

# SITA REMEDIATION

*La terre au sens propre*

La Cavitation hydrodynamique appliquée au traitement oxydant des pollutions organiques récalcitrantes

YLec Consultants : Yves LECOFFRE, Guillaume MAJ  
Sita remediation : Pascal ROUDIER

Intersol 2007



## HISTORIQUE

Sita remediation s'est engagée depuis 5 ans dans un large programme de traitement in situ des sols et des nappes phréatiques par voie chimique.

Les procédés d'oxydoréduction sont largement utilisés dans la gamme des traitements chimiques :

- Les procédés de réduction : l'injection de fer zéro nano, les PRB fer catalysé Pd, les nickels de Raney.
- Les procédés d'oxydation classiques : l'ozone, les peroxydes, le réactif de Fenton.
- Les procédés d'oxydation innovants : le  $\text{TiO}_2/\text{UV}$ , les ultrasons, la cavitation hydrodynamique, le plasma froid...



## BIBLIOGRAPHIE

Parmi la gamme des oxydants, les hydroxyles possèdent le potentiel d'oxydation le plus élevé.

L'idée est donc de produire des quantités importantes de  $\text{OH}^\circ$ .

Oxydant	E, Potentiel d'oxydation (mV)
Fenton - Radical hydroxyle, $\text{OH}^\circ$	2,80
Oxygène atomique, O	2,42
Ozone, $\text{O}_3$	2,08
Peroxyde d'hydrogène, $\text{H}_2\text{O}_2$	1,78
Permanganate ( $\text{MnO}_4$ )	1,68
Oxygène, $\text{O}_2$	1,23

Parmi les technologies identifiées la cavitation est un candidat potentiel



## La cavitation

**Intérêt :** méthode d'oxydation non consommatrice de produits chimiques et à rendement énergétique potentiellement élevé.

**Cavitation :** vaporisation d'un liquide en dépression sous l'effet de :

- grandes vitesses d'écoulement → cavitation hydrodynamique,
- phénomènes acoustiques → cavitation acoustique ou ultrasonore.

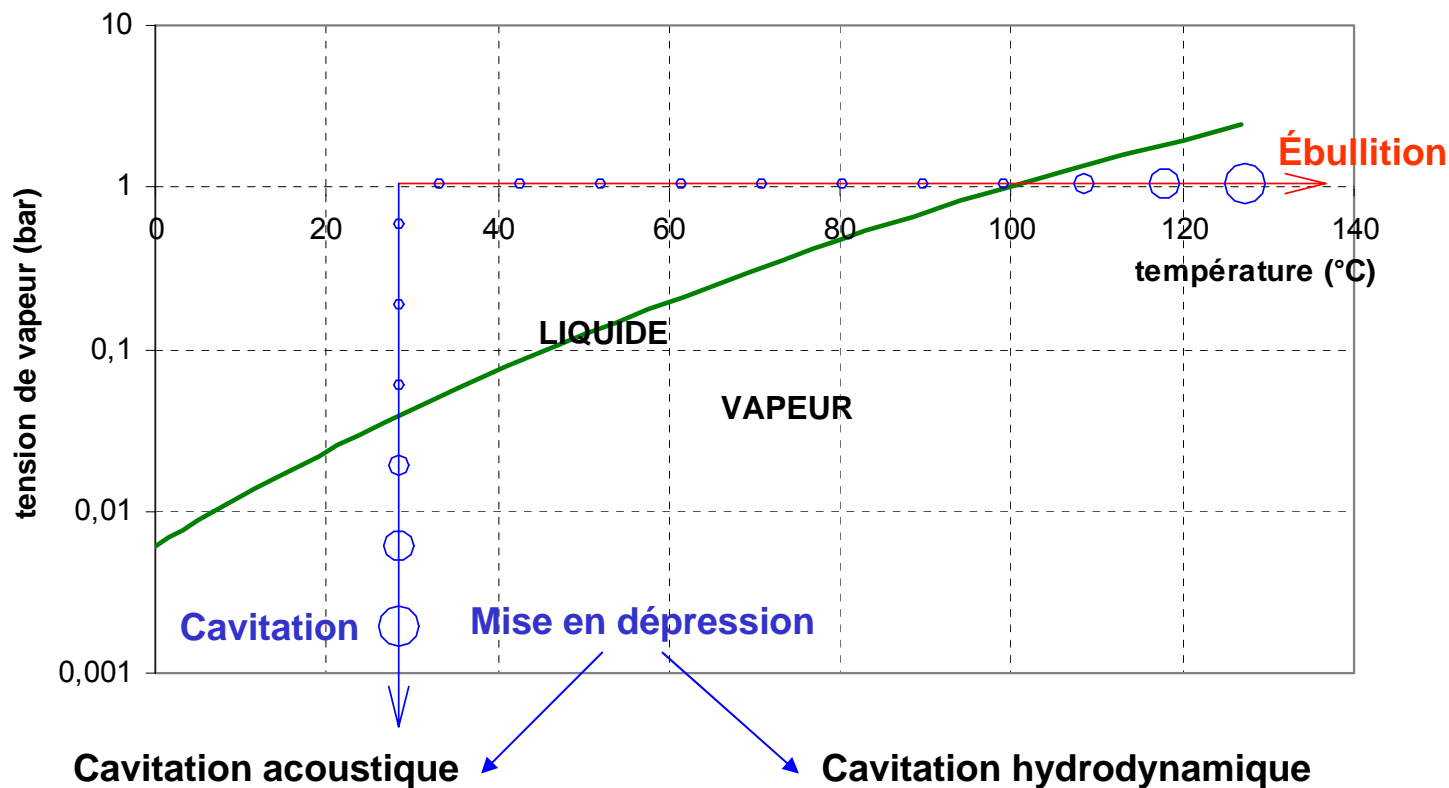
**Génération des bulles de vapeur :**

- grossissement d'un germe → cavitation nucléée,
- entraînement à partir d'une poche de vapeur → cavitation autoalimentée.



## La cavitation

### Équilibre liquide vapeur de l'eau





## Cavitation hydrodynamique

### Principe

Application du principe de conservation de l'énergie à la mécanique des fluides:

### Équation de Bernoulli

Énergie potentielle ( $p$ ) + Énergie Cinétique ( $\rho U^2$ ) = Constante

Dans une conduite en charge :

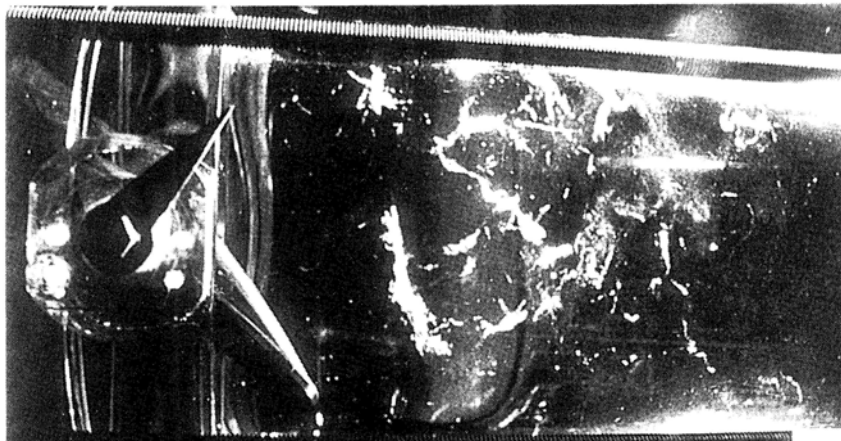
Accélération de l'écoulement → Diminution de pression



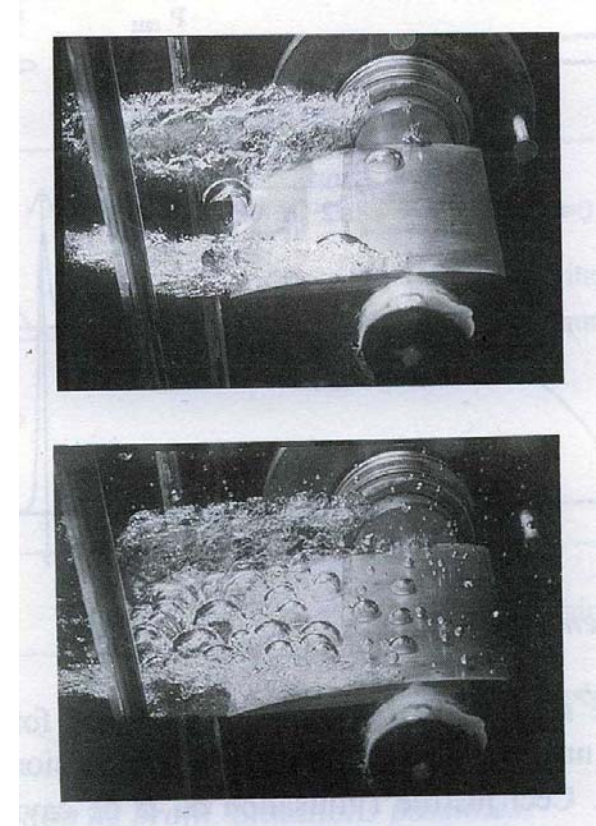
## Cavitation nucléée

Configurations typiques :

- Profils à faible incidence → cavitation à bulles,
- Jets à l'aval d'orifice → cavitation de mélange,
- Cavitation acoustique.



*Cavitation de mélange à l'aval d'une vanne papillon*



*Cavitation à bulles*





## Cavitation hydrodynamique

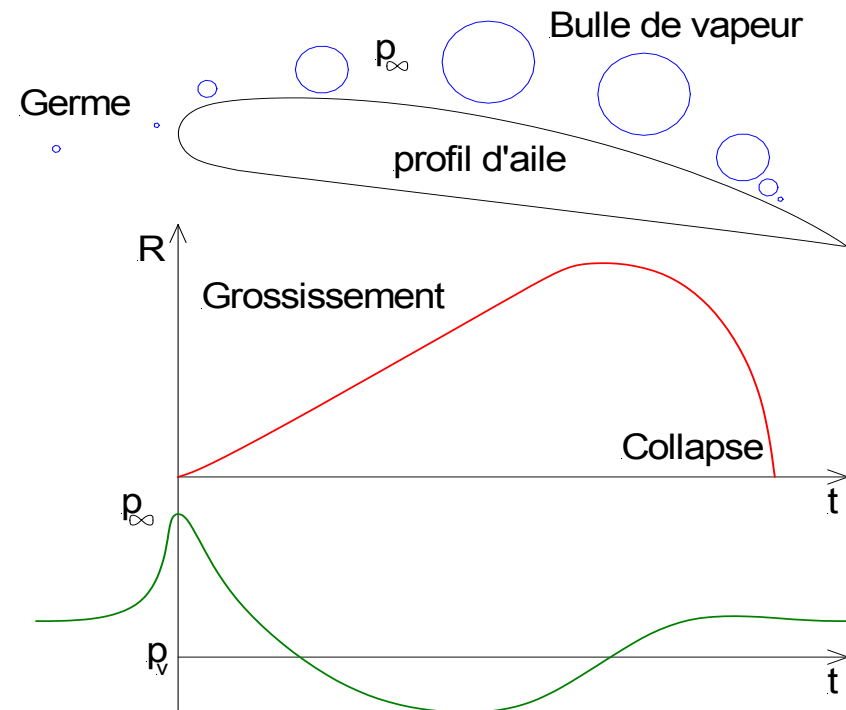
### Cycle de vie d'une bulle

Cas d'un profil d'aile à faible incidence

→ Cavitation à bulles

2 phases distinctes :

- Grossissement
- Collapse



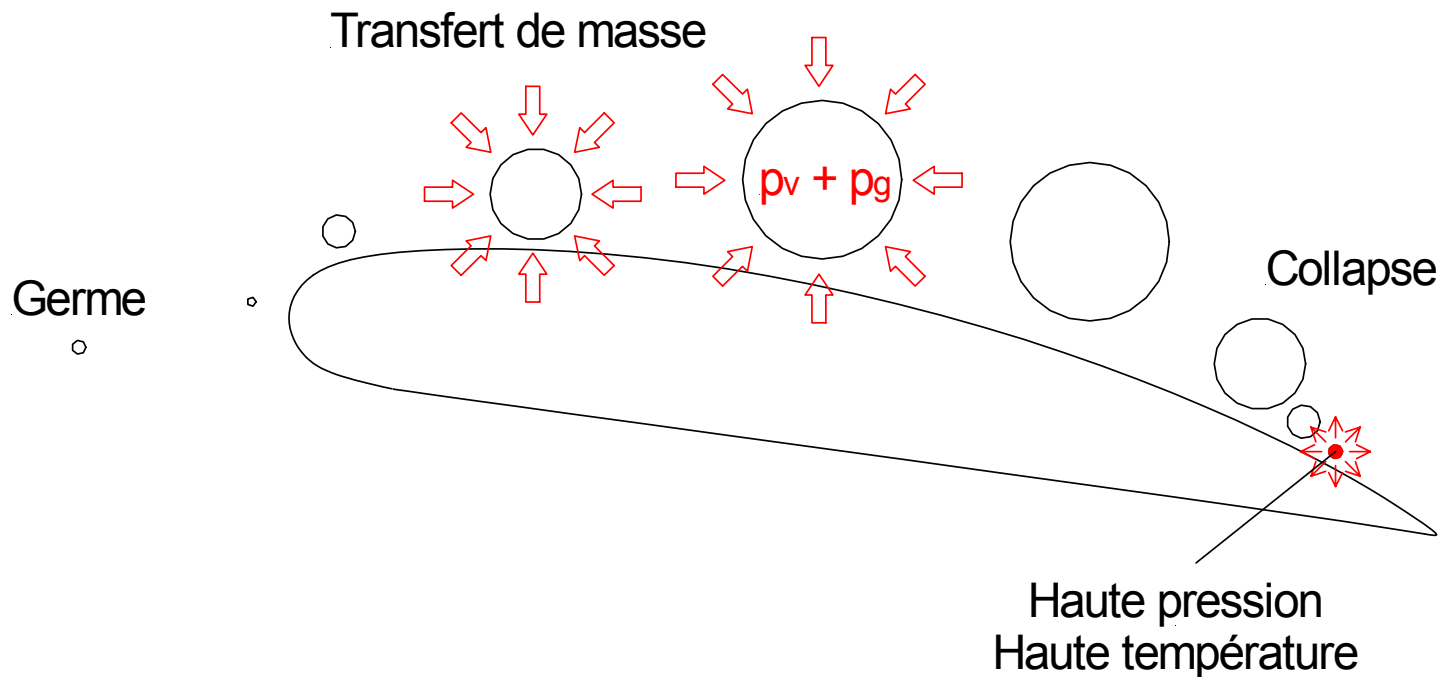




## Phase de grossissement

### Libération des espèces dissoutes

Les cavités soumises au collapse contiennent un mélange de vapeur d'eau et de gaz incondensables





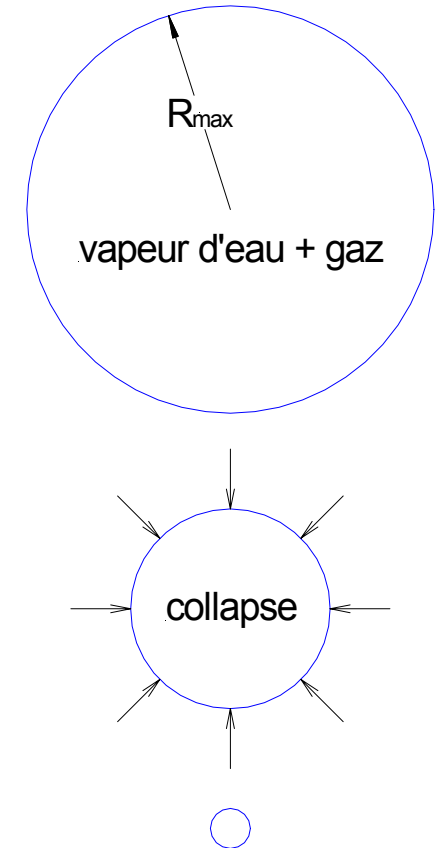
## Phase de collapse

Phénomène extrêmement rapide ( $\sim 1 \mu\text{s}$ ).

→ les échanges de chaleur entre le liquide et la bulle n'ont pas le temps de s'opérer.

→ compression adiabatique.

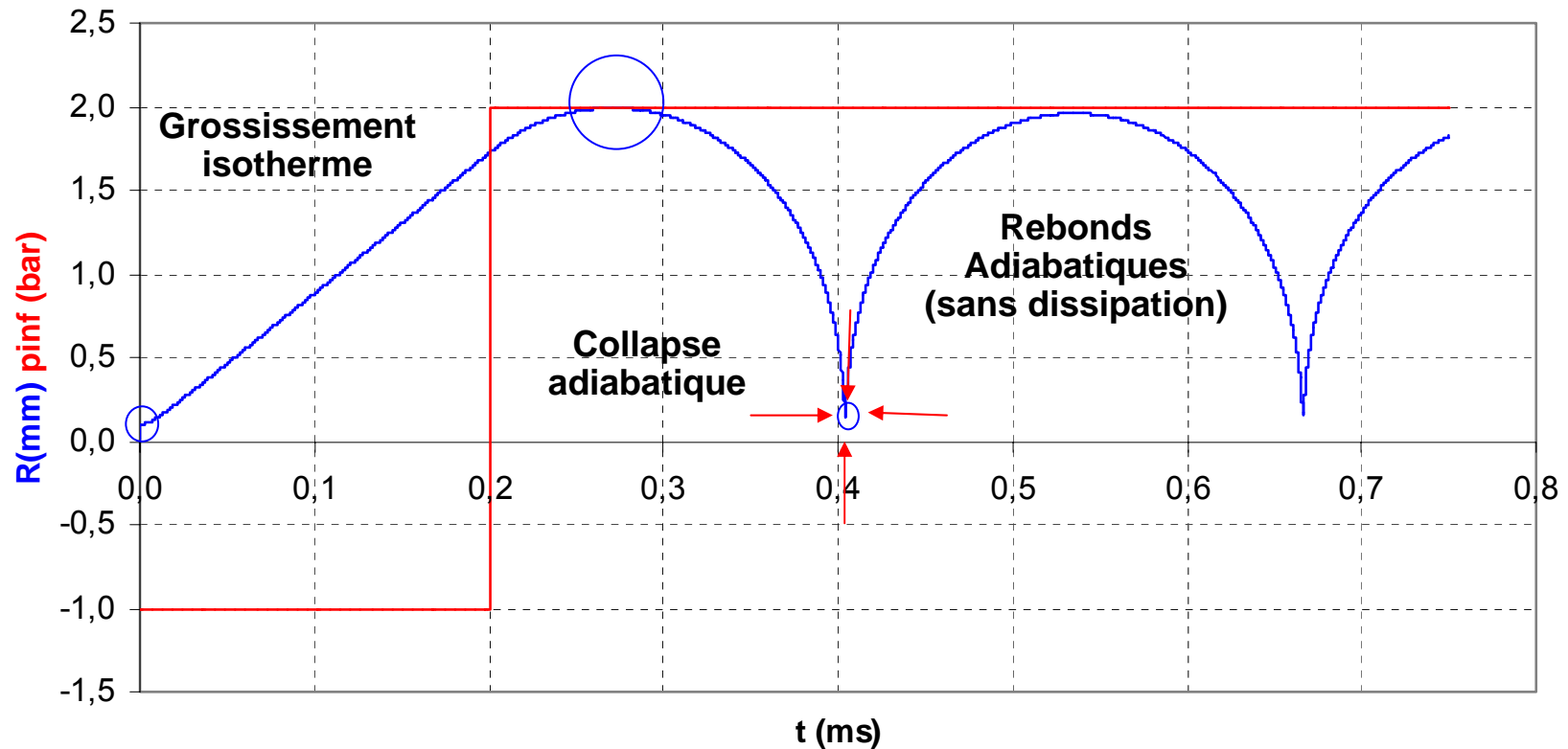
→ **conditions de pression et température extrêmes à l'intérieur de la bulle (émission possible de rayonnements : sonoluminescence).**





## Cavitation hydrodynamique

Dynamique d'une bulle soumise à un échelon de pression

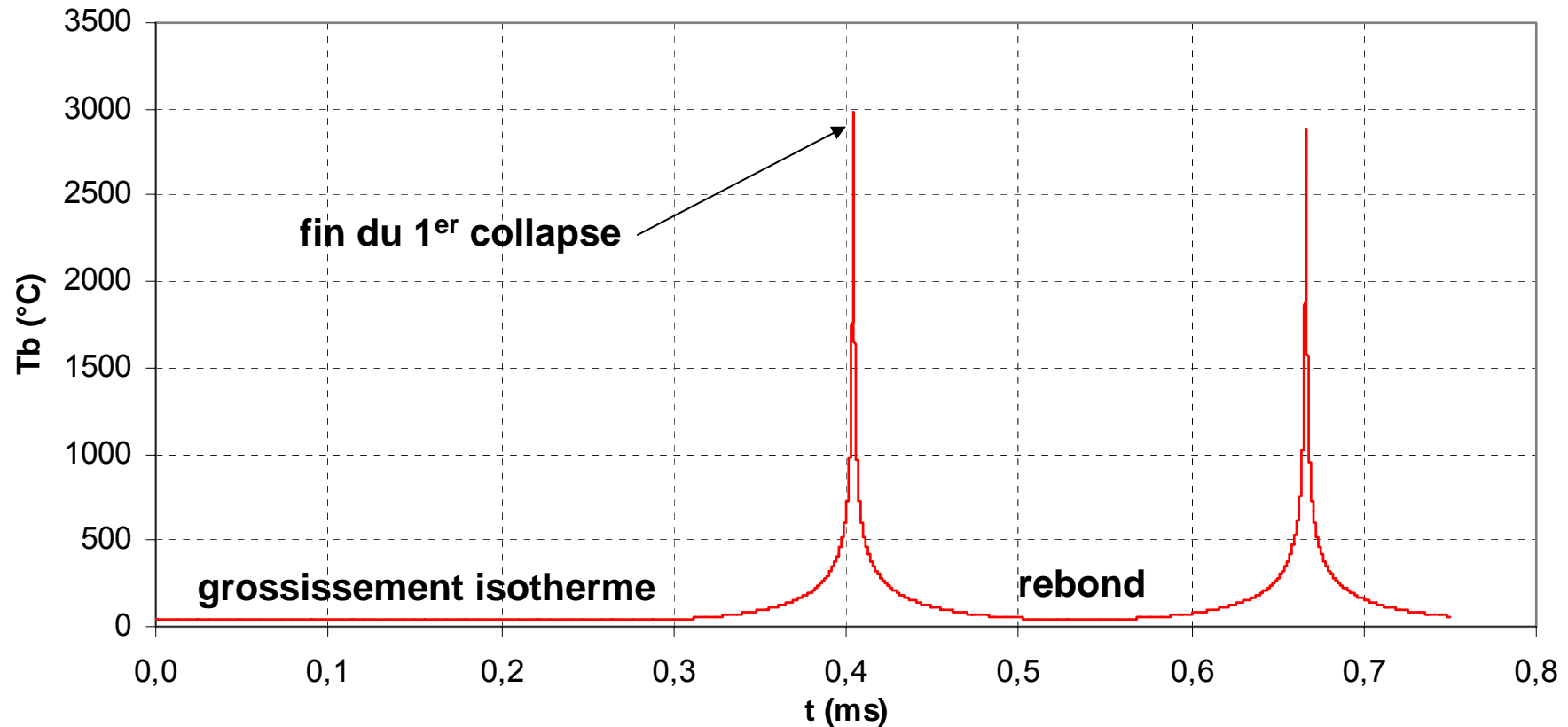


$$R_0 = 100 \mu\text{m} \quad T = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$$



## Cavitation hydrodynamique

### Evolution de la température dans la bulle



$R0 = 100 \mu\text{m}$   $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$



## Dissociation des molécules d'eau

L'eau contenue dans la bulle en fin de collapse est dans un état supercritique propice à la thermolyse des molécules d'eau.

$T > 3000 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $p > 3000 \text{ bar}$



Radicaux hydroxyles = puissants oxydants

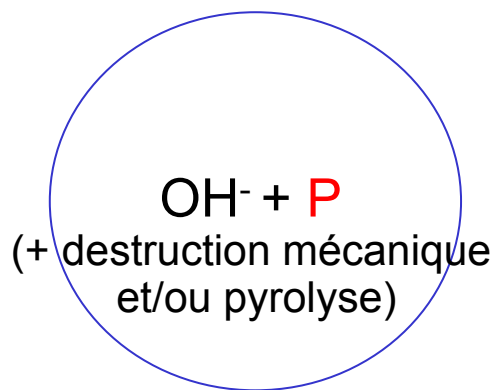
→ **Oxydation possible des molécules organiques**

Durée de vie de cet état supercritique de l'ordre de la microseconde

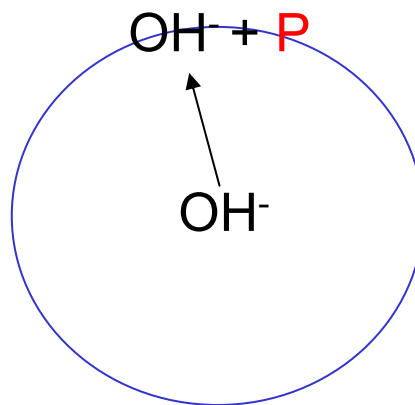


## Oxydation des polluants

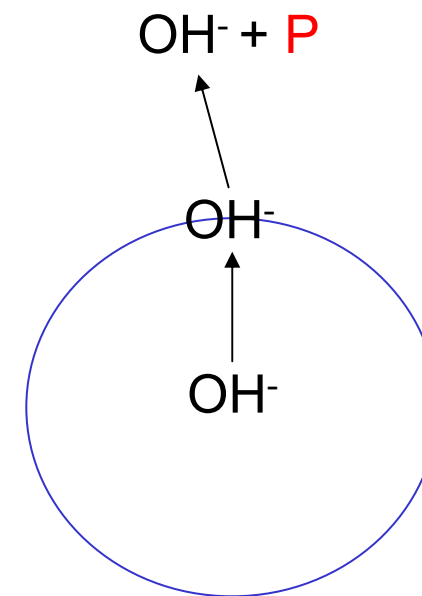
Hypothèse : libération des radicaux au centre des bulles



**Polluant volatil**  
Oxydation en phase gazeuse



**Polluant non volatil hydrophobe**  
Oxydation à l'interface



**Polluant non volatil hydrophile**  
Oxydation en phase liquide

→ l'efficacité du traitement dépend des caractéristiques physico-chimique du polluant et de l'homogénéité du milieu réactionnel



## Cavitation hydrodynamique

### État des lieux

- ─ Phénomènes hydrodynamiques pouvant être d'une extrême complexité (cavitation de mélange).
- ─ En particulier, la géométrie de la chambre de cavitation conditionne le type de cavitation, son intensité et l'homogénéisation de l'écoulement.
- ─ Concept nettement moins étudié dans la littérature que la cavitation acoustique.
- ─ Absence d'étude systématique d'influence des différents paramètres.





## Cavitation hydrodynamique

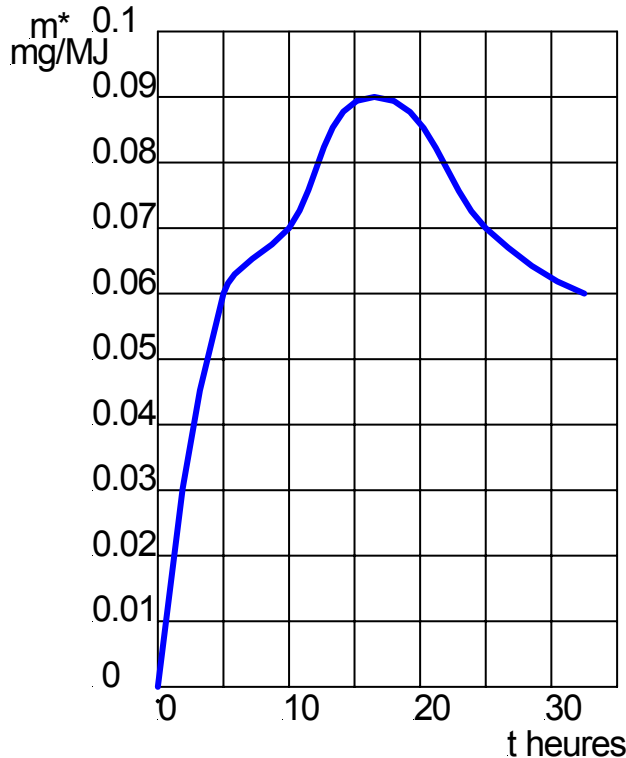
### Intérêt

- Concept de mise en œuvre très simple et applicable à n'importe quelle échelle.
- Certains auteurs annoncent des rendements multipliés par 100 par rapport à la cavitation acoustique.
- Certains concepts existants ont prouvé leur efficacité mais ne semblent pas optimisés.



## Cavitation hydrodynamique vs ultrasonore

(Kalumuck & Chahine 1998)



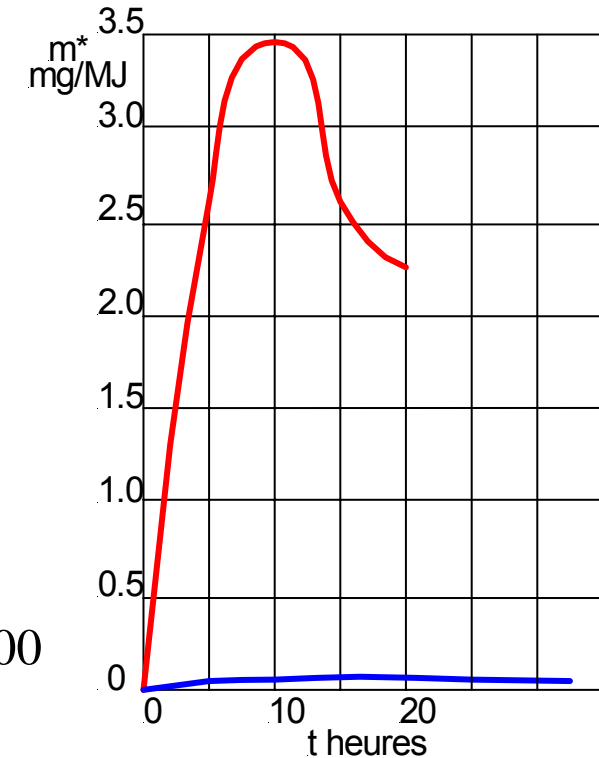
Cavitation ultrasonore  
(20 kHz)

$T = 42\text{ °C}$ ,  $C_0 = 8\text{ ppm}$   
Polluant : p-nitrophénol

**Efficacité :**

$$m^*(t) = \frac{(C_0 - C(t)) * V}{t * P}$$

$$\frac{m^*_{\text{hydro}}}{m^*_{\text{acous}}} \approx 20 \quad \frac{\eta_{\text{hydro}}}{\eta_{\text{acous}}} \approx 100$$

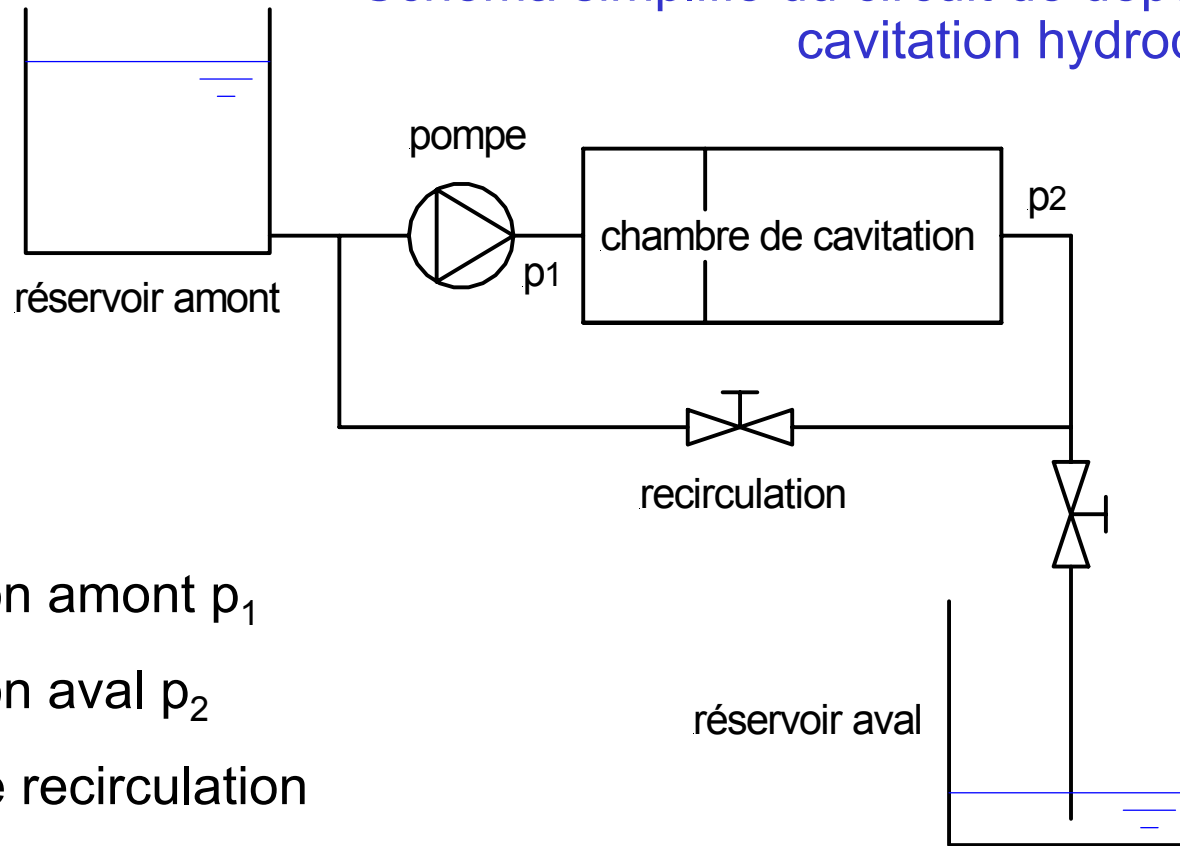


Cavitation hydrodynamique  
(jets cavitants)



## L'installation de traitement

Schéma simplifié du circuit de dépollution par cavitation hydrodynamique

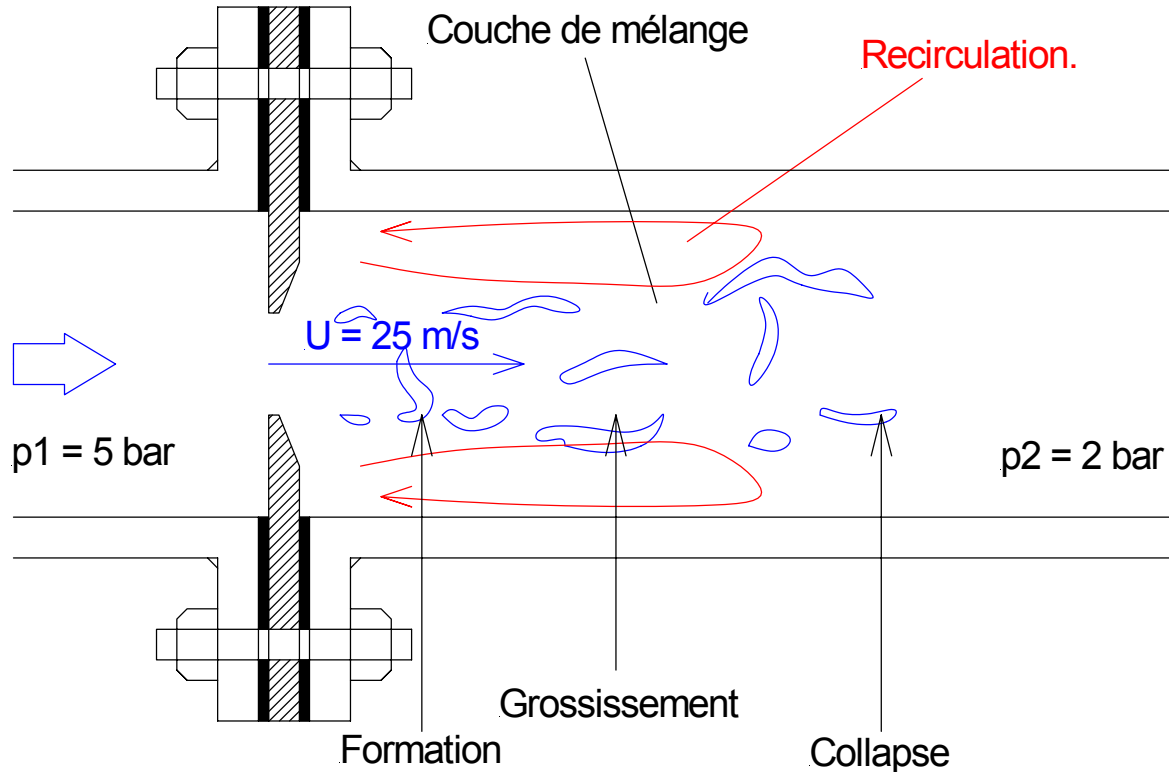


Réglages :

- pression amont  $p_1$
- pression aval  $p_2$
- taux de recirculation



## Chambre de cavitation



La vapeur se forme au cœur de tourbillons instationnaires.

Écoulement diphasique très complexe.

Géométrie de type diaphragme → cavitation de mélange



## Cavitation hydrodynamique

### Association avec d'autres techniques

Possibilité d'associer la cavitation hydrodynamique à des traitements classiques :

UV + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

→ procédé CavOX évalué par l'EPA (Environmental Protection Agency, USA)

Autres traitements envisageables :

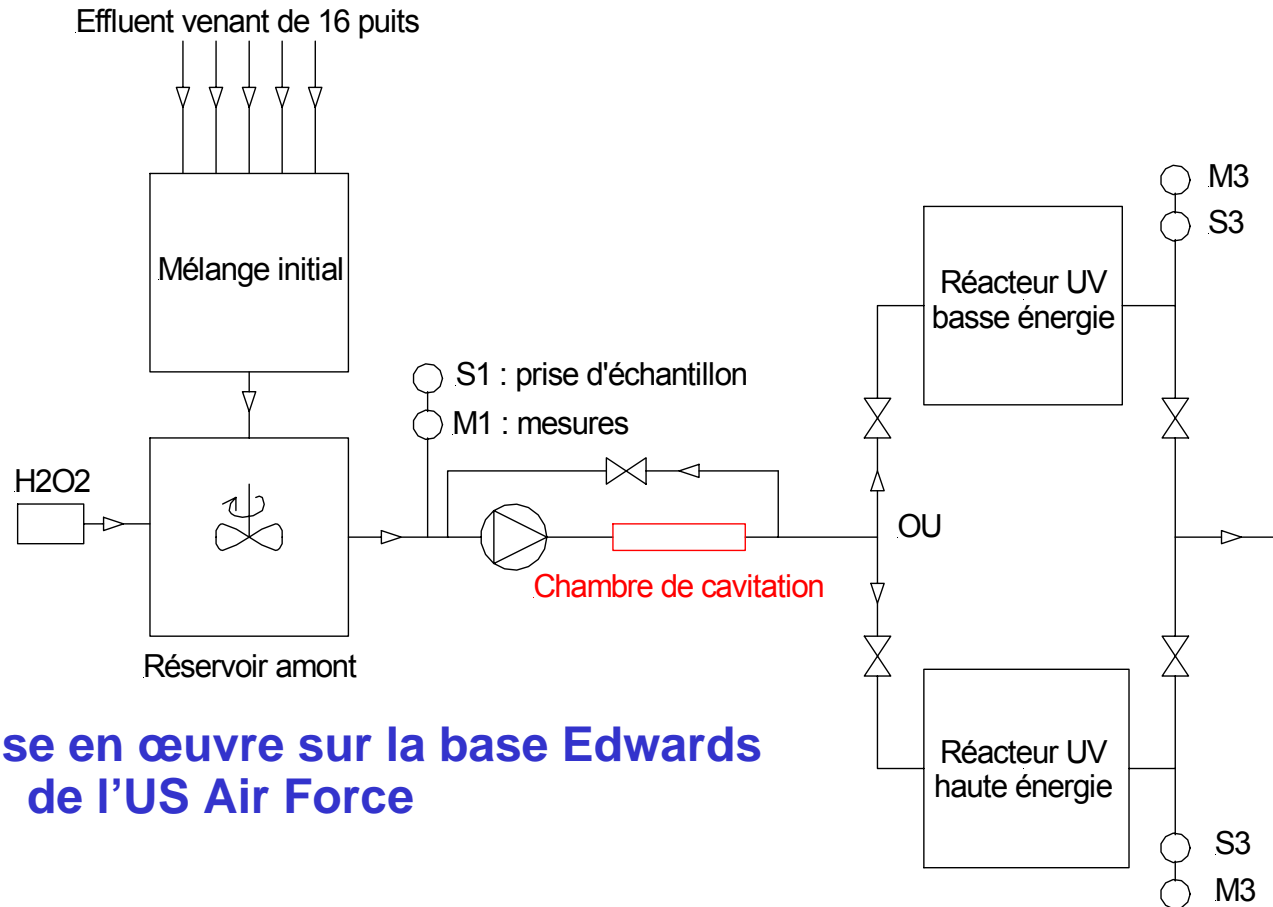
Ozonation

Électrochimie

→ Améliorations notables des performances des dispositifs classiques.



## Procédé CavOX (Magnum Water Technology)



**Installation mise en œuvre sur la base Edwards de l'US Air Force**



## Cavitation hydrodynamique

### Performances envisageables

- CavOX → respect des critères de potabilisation de l'eau (normes US) pour des effluents pollués à 2 ppm en TCE ou Benzène.
- Coût traitement : 0.5 €/m<sup>3</sup> .
- Effet non seulement sur les polluants chimiques mais également sur les microorganismes (i.e. salmonelle, E. Coli)
- Traitement des boues industrielles





## Conclusions

- Traitement chimique de polluants sous l'effet de la cavitation  
= processus complexe encore mal identifié.
- Aptitudes de la cavitation acoustique prouvées mais procédé limité à des débits réduits → Intérêt de la cavitation hydrodynamique.
- Les données bibliographiques relatives à l'utilisation de cavitation hydrodynamique sont très encourageantes.
- Objectif de développement : étude paramétrique systématique et optimisation technico-économique du dispositif.



## Perspectives industrielles

- Brevet en cours de dépôt – 2005
- Financement du projet de pilote par Agence Nationale de la Recherche (ANR ADEME) dans le cadre du programme PRECODD en partenariat avec l'INPG à Grenoble – 2006/2008
- Pilote Échelle 1 sur site industriel : 2008
- Traitement des nappes polluées par des polluants complexes difficilement biodégradables et typiquement les PBTs .