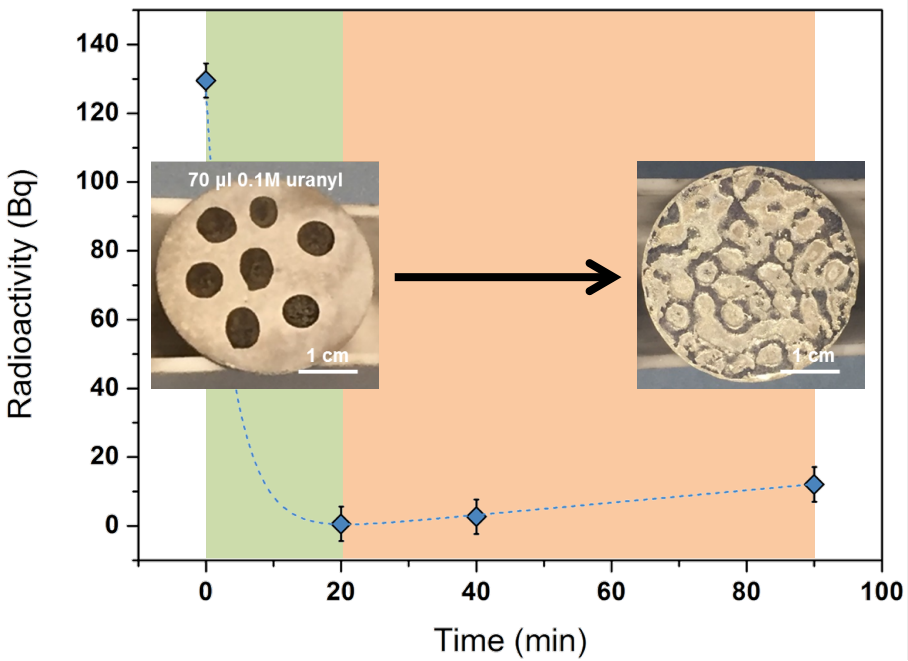
→

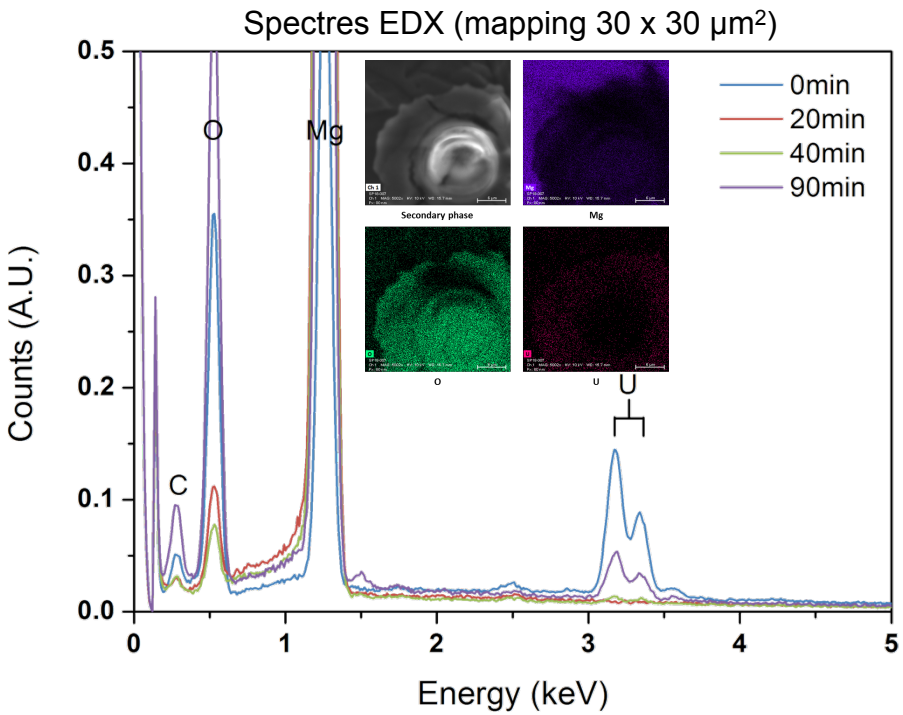
D. Chartier, *J. Hazard. Mater.* 326 (2017) 197-210
Ji et al. *Ultrasonics Sonochemistry 40* (2018) 30-40

Décontamination de surfaces métalliques

345 kHz (P_{ac}= 40W)
0.01 M **acide oxalique**
Ar
18 ± 2 °C, 100 rpm

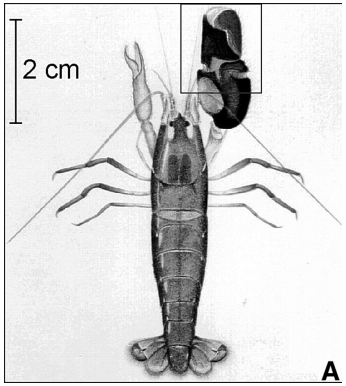
➢ Traitement US de surfaces contaminées de Mg (thèse Ran Ji)

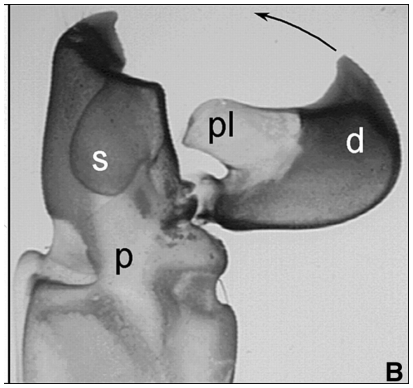


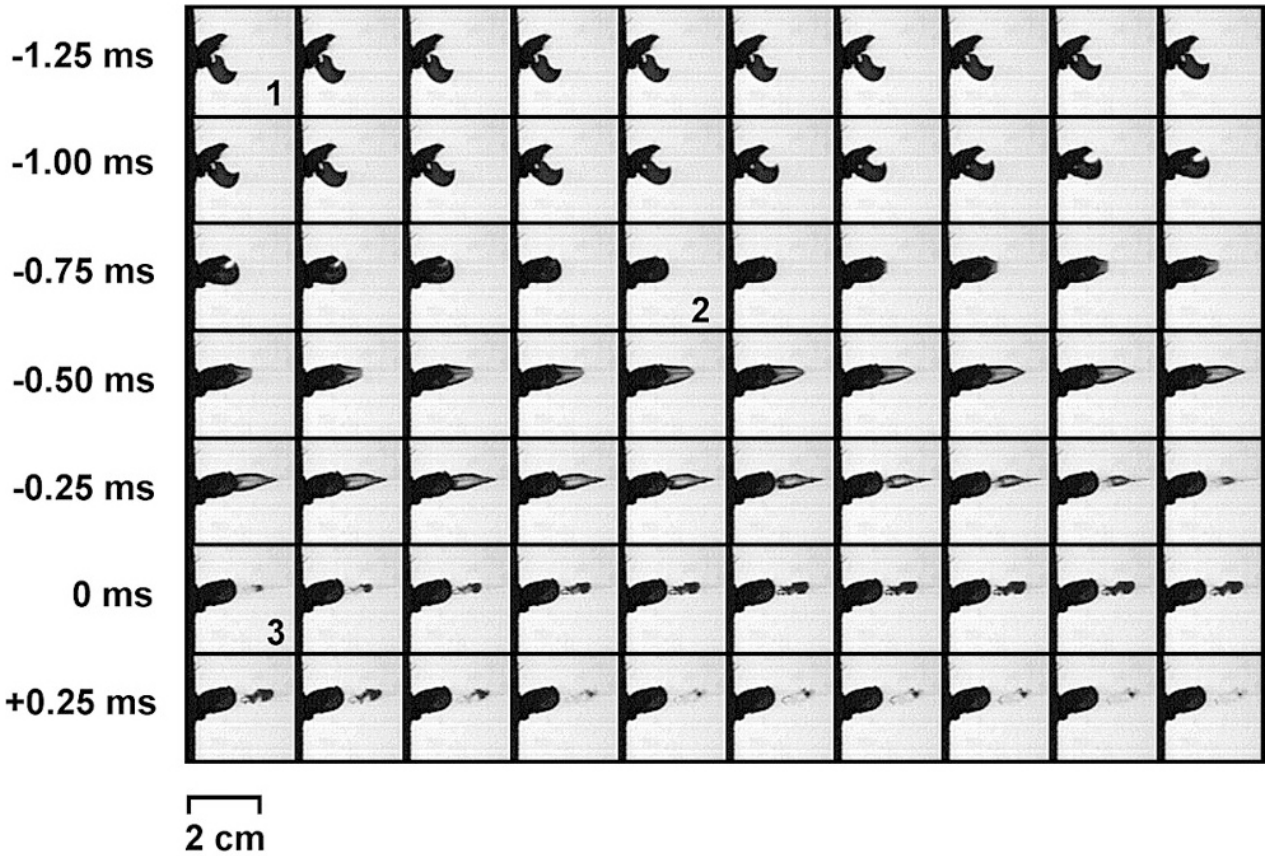


- Décontamination en 20 min
- Re-contamination partielle : U adsorbé dans une phase secondaire (brucite)

Des bulles de cavitation pour assommer des proies

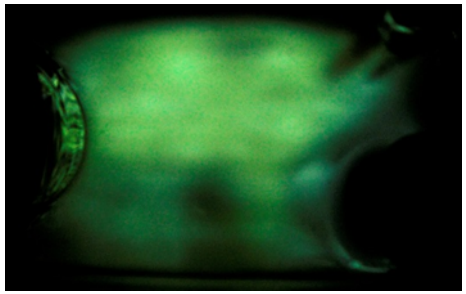






Versluis et al, Science, 2000

Conclusion



Sonochimie = branche de la chimie verte

Effets physiques et chimiques de la cavitation acoustique

Optimisables en fonction de la fréquence

Accélération de cinétiques, de transferts de matière etc.

Nouvelles réactions chimiques

Formation de « points chauds » (plasma) à durée de vie très courte dans un réacteur à T_{amb}, p_{atm}

Applications nombreuses en synthèse organique, matériaux, sonocatalyse, industrie alimentaire, médical, nettoyage etc.

Compréhension des phénomènes encore lacunaire

Merci de votre attention !

Nous recherchons un post-doctorant pour un an (>02/19), partagé entre Besançon et Marcoule

- Ultrasons focalisés
- Spectrométrie de sonoluminescence
- Traitement de surfaces

Merci de

votre attention !