Introduction

La cavitation acoustique, la formation et l'effondrement implosif des bulles, se produisent lorsqu'un liquide est exposé à des ondes ultrasonores intenses [1]. L'implosion de ces bulles peut être suffisamment violente pour mener à d'intéressants effets chimiques, et la bulle agit en tant que *hot spot* localisé générant une température d'environ 5000 K et une pression qui excède les 1000 atmosphères. La phase vapeur des bulles est considérée comme étant un siège où des réactions de combustion et de pyrolyse vont avoir lieu, ce qui induit et accélère diverses réactions chimiques, connu sous le terme de sonochimie [2]. Lors de l'irradiation de l'eau par des ultrasons, les radicaux $HO^{\bullet}$ sont formés par la décomposition thermique de H_2O au moment de l'implosion de la bulle selon la réaction (I.1). En plus de cette dissociation homolytique, la décomposition de H_2O en H_2 et en atome d'oxygène peut être envisageable par la réaction (I.2) [3].

$$H_2O \rightarrow H^{\bullet} + HO^{\bullet} \qquad (I.1)$$

$$H_2O \rightarrow H_2 + O \qquad (I.2)$$

A des températures élevées, la réaction (I.3) peut éventuellement avoir lieu, et les atomes d'oxygène sont convertis en radicaux hydroxyles suivant la réaction (I.4)

$$H^{\bullet} + H_2O \rightarrow HO^{\bullet} + H_2 \qquad (I.3)$$

$$O + H_2O \rightarrow 2HO^{\bullet} \qquad (I.4)$$

Il en résulte alors un excès des radicaux $HO^{\bullet}$ par rapport aux radicaux $H^{\bullet}$, qui vont réagir les uns avec les autres dans la phase gaz de la bulle afin de produire du peroxyde d'hydrogène selon la réaction (I.5) [4].

$$HO^{\bullet} + HO^{\bullet} \rightarrow H_2O_2 \qquad (I.5)$$

Le nombre des radicaux hydroxyles ainsi que celui des espèces chimiques formés par les irradiations ultrasonores dépend considérablement de beaucoup de paramètres expérimentaux tels que la puissance des ultrasons, la fréquence, la température de la solution et la quantité de gaz dissous. Il y a un grand besoin de relier l'efficacité de la réaction sonochimique à l'énergie utilisée pour produire les irradiations ultrasonores [5,6,7].

Plusieurs méthodes de calcul de l'efficacité sonochimique sont valables. Le plus simple paramètre étant la puissance électrique fournie au transducteur. Aussi, on trouve la mesure de la pression sonore par un hydrophone qui est un moyen utile pour déterminer la distribution de l'intensité des ultrasons au sein du sonoréacteur. Par ailleurs, la méthode calorimétrique est souvent employée pour spécifier la puissance ultrasonore dissipée dans la solution. Un grand nombre de chercheurs ont examiné la corrélation entre l'énergie thermique générée et les effets sonochimiques [3].

Les dosimétries chimiques sont proposées comme méthodes directes pour la mesure de l'efficacité sonochimique ainsi qu'un moyen de quantification des espèces oxydantes dans l'intégralité de la solution [8]. Ces dosimétries sont basées sur des réactions d'oxydation ou de réduction se produisant dans des solutions aqueuses. Parmi les dosimétries actuellement utilisées, on cite la dosimétrie de Fricke (l'oxydation de Fe^{2+} en Fe^{3+}), la dosimétrie KI (I^- en I_3^-), la dosimétrie téréphtalate et la formation de H_2O_2 et de l'acide nitrique (HNO_3) [9-12].

Dans le présent chapitre, l'efficacité sonochimique du réacteur opérant à 300 kHz a été estimée par une méthode physique calorimétrique et trois méthodes dosimétriques : dosimétries de Fricke, KI et le dosage de H_2O_2.

I.1. Matériel et méthodes

I.1.1. Réactifs

Lors de cette étude, la préparation de la totalité des solutions a été réalisée en utilisant de l'eau distillée et les différents réactifs employés ont été utilisés sans purification préalable.

- Iodure de potassium (pureté 99% ; formule moléculaire : KI ; poids moléculaire : 166 g/mol) : produit de Riedel de Haën.
- Chlorure de sodium (pureté 99,5% ; formule moléculaire : NaCl ; poids moléculaire : 58,44 g/mol) : produit de Biochem Chemopharma.
- Sel de Mohr (pureté 99% ; formule moléculaire : $Fe(NH_4)_2(SO_4).6H_2O$; poids moléculaire : 392,14 g /mol) : produit de Panreac.
- Ammonium heptamolybdate tétrahydraté (pureté 99% ; formule moléculaire : $(NH_4)_6Mo_7.4H_2O$; poids moléculaire : 1235,86 g/mol) : produit d'Aldrich.

- Acide sulfurique (pureté 96-98% ; formule moléculaire : H_2SO_4 ; poids moléculaire : 8,08 g/mol) : produit de Biochem Chemopharma.
- Hydroxyde de sodium (pureté 99% ; formule moléculaire : NaOH ; poids moléculaire : 40 g/mol) : produit de Biochem Chemopharma.

I.1.2. Appareillage

Les expériences menées le long de ce travail de recherche ont été réalisées à l'aide d'un appareil développé par l'équipe du Professeur C. Pétrier au Laboratoire Rhéologie et Procédés de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, France. Il s'agit d'un réacteur en verre d'une capacité maximale de 500 mL, muni d'une double enveloppe qui sert à maintenir la température constante au sein du réacteur. Les irradiations ultrasonores sont introduites au fond de la solution grâce à une céramique piézo-électrique (ϕ = 4 cm) opérant à une fréquence de 300 kHz et protégée par une plaque circulaire en Pyrex (ϕ = 5 cm). La céramique est alimentée par un générateur d'ultrasons permettant de travailler à différentes puissances électriques.

Les puissances acoustiques dissipées dans le réacteur ont été déterminées par la méthode calorimétrique. La Figure I.1 présente un schéma simplifié du réacteur employé.

Le prélèvement d'échantillons pour le suivi du traitement en cours a été effectué par pipetage d'une certaine quantité de solution pendant des intervalles de temps bien définis. La mesure de la concentration des espèces au cours de la sonolyse a été réalisée dans des cuves en quartz de 1 cm de trajet optique à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible (JENWAY). La résolution de la longueur d'onde et la largeur de la bande sont de 1 nm et 0,5 nm respectivement.

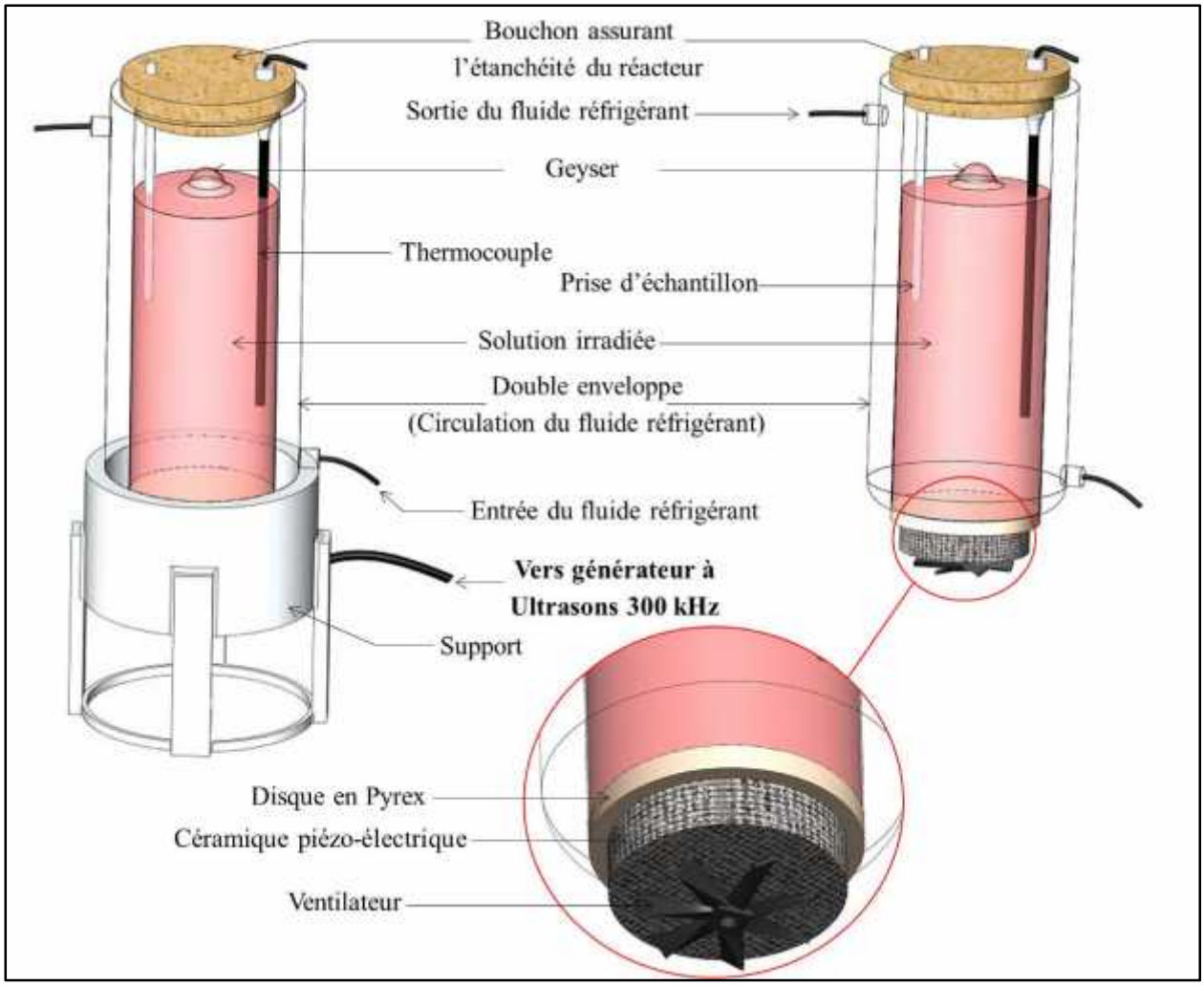

Figure I.1 : Schéma du sonoréacteur opérant à 300 kHz.

I.1.3. Méthodes

Souvent, seule la consommation de l'alimentation électrique est indiquée pour définir la puissance d'un équipement ultrasonore. Cependant, des écarts entre les valeurs de la puissance électrique consommée ($P_{élec}$) par l'équipement et celles de la puissance réellement dissipée dans le fluide sont constatés. C'est pourquoi la majorité des chercheurs estime que la méthode d'évaluation de la puissance acoustique (P_{acous}) par mesure calorimétrique est satisfaisante et pratique. Au-dessus du seuil de cavitation, une partie de l'énergie acoustique est convertie en chaleur [13].

La quantification des espèces oxydantes dans le sonoréacteur a été réalisée par l'irradiation d'un volume connu de trois solutions aqueuses, celle de l'iodure de

potassium, de Fricke et de l'eau distillée pour les dosimétries KI et de Fricke et la formation du peroxyde d'hydrogène respectivement.

Les solutions de KI utilisées pour cette dosimétrie sont préparées par la dissolution d'une masse de KI égale à 16,6 g dans 1L d'eau distillée soit une concentration de 0,1M. La formation des ions I_3^- à partir des ions I^- lors de la sonolyse des solutions de KI est mesureé par spectrophotométrie UV-Visible à une longueur d'onde maximale de 353 nm (ε = 26300 L/mole cm) [3,5,14].

La solution de Fricke a été préparée par dissolution de $Fe(NH_4)_2(SO_4).6H_2O$ (1 mM), H_2SO_4 (0,4 M) et NaCl (1 mM) dans l'eau distillée [3]. La solution obtenue a été irradiée par ultrasons et l'absorbance de Fe^{3+} formé dans la solution a été mesurée à 303 nm (ε = 2197 L/mole cm) [3,5,14].

La concentration du peroxyde d'hydrogène formé au cours de la sonolyse de l'eau a été déterminée par la méthode iodométrique [14-17]. L'ion I^- réagit avec le H_2O_2 pour former l'ion I_3^- qui absorbe fortement à 353 nm (ε = 26300 L/mole cm). L'analyse de H_2O_2 produit a été réalisée en mélangeant dans une cuve en quartz 200 µL d'une aliquote de solution pipetée à partir du réacteur, 1 mL d'une solution de KI (0,1 M) et 20 µL d'heptamolybdate d'ammonium (0,01 M) [14,16]. Le mélange est bien agité et laissé pendant 5 minutes avant la mesure de l'absorbance [14,16].

I.2. Résultats et discussion

I.2.1. Méthode calorimétrique

Une partie de l'énergie acoustique est convertie en chaleur lors de la propagation des ondes ultrasonores dans un milieu liquide, qui se traduit par l'augmentation de la température du liquide de quelques dizaines de degrés pour une durée de quelques minutes, si le système n'est pas thermostaté. Le fait de remonter à la puissance électrique consommée autorise des comparaisons énergétiques [14-20].

Si la masse du liquide soumise aux ultrasons m (en kg) et sa capacité calorifique massique à pression constante C_p (en J/kg.K) sont connues, l'élévation de la température par unité de temps ((dT/dt) en K/s) induite par le passage des ultrasons peut facilement être convertie en apport d'énergie, en utilisant l'équation (I.1) [21-22] :

$$P_{ac} = m\, C_p \left(\frac{dT}{dt}\right)_{t \to 0} \qquad (I.1)$$

La détermination des puissances acoustiques dissipées au sein des solutions irradiées a été réalisée en faisant varier les puissances électriques fournies par le générateur, et en mesurant l'élévation de la température de l'eau distillée durant 300 secondes (Figure I.2). On note que la double enveloppe du sonoréacteur est vidée pour minimiser les échanges de chaleur [21-22].

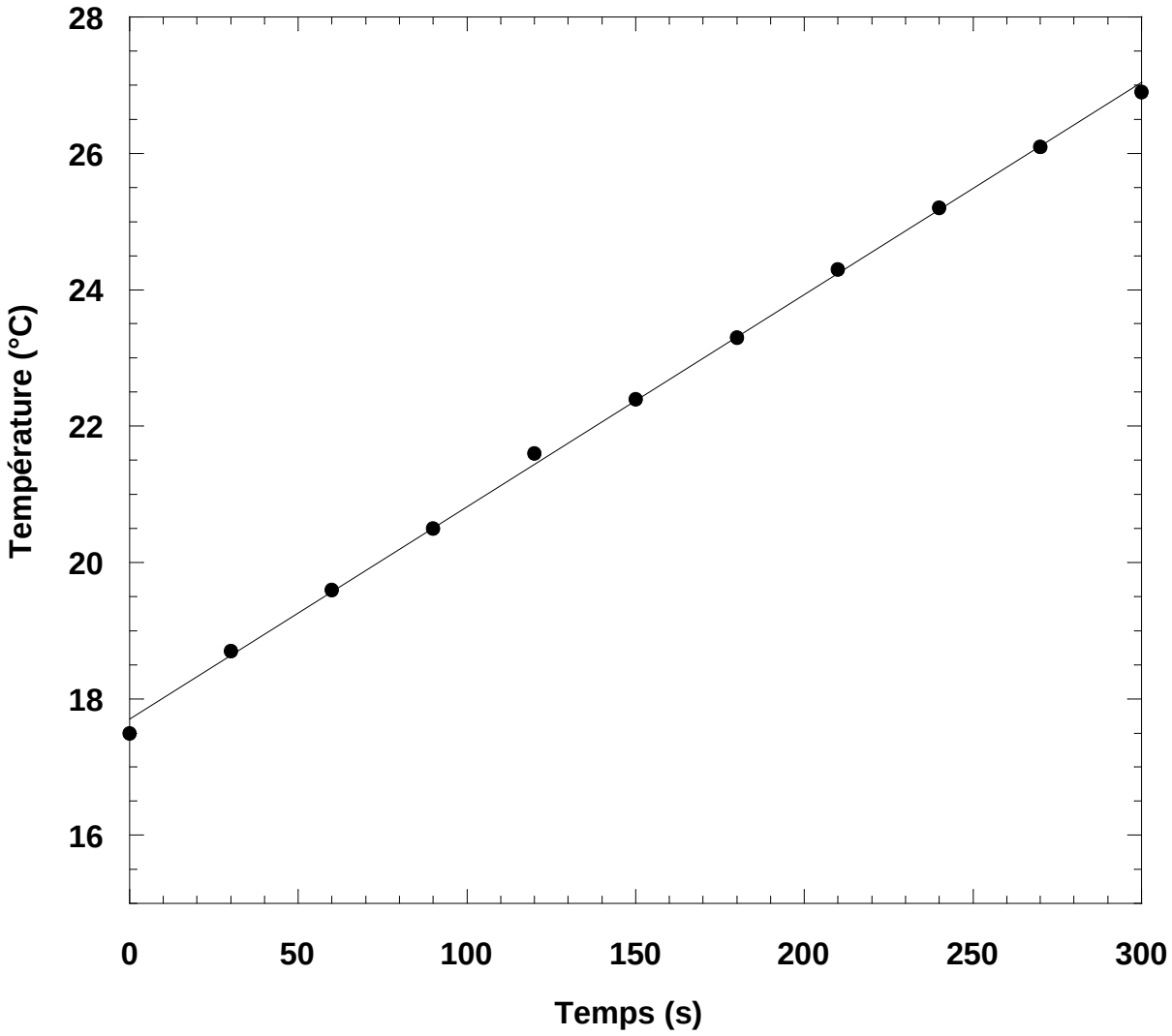

Figure I.2 : Variation de la température en fonction du temps lors de la sonolyse de l'eau (Conditions : V = 300 mL ; f = 300 kHz ; $P_{élec}$ = 80 W).

La Figure I.3 montre clairement la relation proportionnelle entre les énergies électriques délivrées (imposées) par le générateur et les énergies acoustiques dissipées (calculées) dans le réacteur. Des résultats similaires ont été trouvés par Kimura et al. et Hamdaoui et al. [23-25].

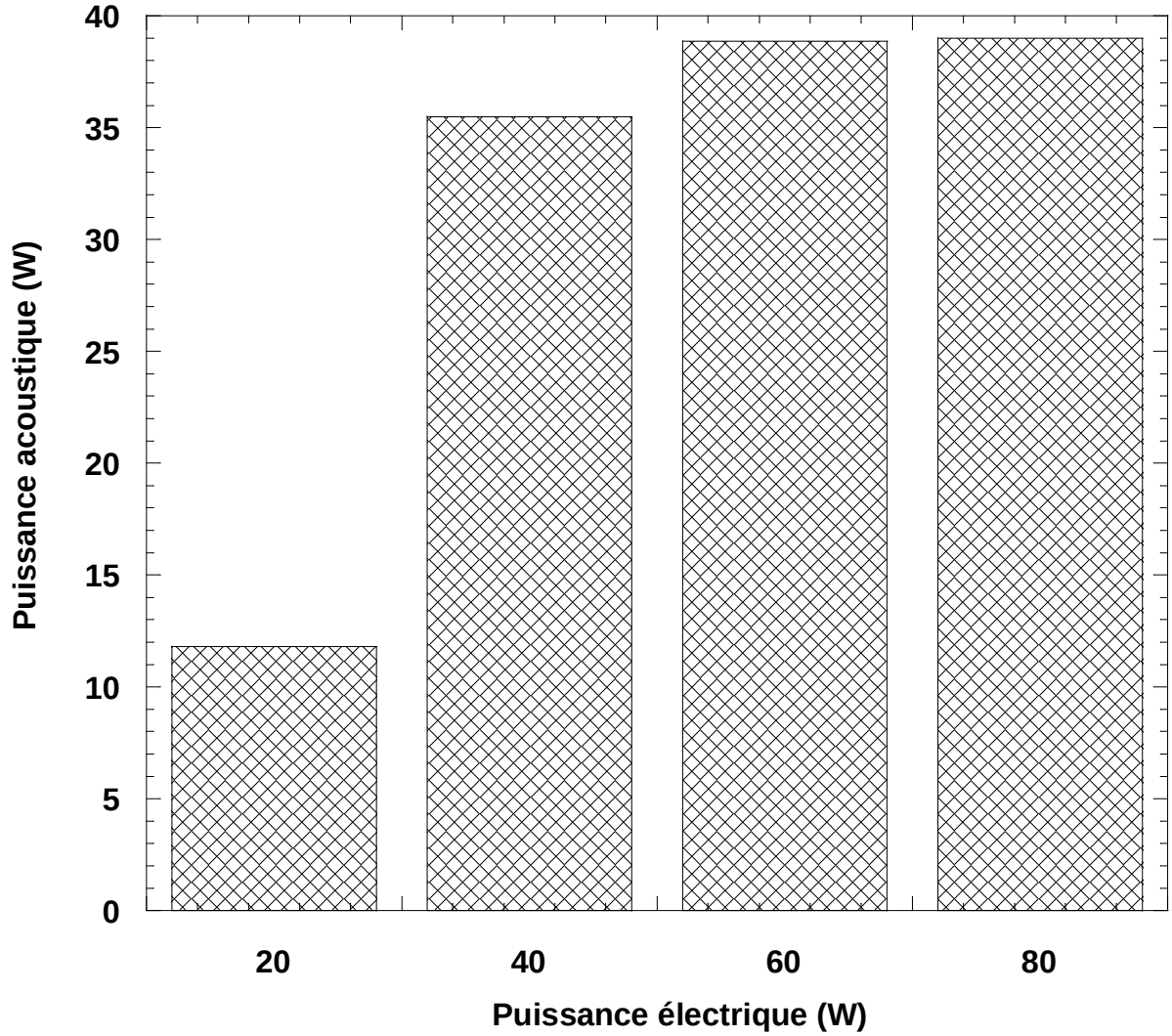

Figure I.3 : Variation de la puissance acoustique dissipée dans le système en fonction de la puissance électrique fournie par le générateur. (Conditions : V = 300 mL ; f = 300 kHz).

I.2.2. Dosimétrie KI

Dans la dosimétrie KI, les radicaux $HO^{\bullet}$ générés oxydent les ions d'iode (I^-) en diiode (I_2). L'excès des ions I^- dans la solution va réagir avec les I_2 pour former les ions triiodures (I_3^-). Ces derniers sont détectés par spectrophotométrie à 353 nm. La génération des ions triiodures durant l'irradiation est illustrée par les réactions (I.7) à (I.10) [3] :

$$HO^{\bullet} + I^- \rightarrow OH^- + I \qquad (I.7)$$

$$I + I^- \rightarrow I_2^- \qquad (I.8)$$

$$2I_2^- \rightarrow I_2 + 2I^- \qquad (I.9)$$

$$I_2 + I^- \rightarrow I_3^- \qquad (I.10)$$

La production des ions I_3^- durant 60 min de sonolyse à une fréquence de 300 kHz et des puissances électriques imposées allant de 20 W à 80 W varie linéairement, comme illustré sur la Figure I.4. Cette figure montre aussi la relation proportionnelle entre les teneurs en I_3^- produites et les puissances électriques délivrées par le générateur. Après 30 min de sonolyse, les concentrations prennent des valeurs croissantes de 36,92, 89,54, 106,46 et 145,06 pour des puissances croissantes de 20, 40, 60 et 80 W respectivement.

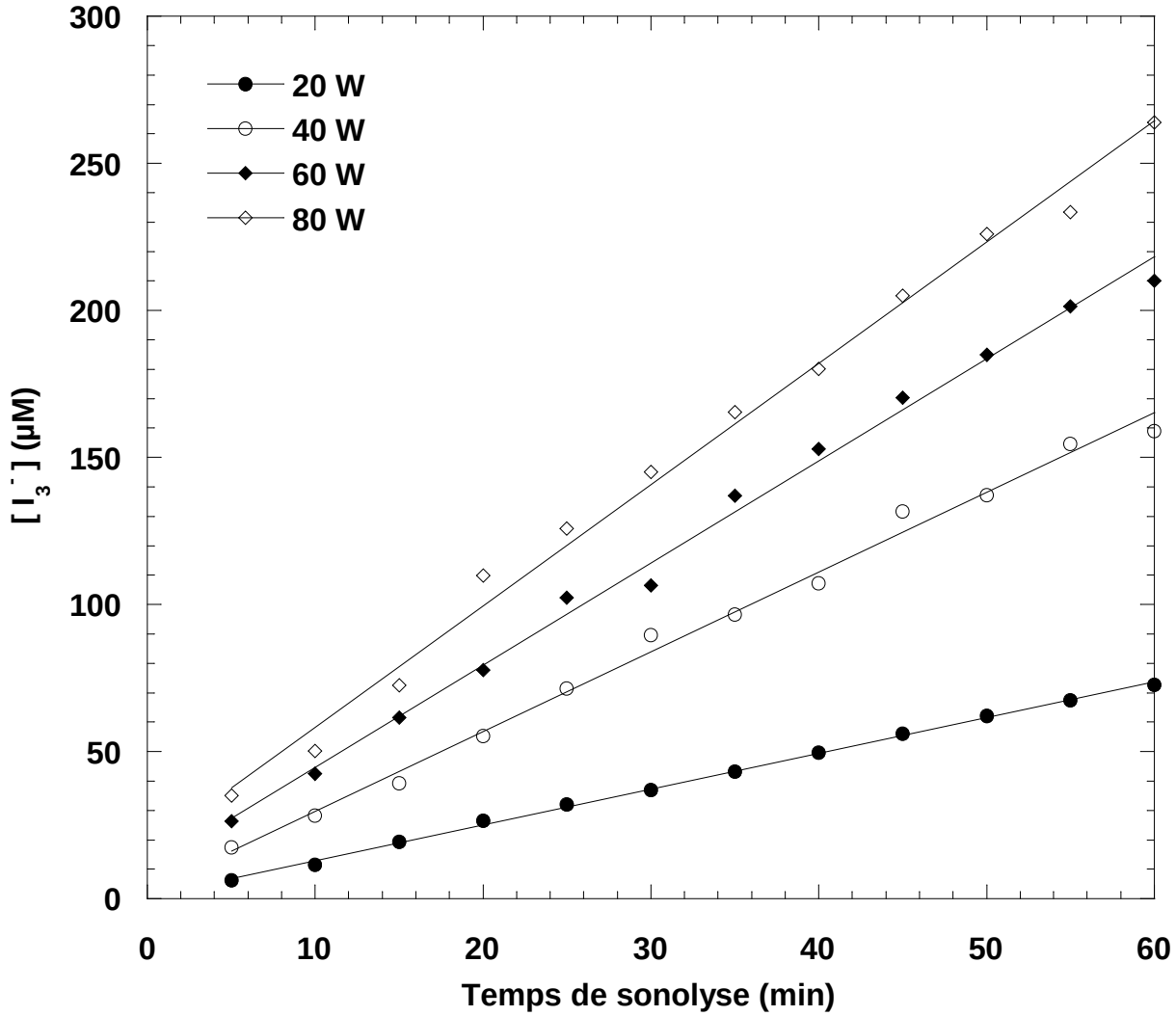

Figure I.4 : Évolution des concentrations des ions I_3^- en fonction de la puissance électrique fournie par le générateur (V = 300 mL ; f = 300 kHz ; [KI] = 0,1 M ; T= 25±2°C).

L'augmentation de la concentration des ions I_3^- avec la puissance électrique peut être expliquée par l'augmentation du nombre de bulles de cavitation [26]. Lorsque la puissance acoustique augmente, l'énergie acoustique transmise au réacteur augmente

[27]. En raison de cette énergie, la pulsation et l'effondrement des bulles de cavitation s'effectuent rapidement [22,23], le nombre des bulles de cavitation augmente et, par conséquent, une concentration élevée des radicaux $HO^{\bullet}$ est induite dans la solution de KI permettant ainsi l'augmentation de la quantité des ions I_3^- formés [27,28].

A 900 kHz, Entezari et Kruus [29] ont rapporté que la formation de triiodure croît linéairement avec la puissance acoustique dans l'intervalle 8 à 76 W. Weissler et al. [30] ont montré à 1 MHz que la production de I_3^- augmente avec la puissance ultrasonore jusqu'à 600 W. Gutierrez et Henglein [31] ont indiqué que la vitesse d'oxydation de I^- est proportionnelle à la puissance acoustique.

I.2.3. Dosimétrie de Fricke

Lors du passage des ultrasons au sein des solutions de Fricke, les ions Fe^{2+} dans la solution sont oxydés en Fe^{3+} par les radicaux hydroxyles, par le peroxyde d'hydrogène et par $HOO^{\bullet}$ à pH acides, l'ion ferrique et détecté à 303 nm avec (ε = 2197 L/mole cm). L'oxydation se fait selon les réactions (I.11) à (I.13) [3,5] :

$$HO^{\bullet} + Fe^{2+} + H^+ \rightarrow H_2O + Fe^{3+} \quad (I.11)$$

$$H_2O_2 + Fe^{2+} + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + H_2O + HO^{\bullet} \quad (I.12)$$

$$HOO^{\bullet} + Fe^{2+} + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + H_2O_2 \quad (I.13)$$

La concentration des ions Fe^{3+} formés évolue linéairement en fonction du temps de l'irradiation de 300 mL de solution de Fricke à 80 W et 300 kHz, et la Figure I.5 montre qu'après 30 min de sonolyse la concentration en Fe^{3+} est égale à 358,67 µM.

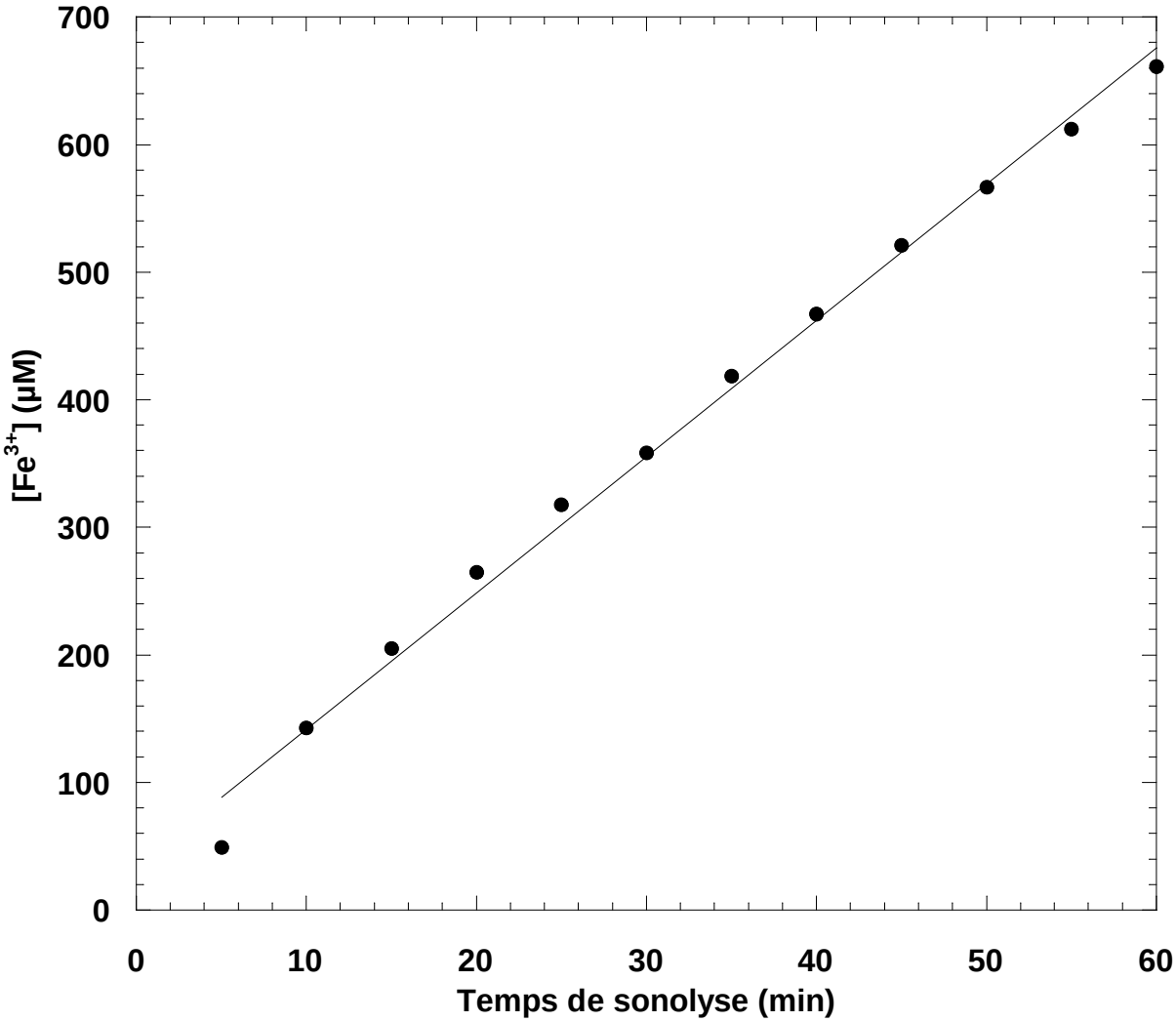

Figure I.5 : Formation des ions Fe^{3+} en fonction du temps
(V = 300 mL ; f = 300 kHz ; $P_{élé}$= 80 W ; T = 25°C±2)

I.2.4. Quantification du peroxyde d'hydrogène

La troisième zone de réactivité sonochimique est le volume de la solution qui entoure la bulle de cavitation, cette zone est caractérisée par une température ambiante, et l'existence d'espèces oxydantes ayant une durée de vie relativement élevée telles que le H_2O_2, comme indiqué dans le chapitre précédent [32].

Afin de quantifier le H_2O_2 produit lors de la sonolyse de l'eau, la méthode iodométrique a été choisie. La réaction (I.14) est une réaction très lente et sera accélérée par les ions heptamolybdates qui agissent comme catalyseur. L'excès de I^- va réagir avec I_2 pour former les ions I_3^- réaction (I.15) qui représenteront l'espèce à surveiller durant la sonolyse par spectrophotométrie à 353 nm (ε = 26300 L/mole cm) [3,5].

$$H_2O_2 + 2I^- + 2H^+ \rightarrow I_2 + H_2O \quad (I.14)$$

$$I_2 + I^- \rightarrow I_3^- \quad (I.15)$$

Les expériences menées pour le dosage de H_2O_2 ont été réalisées par l'application d'un champ ultrasonore de 300 kHz de fréquence et une puissance variant de 20 à 80 W à un volume de 300 mL d'eau distillée suivant le protocole spécifique de ce dosage. La Figure I.6 exprime clairement l'évolution linéaire de la quantité produite du peroxyde d'hydrogène en fonction du temps et ce pour les quatre différentes puissances.

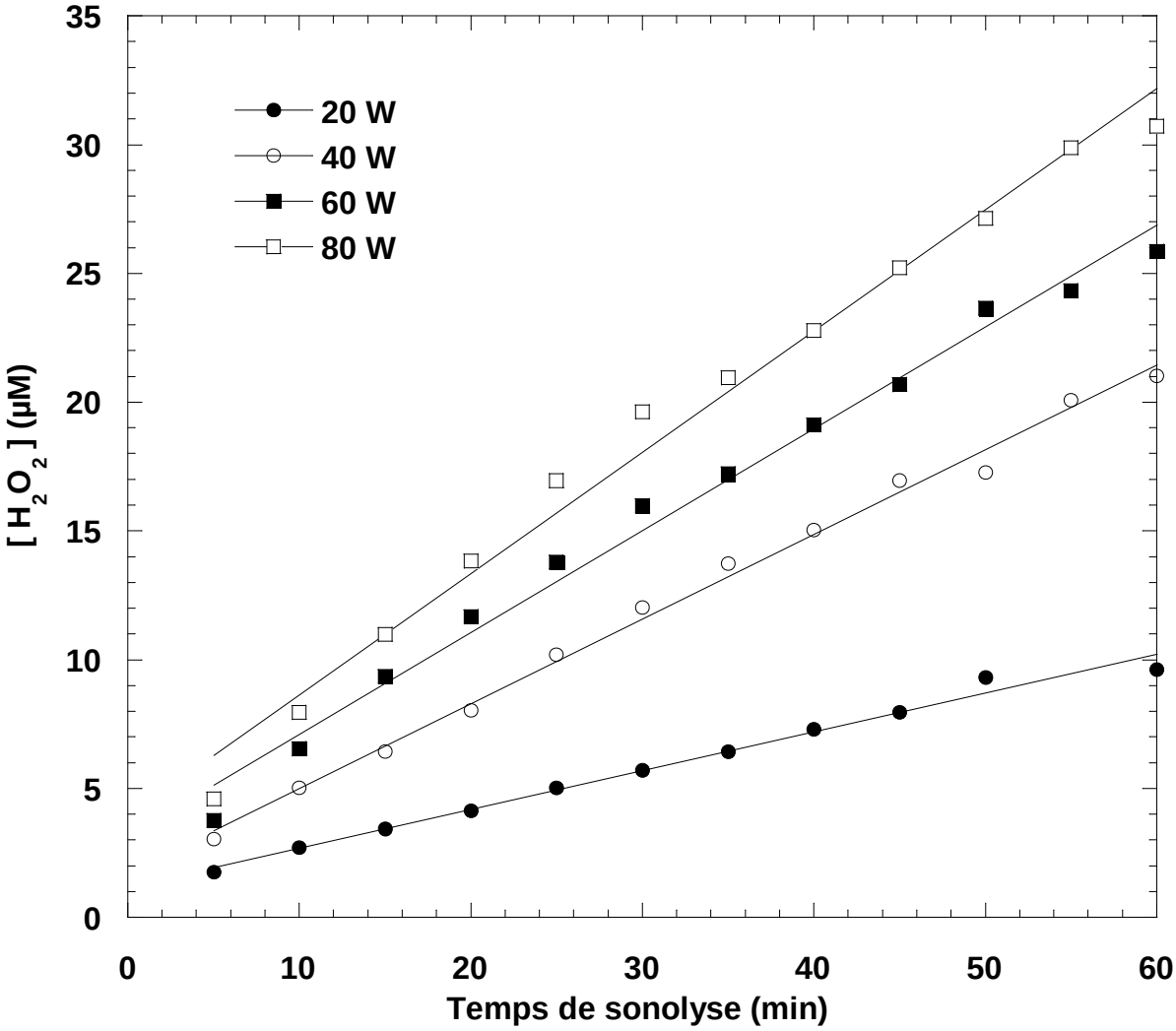

Figure I.6 : Évolution de la concentration de H_2O_2 en fonction de la puissance électrique fournie par le générateur (V = 300 mL ; f = 300 kHz ; T= 25±2°C)

A partir de la Figure I.6, il est aussi observé que la quantité de H_2O_2 produite augmente avec l'augmentation de la puissance électrique. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du nombre de bulles actives [33]. Lorsqu'une puissance acoustique

élevée est appliquée, les bulles de cavitation sont exposées à des dépressions très élevées lors des cycles de dilatation et à des compressions très importantes au cours des cycles de compression. Au moment de l'implosion, cette énergie potentielle est convertie en réactions chimiques [34]. La durée de l'implosion, la température et la pression générées sont liées à l'intensité ultrasonore, et les implosions seront d'autant plus violentes que l'intensité sera élevée [28]. Il en résulte ainsi une augmentation des effets sonochimiques dans les bulles lors de l'implosion, ce qui accélère la vitesse de production de H_2O_2 dans la solution.

Conclusion

La caractérisation du sonoréacteur utilisé pour la dégradation du Basic Red 29 a été faite par la méthode calorimétrique et trois dosimétries (KI, Fricke et dosage du H_2O_2). Les résultats obtenus montrent que :

- Pour un volume d'eau de 300 mL, les puissances acoustiques dissipées calculées par la méthode calorimétrique sont proportionnelles aux puissances électriques. Pour une puissance électrique de 80 W, on enregistre une puissance acoustique de 39 W.

- La quantité produite des ions triiodures augmente avec l'élévation de l'intensité des ondes ultrasonores, lors de la dosimétrie KI, les concentrations de I_3^- sont estimées à 36,92, 89,54, 106,46 et 145,06 µM pour respectivement des puissances électriques de 20, 40, 60 et 80 W après 30 min d'irradiation.

- Pour la dosimétrie de Fricke, et pour un volume de 300 mL et une puissance de 80 W, on note une teneur égale à 358,67 µM en Fe^{3+} après 30 min d'irradiation.
- La puissance acoustique est un paramètre opératoire qui affecte la production de H_2O_2. L'accumulation de H_2O_2 dans la solution augmente avec la puissance acoustique.

Références bibliographiques

[1] K. Yasui, T. Tuziuti, Y. Iida, H. Mitome, Theoretical study of the ambient-pressure dependence of sonochemical reactions, The Journal of Chemical Physics 119 (2003) 346-356.

[2] T.J. Mason, Sonochemistry, Oxford University Press, New York, 1999.

[3] Y. Iida, K. Yasui, M. Sivakumar, Sonochemistry and its dosimetry, Microchemicaljournal 80 (2005) 159-164.

[4] K. Yasui, Temperature in multibubble sonoluminescence, The Journal of Chemical Physics 115 (2001) 2893.

[5] S. Koda, T. Kimura, T. Kondo, H. Mitome, A standard method to calibrate sonochemical efficiency of an individual reaction system, Ultrasonics Sonochemistry 10 (2003) 149-156.

[6] T. Tuziuti, S. Hatanaka, K. Yasui, T. Kozuka, H. Mitome, Influence of dissolved oxygen content on multibubble sonoluminescence with ambient-pressure reduction, Ultrasonics 40 (2002) 651-654.

[7] N. Segebarth, O. Eulaerts, J. Reisse, L.A. Crum, T.J. Matula, Correlation between acoustic cavitation noise, bubble population, and sonochemistry, Journal of Physical Chemistry B 106 (2002) 9181-9190.

[8] J. Berlan, T.J. Mason, in: T.J. Mason (Ed.), Advances in Sonochemistry 4 (1996) p.1 (Chapter 1).

[9] G. Mark, A. Tauber, R. Laupert, H.P. Schuchmann, D. Schultz, A. Mues, C. von Sonntag, OH-radical formation by ultrasound in aqueous solution-Part II, Terephthalate and Fricke dosimetry and the influence of various conditions on the sonolitic yield, Ultrasonics Sonochemistry 5 (1998) 41-52.

[10] H. Fricke, E.J. Hart, The decomposition of water by X-rays in the presence of the iodide or bromide ion, The Journal of Chemical Physics 3 (1935) 30.

[11] A.K. Jana, S.N. Chatterjee, Estimation of hydroxyl free radicals produced by ultrasound in Fricke solution used as a chemical dosimeter, Ultrasonics Sonochemistry 2 (1995) S87-S91.

[12] H. Nomura, S. Koda, K. Yasuda, Y. Kojima, Quantification of ultrasonic intensity based on the decomposition reaction of porphyrin, Ultrasonics Sonochemistry 3 (1996) S153- S156.

[13] H. Guéguen, Recherches sur les effets chimiques suscités par les ultrasons dans les solutions aqueuses de quelques halogénures, Annales de Chimie 8 (1963) 667-713.

[14] H. Ghodbane, O. Hamdaoui, Degradation of Acid Blue 25 in aqueous media using 1700 kHz ultrasonic irradiation: Ultrasound/Fe(II) and ultrasound/H_2O_2 combinations, Ultrasonics Sonochemistry 16 (2009) 593-598.

[15] C. Pétrier, M.F. Lamy, A. Fracony, A. Benahcene, B. David, Sonochemical degradation of phenol in dilute aqueous solution: comparison of the reaction rates at 20 and 487 kHz, Journal of Physical Chemistry 98 (1994) 10514-10520.

[16] H. Ghodbane, O. Hamdaoui, Intensification of sonochemical decolorization of anthraquinonic dye Acid Blue 25 using carbon tetrachloride, Ultrasonics Sonochemistry 16 (2009) 455-461.

[17] Y. Jiang, C. Pétrier, T.D. Waite, Effect of pH on the ultrasonic degradation of ionic aromatic compounds in aqueous solution, Ultrasonics Sonochemistry 9 (2002) 163-168.

[18] T.J. Mason, J.P. Lorimer, D.M. Bates, Y. Zhao, Dosimetry in sonochemistry: the use of aqueous terephtalate ion as a fluorescence monitor, Ultrasonics Sonochemistry 1 (1994) S91-S95.

[19] C. Pétrier, A. Fracony, Ultrasonic waste-water treatment: incidence of ultrasonic frequency on the rate of phenol and carbon tetrachloride degradation, Ultrasonics Sonochemistry 4 (1997) 295-300.

[20] M.R. Hoffmann, I. Hua, R. Hochemer, Application of ultrasonic irradiation for the degradation of chemical contaminants in water, Ultrasonics Sonochemistry 3 (1996) S163-S172.

[21] C. Pétrier, D. Casadonte, The sonochemical degradation of aromatic and chloroaromatic contaminants, Advances in Sonochemistry 6 (2001) 91-109.

[22] M. Goela, H. Hongqianga, A.S. Mujumdarb, M.B. Ray, Sonochemical decomposition of volatile and non-volatile organic compounds -a comparative study-, Water Research 38 (2004) 4247-4261.

[23] T. Kimura, T. Sakamoto, J.M. Lévêque, H. Sohmiya, M. Fujita, S. Tkeda, T. Ando, Standardization of ultrasonic power for sonochemical reaction, Ultrasonics Sonochemistry 3 (1996) S157-S161.

[24] S. Merouani, Dégradation sonochimique de la Rhodamine B en solutions aqueuses: Effets des ions hydrogénocarbonates et carbonates et des matrices complexes, Mémoire de Magister, Université Badji Mokhrat-Annaba, Algérie, 2010.

[25] O. Moumeni, O. Hamdaoui, C. Pétrier, Sonochemical degradation of malachite green in water, Chemical Engineering and Processing 62 (2012) 47– 53.

[26] S. Findik, G. Günduz, E. Günduz, Direct sonication of acetic acid in aqueous solution, Ultrasonics Sonochemistry 13 (2006) 203-207.

[27] O. Hamdaoui, E. Naffrechoux, Sonochemical and photosonochemical degradation of 4-chlorophenol in aqueous media, Ultrasonics Sonochemistry 15 (2008) 981-987.

[28] M. Dükkanci, G. Günduz, Direct sonication of oxalic acid in aqueous solution, Ultrasonics Sonochemistry 13 (2006) 517-522.

[29] M. Entezari, P. Cruus, Effet of frequency on sonochemical reactions. I: oxidation of iodide, Ultrasonics Sonochemistry l (1994) S75-S79.

[30] A. Weissler, H. Cooper, S. Snyder, Chemical effect of ultrasonic waves: oxidation of potassium iodide solution by carbon tetrachloride, Journal of the American Chemical Society 72 (1950) 1769-1775.

[31] M. Gutierrez, A.J. Henglein, Chemical action of pulsed ultrasound: observation of an unprecedented intensity effect, Journal of Physical Chemistry 94 (1990) 3625-3628.

[32] K. Yasui, Fundamentals of Acoustic Cavitation and Sonochemistry: Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems, Springer sciences, New Delhi, India, 2011.

[33] M.H. Lim, S.H. Kim, Y.U. kim, J. Khime, Sonolysis of chlorinated compounds in aqueous solution, Ultrasonics Sonochemistry 14 (2007) 93-98.

[34] T.J. Mason, J.P. Lorimer, Applied sonochemistry: use of power ultrasound in chemistry and Processing, Wiley VCH Herlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, 2002.