# *Tp 2 : Dynamique de croissance de bulles au sein d'une boisson gazeuse.*

L'objectif de ce TP est de caractériser/mesurer la dynamique de croissance d'une bulle dans un liquide sursaturé avec un gaz. On veut notamment caractériser l'évolution du rayon dans le temps en fonction de la sursaturation. Ainsi on s'attend à ce que plus le liquide est sursaturé en gaz, plus le rayon augmente rapidement dans le temps.
Au delà des applications pour l'industrie agro-alimentaire, on s'attend à ce que cette dynamique se retrouve dans des situations telles que le volcanisme et le dégazage des magmas, ou encore les processus industriels de formation des mousses à base de polymères.

## *Manipulation.*

Le dispositif expérimental est relativement simple. Initialement le liquide est de l'eau déminéralisée. Un « carbonator » permet d'y dissoudre du dioxyde de carbone sous pression. On prendra des précautions pour que la concentration en $CO_2$ dans la solution corresponde à la valeur d'équilibre avec le gaz sous pression. La concentration en solution est alors donnée par la loi de Henry :
$c_i = k_H.P_{CO2}$, où $c_i$ est la concentration en gaz dissous dans le liquide et $P_{CO2}$ la pression partielle de $CO_2$ dans le gaz. La pression totale dans la bouteille est donnée par un manomètre connecté au bouchon.

On diminue la pression en ouvrant le bouchon afin de se mettre à pression atmosphérique. Du fait de la loi de Henry, la nouvelle concentration de saturation $c_0$ est alors plus petite que $c_i$ ; du gaz doit donc passer sous forme gazeuse pour rétablir l'équilibre. La nucléation des bulles est hétérogène (liée à la présence d'impuretés).

Lors de cette manipulation, on cherche à isoler un site de nucléation de bulles sur la paroi de la bouteille. On voit une bulle croître dans le temps. Celle-ci finit par se détacher et une autre bulle est nuclée et croît à son tour. Prenez les précautions suivantes :

1) le site de nucléation est suffisamment isolé des autres pour qu'il n'y ait pas d'interactions avec d'autres bulles.
2) la bulle en croissance ne doit pas trop bouger pendant la prise d'images
3) pour chaque expérience, enregistrez au moins 5 croissances de bulles pour vérifier la reproductibilité du phénomène
4) le contraste est suffisamment bon pour effectuer un seuillage de qualité (le fond doit apparaître très clair par rapport à la bulle)
5) n'oubliez pas de prendre les échelles spatiale et temporelle

Chaque séquence d'images est ensuite analysée avec ImageJ. Les opérations suivantes sont à maîtriser : seuillage de l'image, remplissage des trous et analyse de particules. Ceci permet à chaque pas de temps d'avoir une mesure de l'aire de la bulle.

Vous reproduirez cette manipulation pour différentes valeurs de surpression initiale $\Delta P$, mesurée au manomètre, typiquement en partant de 3 bar et en descendant jusqu'à 0.5 bar par pas de 0.5 bar.

## *Analyse.*

Avant d'ouvrir la bouteille que vaut la pression partielle en $CO_2$ dans la phase gazeuse par comparaison à la pression totale dans la bouteille ?

Pourquoi la nucléation est-elle hétérogène et non pas homogène ? Quels indices avez-vous ?

Pour chaque expérience tracez l'aire A de la bulle en fonction du temps t. Discutez le type de relation que vous obtenez à la vue de la partie théorique. Quelle grandeur suggérer vous de mesurer pour caractériser la croissance de la bulle en fonction de $\Delta P$. Quelle est son unité ?

***Théorie.***

Deux théoriciens s'affrontent pour tenter d'expliquer la dynamique de croissance de bulles observées. Discutez ces deux approches.

<u>théorie 1</u>
On suppose qu'une fois la solution à pression ambiante, la bulle croît car elle est en surpression par rapport au liquide environnant. Du fait de la transformation du dégazage des gaz dissous au niveau de l'interface de la bulle, cette surpression $\Delta P = P_i - P_{amb}$ est supposée constante malgré le volume de plus en plus grand de la bulle. Les contraintes visqueuses s'opposent à cette surpression et la croissance de la bulle est finalement donnée par le modèle d'expansion de bulle dans un fluide newtonien (vu en cours) : $dR(t)/dt = R(t).\Delta P/4\eta$ , où $\eta$ est la viscosité dynamique du liquide.

<u>théorie 2</u>
On suppose que la différence de contraintes à la surface de la bulle, notamment les contraintes visqueuses et de tension de surface, sont négligeables. La bulle est donc à pression constante $P_{amb}$ et est supposée sphérique dans un milieu infini. Sa croissance est liée au flux de particules à l'interface de la bulle qui passent de l'état dissous à l'état gazeux.
La densité de flux de particules qui vient alimenter la bulle est donnée par $D(c_i-c_0)/\delta(t)$ , où D est le coefficient de diffusion du gaz dissous au sein du liquide, $c_i$ est la concentration initiale en CO2 dissous et $c_0$ est la concentration en $CO_2$ dissous au niveau de l'interface. $\delta(t)$ est l'épaisseur de la couche de liquide autour de la bulle sur laquelle s'effectue la diffusion. En réalité il faut aussi tenir compte que la bulle grossit dans le temps et $1/\delta(t) = 1/R(t) + 1/\text{sqrt}(\pi Dt)$. La variation du nombre de molécules dans la bulle s'écrit alors $dn/dt = 4\pi R(t)^2.D(c_i-c_0)/\delta(t)$. Ici on suppose que $c_i$ et $c_0$ sont données par la loi de Henry :

1) $c_i$ correspond à la concentration loin de la bulle. Il s'agit donc de la concentration d'équilibre lorsque la bouteille était encore sous pression, soit $c_i = k_H.P_i$ .

2) $c_0$ correspond à la concentration à l'interface avec la bulle. On a donc $c_0 = k_H.P_{amb}$ car $P_{amb}$ est la pression en $CO_2$ dans la bulle (c'est le seul gaz).

3) au final $c_i - c_0 = k_H.(P_i - P_{amb}) = k_H.\Delta P$

On a aussi $dn/dt = P_{amb}/RT*dV/dt$.
Montrer que le rayon de la bulle suit alors l'équation différentielle ordinaire suivante :

$dR(t)/dt = DRTk_H.\Delta P/P_{amb}.(1/R(t) + 1/\text{sqrt}(\pi Dt))$

Recherchez alors une solution sous la forme $R(t) = \alpha.\text{sqrt}(t)$ et montrez que

$$\alpha = 2\sqrt{\pi}\sqrt{D}x(1 + \sqrt{1 + 1/x}) \text{ avec } x = \frac{RTk_H}{2\pi}\frac{\Delta P}{P}$$

***Analyse 2.***

Exploitez vos mesures et argumentez à la vue de la théorie. Le logiciel SciDavis est à votre disposition sur les ordinateurs.

***Questions supplémentaires.***

1) A partir du tableau suivant, justifiez l'utilisation du $CO_2$ pour obtenir une boisson gazeuse par rapport aux autres gaz.

| Gaz | $D$ | $k_H$ |
|---|---|---|
| | $m^2.s^{-1}$ | $mol.Pa^{-1}.m^{-3}$ |
| $N_2$ | $1.9 \times 10^{-9}$ | $6.1 \times 10^{-6}$ |
| $O_2$ | $2.1 \times 10^{-9}$ | $1.3 \times 10^{-5}$ |
| Ar | $2.0 \times 10^{-9}$ | $1.4 \times 10^{-5}$ |
| $CO_2$ | $1.9 \times 10^{-9}$ | $3.4 \times 10^{-4}$ |

2) Quel est l'ordre de grandeur du rayon maximal de la bulle avant son détachement ? Quelle est la physique derrière cela ?

3) Regardez l'article suivant
http://www-personal.umich.edu/~youxue/publications/Zhang2008Elements.pdf
Comparez rapidement leur approche à la votre.