

# Changement d'Etat biophysique du liquide synovial par Cavitation dans la manipulation Structurelle

**FLOQUET**

**Cédric**

**PROMOTION 2**

**Année 2010-2011**

# SOMMAIRE

CHANGEMENT D'ETAT BIOPHYSIQUE DU LIQUIDE SYNOVIAL PAR CAVITATION DANS LA MANIPULATION STRUCTURELLE .....	1
1. PREAMBULE .....	4
2. INTRODUCTION.....	4
3. CONNAISSANCES PHYSIQUES SUR LE PHENOMENE DE CAVITATION.....	6
3.1. Définition .....	6
3.2. Etats fondamentaux de la matière	
3.2.1. Diagramme Thermodynamique des Etats d'un corps et changement de phase (pour l'eau) :.....	6
3.2.2. La relation pression/volume.....	8
3.2.3 Isothermes d'Andrews.....	9
3.3. Ordres de grandeur physiques caracteristiques de la cavitation.....	11
3.4. Lieu de la cavitation au sein du liquide.....	11
3.5. Paramètres de cavitation limite.....	12
3.6. Germe de cavitation.....	13
3.7. Bruit et onde de choc produits par la cavitation.....	14
3.8. Intérêts et conséquences de la cavitation en milieu industriel.....	15
4. CAVITATION INTRA ARTICULAIRE DANS LA MANIPULATION D'UN JOINT SYNOVIAL .....	17
4.1. Différentes origines d'un bruit articulaire.....	16
4.2. <i>Origine du bruit produit par la manipulation d'un joint synovial.....</i>	<i>17</i>
4.3. <i>Particularités et propriétés physiques du joint synovial: notion de fin de course et de barrière physiologique.....</i>	<i>18</i>
4.4. <i>Chronologie biophysique et modélisation d'une manipulation structurelle synoviale .....</i>	<i>20</i>
4.5. <i>Courbes Tension-Longueur/Dépression-volume.....</i>	<i>22</i>
4.5.1. Courbe Tension-longueur caractéristique de la cavitation intra articulaire synoviale .....	22
4.5.2. Démonstration expérimentale de rupture de cohésion d'un gel par cavitation entre deux cylindres de verre .....	23
4.5.3. Courbe thermodynamique Tension-volume caractéristique d'un changement d'état liquide-vapeur isobare .....	24
4.6. <i>Période réfractaire de cavitation intra articulaire.....</i>	<i>25</i>



<b>4.7. Incidences des connaissances physiques de la cavitation intra-articulaire sur notre concept structurel de lésion.....</b>	<b>28</b>
4.7.1. Test de densité avant manipulation .....	28
4.7.2. Changement d'état biophysique du joint synovial et test de densité après manipulation.....	28
4.7.3. Période réfractaire.....	29
<b>4.8. Pression acoustique, onde de choc et information des tissus.....</b>	<b>30</b>
<b>4.9. Rôles physiologiques de la cavitation synoviale.....</b>	<b>31</b>
<b>4.10. Changements d'états biochimiques des tissus et modification des propriétés viscoélastiques du joint synovial.....</b>	<b>32</b>
<b>5. LA CAVITATION INTRA ARTICULAIRE EN QUELQUES CHIFFRES .....</b>	<b>33</b>
<b>6. DISCUSSION.....</b>	<b>34</b>
<b>7. CONCLUSION .....</b>	<b>35</b>
<b>8. BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>36</b>
<b>9. ANNEXES.....</b>	<b>39</b>
<b>9.1. Annexes 1 .....</b>	<b>39</b>
<b>9.2. Annexes 2 .....</b>	<b>41</b>



## 1. PREAMBULE

Depuis la découverte de la molécule d'ADN dans le milieu des années 1950, le monde scientifique s'est passionné pour cette discipline qu'est la Biochimie. Les mécanismes chimiques du vivant ont été ainsi décortiqués depuis des décennies. La Physique, quant à elle, considérée comme discipline ancienne, a été reléguée au second plan dans la compréhension du vivant. Néanmoins les scientifiques reconnaissent désormais que la Biophysique a une place de choix pour explorer le vivant. En effet comment investiguer cette matière sans maîtrise des rayonnements, des effets quantiques ou autres propriétés purement physiques de l'atome. Les microscopes à effet tunnel (quantique) ou encore le dernier et fameux EOS sont issus des biophysiciens. Ils s'invitent désormais au sein même du vivant, pour décrire des mécanismes chimiques qui, en réalité découlent de propriétés physiques de la matière. Ainsi, nait en ce moment la Biophysique quantique qui ne fait plus sourire car issue des physiciens eux-mêmes. Si je devais faire un rapprochement avec notre discipline, je dirais que la physique est à la structure ce que la chimie est à la fonction. Ce modeste écrit de fin d'étude, fait donc la part belle aux phénomènes physiques instantanés qui contraignent et informent nos tissus, sans évoquer les cascades de synthèses biochimiques et neurologiques qui en découlent à posteriori.

Je remercie les nombreuses personnes, qui m'ont apportées des remarques, des réflexions et beaucoup questions. Cela ma apporté d'autres points de vue très constructifs. Je cite toutes l'équipe pédagogique ; les étudiants de l'école ; mes amis ; et bien sur : ma petite femme, Sophie.

## 2. INTRODUCTION

Notre discipline qu'est l'ostéopathie est une philosophie dans le sens commun du terme. C'est-à-dire un mode de pensée qui nous est propre. Mais la philosophie c'est au sens littéral du terme « l'amour de la connaissance ». Elle englobe la connaissance, la réalité, les valeurs. Que savons-nous réellement de notre concept, à part qu'il est cohérent et évolutif ? Dans « la science et l'hypothèse ,1902 », Henri Poincaré écrit : « L'expérience est la source unique de la vérité : elle seule peut nous apprendre quelque chose de nouveau, elle seule peut nous donner la certitude. Voilà deux points que nul ne peut contester ». En effet, nous n'avons que la vérité de nos expériences. C'est déjà une très bonne chose, mais notre art doit désormais s'appuyer sur l'expérience instrumentale. C'est à dire que la machine doit se



substituer à l'homme comme outil de mesure, pour cumuler des connaissances incontestables par notre société. Nous devons passer de la subjectivité à l'objectivité.

Notre outil est mécanique, par transfert de notre énergie cinétique et potentielle de pesanteur au patient. Mais que devient cette énergie au sein d'un joint conjonctif articulaire synovial ? Comment l'articulation génère ce fameux crack audible lors d'une manipulation dite structurelle ? A-t-on raison de parler d'un changement d'état du tissu après manipulation ? Cet écrit compile une connaissance interdisciplinaire et internationale qui tente de répondre à ces questions. Cette synthèse est la plus exhaustive possible, même si le sujet qu'est la cavitation est un puits sans fond de questions et de réponses. Il est désormais établi par le monde scientifique que la cavitation est responsable du crack manipulatif, tout comme par les différents thérapeutes manuels anglophones. Pour autant à ma connaissance, aucune école de thérapie manuelle française n'évoque le sujet. Je me suis toujours étonné que l'on enseigne de façon magistrale la technique manipulative, en s'appuyant sur des notions purement physiques (couple de force, axe, plan de glissement..) et que l'on ne se demande pas pourquoi et comment une articulation craque. Nous disons que « notre outil est mécanique », mais imaginons nous à quel point ? Notre concept actuel est basé sur une éventuelle et probable action « réflexe » neuro-vasculaire orthosympathique, qui modifierait les qualités mécaniques du tissu conjonctif. Mais nous pourrions déjà tenter de comprendre ce qui se passe au sein de l'articulation synoviale lors du crack, en dehors de notion neurologique ou vasculaire. Je me suis donc efforcé de répondre à mes questionnements d'étudiants avec le plus de cohérence possible, en l'incorporant complètement dans notre concept de lésion structurée au sein du tissu conjonctif. S'il y a un effet réflexe vasculaire orthosympathique, ou de mécano transduction, ils sont nécessairement postérieurs à cet effet physique instantané (moins de 10 millisecondes !).

« Le sceptique garde la porte du savoir, avant d'entrer dans la citadelle, nous devons relever son défi » (Annas et Barnes 1985).

Dans un souci de compréhension, la première partie du devoir est consacrée à l'explication du phénomène physique de la cavitation. La deuxième partie utilise ces notions préalables, remises dans le contexte de l'articulation synoviale et de notre pratique thérapeutique.

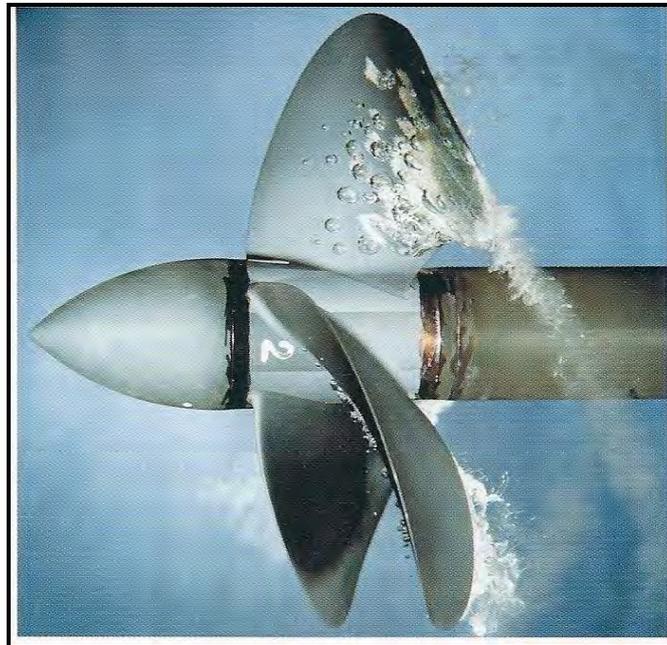


### 3. CONNAISSANCES PHYSIQUES SUR LE PHENOMENE DE CAVITATION

Ce chapitre assez complexe pour le néophyte, est la synthèse de plusieurs sources d'informations, mais on retrouve essentiellement celles trouvées dans les ouvrages dédiés [6 ; 10 ; 13]. Les exemples concrets de notre quotidien étayent ces explications. On peut les trouver dans des revues de vulgarisation scientifique [7 ; 30 ; 31].

#### 3.1. Définition

La cavitation est la formation de **poches** ou **bulles** de **vapeur** au sein d'un milieu liquide initialement homogène. C'est « la rupture du milieu continu de liquide, sous l'effet de contraintes excessives » [13].



1. a .Formation de bulles de vapeur (cavitation) sur l'extrados des pales d'une hélice en rotation dans l'eau. L'hélice aspire le fluide à gauche de la photo et le refoule vers l'arrière, à droite de la photo. Il y a donc cavitation dans les zones de dépression maximale.

Elle implique une notion de seuil au-delà duquel la cohésion du milieu liquide ne peut plus être assurée. Idéalement ce seuil pourrait être déterminé par la physique du liquide à



l'échelle moléculaire. Mais en l'état des connaissances, on utilise les lois de la mécanique des milieux continus à l'échelle macroscopique : la thermodynamique des fluides. Ce seuil est déterminé par la **pression de vapeur saturante** du liquide. C'est-à-dire, le seuil de dépression au-delà duquel le liquide se change en gaz. La cavitation est un changement d'état de la matière, où l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux par une dépression.

### **3.2. Etats fondamentaux de la matière**

On connaît trois états fondamentaux de la matière :

1. Solide
2. Liquide
3. Gazeux

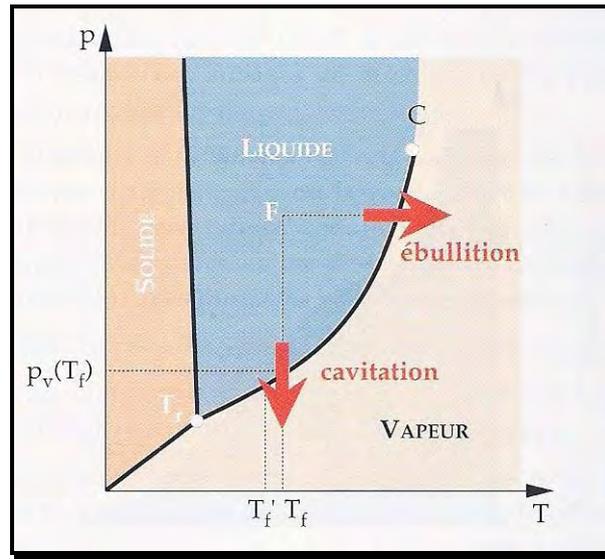
On peut reconnaître un quatrième état rencontré dans des conditions physiques très spécifiques : le plasma, qui est un état ionisé de la matière et un cinquième récemment admis : le super fluide quantique.

On parle « d'état » pour la matière au sens fondamental, mais on utilise plus volontiers le terme de « phase », ou « changement de phase » pour un corps pur.

La cavitation intervient lors du changement de phase liquide-gaz, et ne concerne pas l'état solide. Ainsi, s'il n'y a pas initialement de liquide, il n'y a pas de cavitation. Cette vaporisation du liquide peut être comparée à une ébullition, même si le moteur de la transformation de phase est différent. En effet, il y a diminution de pression pour la cavitation à température constante (isotherme), alors qu'il y a augmentation de température dans l'ébullition à pression constante (isobare).

#### 3.2.1. Diagramme Thermodynamique des Etats d'un corps et changement de phase (pour l'eau) :





Ce diagramme montre les différents états de la matière et les courbes de changement de phase. Il montre surtout les deux voies principales, pour passer d'un état liquide à un état gazeux. L'ébullition et la **cavitation** [13]  
 (Diagramme ne prenant en compte que les variables d'état : Pression et Température)

Ce changement d'état est réversible et complètement dépendant des conditions de l'environnement physique et chimique du milieu. On doit reconnaître toutefois, que ces changements de phase ne sont pas strictement isothermes ou isobares. Comme il existe un retard à l'ébullition en condition de forte pression, il existe aussi un retard à la cavitation.

Pour prendre l'exemple de la cocotte-minute (SEB) : l'augmentation de pression due à un environnement étanche, provoque un retard à l'ébullition. L'eau bout alors, à une température supérieure à 100° C. La cuisson des aliments est plus rapide !

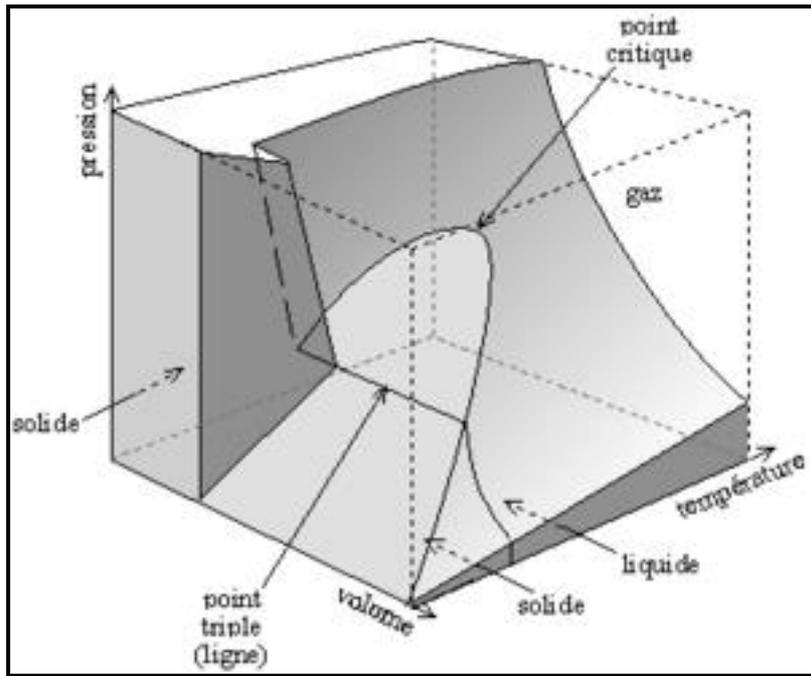
A l'inverse, en montagne à haute altitude, l'eau bout à une température inférieure à 100°C due à la diminution de la pression atmosphérique (86 °C en haut de mont blanc). Les aliments ont alors, du mal à cuire.

Il y a donc interaction du **couple pression-température**, lors du changement de phase.

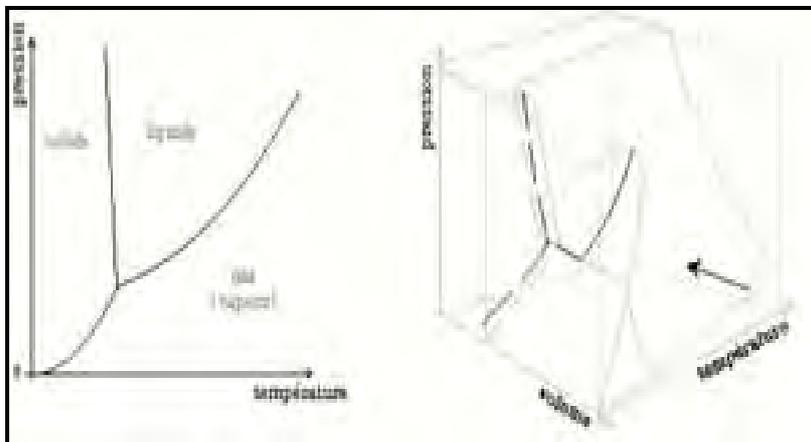
Ainsi, Il existe un retard à la cavitation car il y a une légère augmentation de la température moyenne du liquide lors du changement de phase. Donc la dépression nécessaire à la cavitation est légèrement plus basse que la pression de vapeur saturante du liquide.

Il y a une autre variable d'état qui rentre en jeu, c'est le volume .Les trois variables d'état que sont la pression, le volume et la température, interagissent pour donner le graphique tridimensionnel suivant pour l'eau :





On peut reconnaître le passage de deux variables d'état (Pression, Température) à trois variables (Volume en plus), par les deux petits graphiques explicatifs du dessous :



### 3.2.2. La relation pression/volume

On peut expliquer la relation pression-volume par la loi des gaz parfaits en équilibre thermodynamique:



**Équation d'état :**  $f(P, V, T) = 0$

C'est la relation entre les trois **variables d'état** : Pression, Volume, Température

**Loi des gaz parfaits :**

$$P.V = n.R.T$$

$$P = n.R.T / V$$

Dans cette formule, la pression statique est égale à la quantité de matière multipliée par la température, le tout divisé par le volume. A température égale, **la pression est inversement proportionnelle au volume.** (Loi de Boyle-Mariotte)

Le moteur principal de la cavitation étant une dépression, **il faut une augmentation de volume du contenant** pour la provoquer.

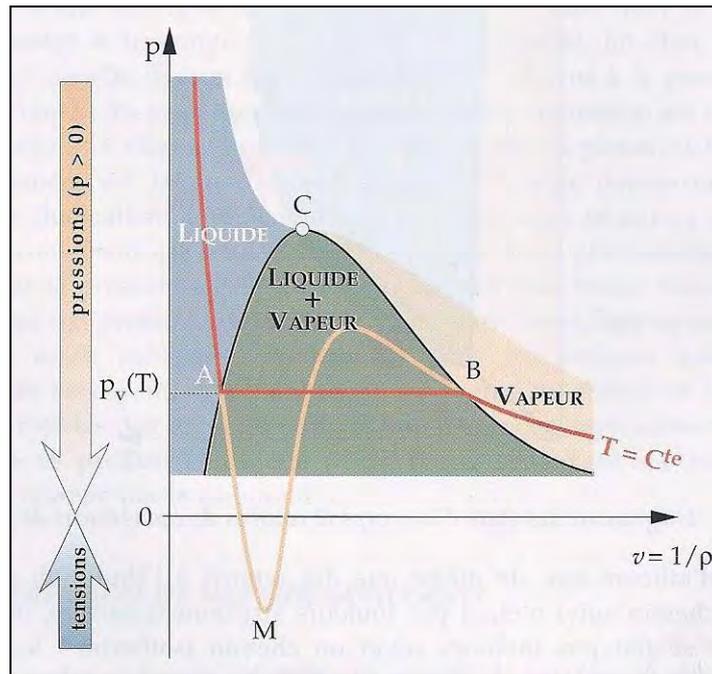
**Exemple du remplissage d'une seringue :**

Lorsque l'on veut remplir une seringue avec un liquide à base d'eau, il faut le faire à une vitesse relativement lente. Sinon la dépression entraînée par la descente (convention) du piston approche la valeur de la pression de vapeur saturante du liquide et une poche de gaz apparaît. Ce phénomène limite alors la vitesse de remplissage. Plus on tire vite et plus le volume de cette poche de gaz augmente. Alors, la dépression sert plus à la cavitation qu'au transfert de liquide. **L'énergie produite par la traction est détournée de sa fonction motrice et vaporise le liquide.**

### 3.2.3. Isothermes d'Andrews

Maintenant si on analyse l'état d'un corps pur en fonction de son volume et de sa pression à **température constante**, on obtient les « isothermes d'Andrews », tirées des courbes de Clapeyron.





On peut comprendre plusieurs concepts de thermodynamique dans ce graphique. Il représente l'état d'un corps pur à température constante (isotherme), en fonction de sa pression et de son volume ( $V = 1/\text{masse volumique}$ ). La courbe rouge représente l'état possible du corps pour une température **choisie** et constante en fonction de sa pression et de son volume. Par exemple pour l'eau, on choisit une température constante de  $100^\circ\text{C}$  qui représenterait la courbe rouge. On aurait alors de l'eau liquide jusqu'en A, soit 1 atmosphère (pression de vapeur saturante par rapport à T). Ensuite de A à B de l'eau liquide et de la vapeur. Puis après B (moins de 1 atmosphère), il ne persiste que de la vapeur. On remarque que l'état liquide + vapeur **coexiste** sur une **grande plage de volume** mais à pression constante (ligne A-B). C'est dans cette plage de pression-température que l'on rencontre cette coexistence d'état.

Comment expliquer alors l'existence de ce double état soit à température ambiante (environ  $20^\circ\text{C}$ ) soit à température d'un mammifère (environ  $40^\circ\text{C}$ ) ? Car cette courbe rouge est un modèle basé sur l'équation des **Gaz parfaits**. L'équation d'état de **Van der Waals** tient compte de l'espace de chaque molécule et surtout de l'**interaction** à distance entre elles. Il en résulte un chemin possible A-M qui rend mieux compte de la réalité. Ce « chemin » indique qu'il est possible d'obtenir ce double état par une **dépression** (inférieure à la valeur 0 atmosphère), qu'on appelle alors **Tension** pour un liquide.



### **3.3. Ordres de grandeur physiques caractéristiques de la cavitation**

Les instabilités propres aux phénomènes de cavitation donnent lieu à des phénomènes d'explosion ou d'implosion de structure de vapeur dont les tailles et les vitesses caractéristiques varient très rapidement en des temps très petits. Ci-dessous, sont mentionnés quelques ordres de grandeur physique lors de la formation et de l'implosion d'une bulle de vapeur dans l'eau :

- Temps caractéristique total d'explosion et d'implosion d'une bulle de taille centimétrique sous une différence de pression de 1 bar  $\approx$  **1 ms**.
- Phase finale d'implosion (Temps de Rayleigh) de l'ordre de la  **$\mu$ s**.
- Vitesse de l'interface liquide-vapeur : de quelques mètres par seconde (m/s) à quelques centaines de m/s, de l'ordre de la **vitesse du son**.
- Surpression locale sur les parois provoquée par l'implosion des structures de vapeur : de l'ordre de la **centaine** de Méga pascals.
- Surface de contact sur la paroi lors de l'implosion : de quelques  $\mu$ m à **100  $\mu$ m**.
- En sonochimie, on atteint des températures de **5000° K**, des pressions de **1000 Atmosphères**, des champs électriques intenses de l'ordre de **10<sup>11</sup> V/m**, et parfois une émission de photon (sonoluminescence par cavitation ultrasonore)

### **3.4 .Lieu de la cavitation au sein du liquide**

Ces bulles ou poches de gaz, naissent dans les régions de basse pression. Elles implosent ensuite lorsqu'elles rencontrent un gradient de pression adverse. En condition dynamique, les bulles naissent dans les zones où les variations de vitesse d'écoulement sont les plus rapides. Donc aussi dans les zones de cisaillement.

Explications :



D'après le principe de conservation d'énergie

$$\rho.V^2 / 2 + \rho .g .Z + P = \text{constante}$$

Soit : pression cinétique + pression de pesanteur + pression statique = constante

Cette équation explique l'effet Venturi (principe de Bernoulli). Dans les zones d'augmentation de vitesse d'écoulement, la pression statique diminue (dépression de l'effet Venturi). Car si la pression cinétique (vitesse d'écoulement) augmente, la pression statique doit diminuer d'autant afin de respecter ce premier principe de thermodynamique. On observe expérimentalement ce qu'on peut prédire mathématiquement : les bulles de vapeur se forment toujours à l'endroit de la plus grande variation de vitesse, de cisaillement, donc de dépression. On verra plus loin la conséquence intra articulaire que cela entraîne.

En manipulant on pourra créer une diminution de la pression statique par :

- un cisaillement tangent au plan articulaire qui induira une augmentation de la pression cinétique, en défaveur de la pression statique.
- une décoaptation purement perpendiculaire au plan articulaire qui induira une diminution directe de la pression statique par augmentation du volume articulaire.

Le lieu le plus probable de la plus forte dépression (lieu de cavitation), est très dépendant des **caractéristiques physiques** du **contenu liquide** et du **contenant** solide. Il est déterminé par le paramètre de cavitation limite (chapitre suivant).

### **3.5. Paramètres de cavitation limite : $\sigma_{vi}$**

Ce paramètre mathématique, est nécessaire aux calculs et simulations, du lieu probable de cavitation dans un liquide. C'est la synthèse de toutes les conditions physiques contenant /contenu.



« On appelle paramètre de cavitation limite, la valeur de  $\sigma_v$  correspondant à la naissance de la cavitation en **un point** du système considéré, lorsqu'on **diminue** la valeur de la **pression** de référence. »[13]

Ce paramètre dépend de tous les paramètres géométriques et physiques qui définissent le système considéré : (En gras, variable importante de la cavitation intra-articulaire)

- **Géométrie** du contenant
- **Nombre de Reynolds : effet de la viscosité du liquide**
- Nombres de Froude : effet de la gravité sur le liquide (négligeable par la faible quantité de liquide synovial, devant la masse d'une colonne d'eau)
- **Nombre de Weber : effet de la tension superficielle du liquide**
- Taux de turbulence
- Rugosité relative des parois (annexe n°1)
- Paramètre thermique du liquide
- **Qualité du liquide par rapport au germe de cavitation**

### **3.6. Germe de cavitation**

On a vu d'une part, que la cavitation commence toujours au point de pression minimale et d'autre part, que le seuil de la pression de cavitation est **la tension de vapeur du liquide** (on parle de tension dans un liquide, quand il y a une dépression).

Mais cela est trop restrictif. En effet, les valeurs **expérimentales** des tensions de rupture de l'eau sont de l'ordre de **quelque Bars** seulement. Alors que la valeur **théorique** donnée par la mécanique des milieux continus indique une dépression nécessaire à l'apparition de la cavitation, de l'ordre de 7000 Bars pour l'eau ! (700 Bars avec les fluctuations de Température).

Avec une autre analyse faite à partir de l'équation de Van der Waals, on obtient la valeur nécessaire de dépression, de 500 Bars à Température ambiante (cf. isothermes d'Andrews plus haut). Mais l'expérience commune dans le domaine de la cavitation, donne des valeurs de la pression limite, qui s'écartent beaucoup moins de la tension de vapeur que ne l'indiquent les valeurs théoriques. On est conduit alors à postuler à l'existence d'**amorces de rupture**, constituées par des **inclusions de gaz** et de vapeur présentes au sein du liquide. On remplace donc l'image d'un liquide homogène par un liquide hétérogène. Ces inclusions existent réellement, leur taille est comprise entre le  $\mu\text{m}$  et le  $\frac{1}{2}$  millimètre, de sorte que la **tension superficielle** les contraint à garder une forme sphérique. Ces **microbulles** sont



appelées **germes de cavitation**, elles sont présentes sur les parois et dans la masse du liquide. On introduit donc la notion de « **taux de vide** » : rapport des volumes de gaz et du liquide. Ce taux de vide est très petit. Une eau qui contiendrait 100 germes de Ø 0.1 mm par  $\text{cm}^3$ , aurait un taux de vide de l'ordre de  $0.52 \cdot 10^{-4}$ . Cela ne modifiera que de manière insignifiante la masse volumique du liquide, l'effet sur la compressibilité ou sur la vitesse du son. Par contre cela aura un **impact** important sur la **localisation** et la possibilité de cavitation.

L'existence des germes de cavitation, montre qu'un gaz est présent sous deux formes au sein d'un milieu liquide. Soit sous forme de **gaz dissout** (molécules de gaz disséminées dans les interstices laissés libres par le réseau de molécules de liquide). Soit sous forme de **gaz occlus** (au sein de microbulles limitées par des interfaces bien définies).

Exemple du verre de Champagne :

Dans une flute de champagne, les bulles de  $\text{CO}_2$  préalablement dissoutes par la mise sous pression, se forment toujours aux mêmes endroits. En effet, les micros - infractuosités du verre ou les microparticules de saleté des parois, enferment des microbulles quand on verse le précieux liquide. Ce gaz occlus est donc le précurseur de la vaporisation du  $\text{CO}_2$  en bulle de gaz. Ensuite la bulle se détache et augmente son volume au fur et à mesure de son ascension pour éclater en surface et libérer son arôme !

### ***3.7. Bruit et onde de choc produits par la cavitation***

**Seule l'implosion** de la bulle est sonore. Sa formation ne crée pas d'onde de pression. L'**intensité** du son produit par l'implosion d'une bulle de vapeur dans un milieu liquide est **proportionnelle** à la dérivée seconde du **volume** de cette bulle. On constate que l'érosion [voir photos] de cavitation se situe dans le domaine de grandes vitesses de déformation, comparables à celle induites par l'impact de projectiles et d'explosions d'enveloppes. La déformation plastique qui en résulte est **tridimensionnelle**, mais fondamentalement différente par le **petit** volume déformé qui reste très localisé dans le cas de la cavitation.



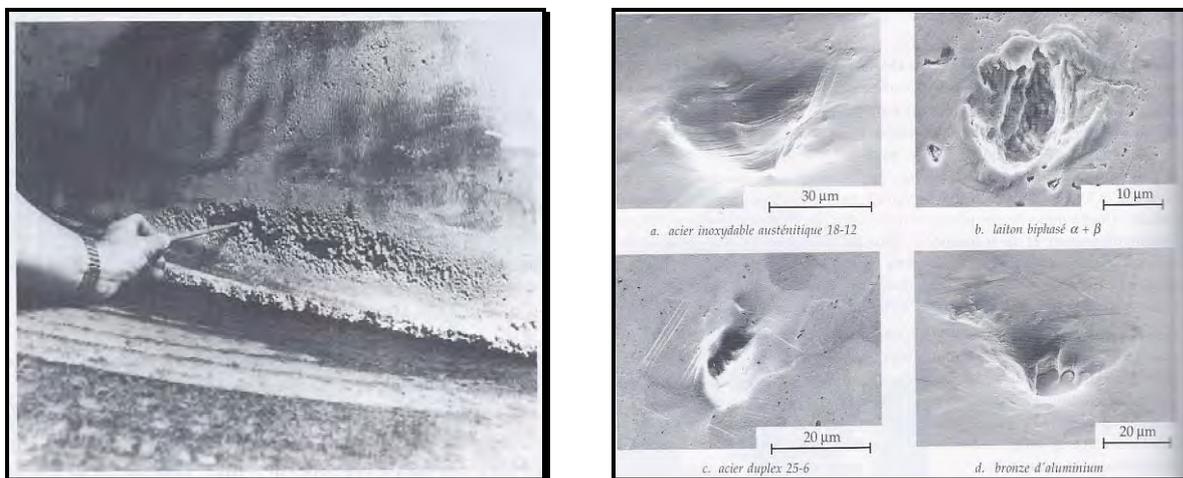
### 3.8. Intérêts et conséquences de la cavitation en milieu industriel

La Cavitation est connue de tous les ingénieurs qui conçoivent les pompes, turbines, hélices, etc... servant à transporter des fluides. Elle produit une **perte de rendement** (perte de charge) immédiatement à l'approche de la pression de vapeur saturante du liquide. C'est pour cela qu'une pompe à eau de surface, ne pourra jamais remonter une colonne d'eau supérieure à 10 m. La dépression nécessaire entraîne la vaporisation de l'eau et désamorce la turbine. La cavitation intervient ici au-dessous de - **1 atmosphère** à température ambiante.

Un autre exemple, est la formation de bulles de cavitation au dos des pales d'hélices de bateau. Si elle dépasse une certaine vitesse de rotation, une partie de l'énergie utile à la propulsion est perdue dans la formation de bulles ou poches de vapeur.

Ce phénomène est donc directement responsable d'une perte de rendement de ses machines.

De par les propriétés physiques du phénomène, la cavitation entraîne lentement mais sûrement une **altération irréversible des parois** sur laquelle les bulles implosent. En effet chaque bulle est une **concentration d'énergie** locale très élevée qui entraîne des **pics de pression** très importants lors de leurs implosions ; elles sont de l'ordre de quelques centaines de Méga Pascal sur une zone très petite, de l'ordre de quelques microns.



Erosion d'une aube de roue Kaplan due à la cavitation marginale ; Impacts uniques de cavitation dans quatre alliages.

La cavitation peut être reproduite par les ultrasons. Elle est utilisée alors pour :

- Le nettoyage de surface
- La dispersion de solide dans un liquide



- La production d'émulsion
- La physiothérapie ultrasonore
- La destruction de cellule, de calcification
- La sonochimie
- ...

## 4. CAVITATION INTRA ARTICULAIRE DANS LA MANIPULATION D'UN JOINT SYNOVIAL

### 4.1. Différentes origines d'un bruit articulaire

Il faut distinguer deux grands types de bruits articulaires :

- Les bruits répétitifs qui ont pour origines fréquentes :
  - Frottements des surfaces articulaires, cartilages
  - Frottements des ménisques
  - Frottements tendineux
  - Divers claquements et ressauts de tendon, bourse synoviale
- Les bruits non répétitifs :
  - D'origine traumatique : fracture, entorse ligamentaire, rupture tendineuse...
  - D'origine manipulative : phénomène de **cavitation** intra articulaire au sein du film liquidien synovial

On doit cependant noter que le bruit issu de la cavitation du joint synovial est reproductible, mais après une **période réfractaire** de plusieurs minutes [8 ; 34 ; 36]. Ce temps de latence sera développé dans un chapitre à part.



#### **4.2. Origine du bruit produit par la manipulation d'un joint synovial**

Dans une articulation synoviale, toutes les conditions physiques sont réunies pour qu'il se produise une cavitation intra-articulaire lors d'une manipulation. En effet, l'articulation synoviale représente un milieu étanche, avec un liquide interne.

D'ailleurs, il est désormais prouvé et admis par les ostéopathes et chiropracteurs anglophones, que ce phénomène est le seul responsable de se « crack » ou « Pop » audible lors d'une manipulation [1 ;2 ;9 ;12 ;16 ;17 ;18 ;19 ;20 ;21 ;24 ;25 ;26 ;27 ;28 ;29 ;34 ;36]. Cette hypothèse est née et a été expérimentée dès la fin de la seconde guerre mondiale et ne fait que se confirmer expérimentalement de décennie en décennie. Il existe encore quelques septiques qui ne confirment pas ces résultats [4]. Sur les sites internet francophones, on peut lire également beaucoup de théories qui traitent du sujet. Ces derniers expliquent le phénomène sonore par :

- La remise en place de l'articulation (alors que l'on peut reproduire le crack toutes les heures environ pour une même articulation) [8].
- Le décollement des surfaces articulaires initialement soudées ou collées.
- La diffusion d'un gaz à travers la membrane synoviale.
- La seule mise en tension du tissu capsulo-ligamentaire
- etc...

Les détracteurs au phénomène de cavitation, s'opposent à la formation de cette bulle de gaz ayant pour argument que « la nature a horreur du vide » et que cette théorie est séduisante mais trop ancienne pour être crédible.

Néanmoins quelques francophones comme Pierre Trudelle, Vincent Pomeroy et Dominique Bonneau, Vautravers ou Maigne s'alignent sur les connaissances de la littérature anglophone. Pour eux, la cavitation articulaire est une évidence et c'est le fondement du bruit manipulatif. Les revues à vocation scientifique confirment également cette hypothèse, mais ne font pas toujours de distinction entre gaz dissous et vapeur [7 ; 30 ; 31]. Les références exhaustives et très rigoureuses sont bien sûr, les ouvrages dédiés à la thermodynamique des fluides et à la mécanique de cavitation elle-même [6 ; 10 ; 13].



### **4.3. Particularités et propriétés physiques du joint synovial : notion de fin de course et de barrière physiologique**

On considère souvent que les tissus capsulo-ligamentaires limitent les fins d'amplitude articulaire. Ce n'est pas faux, mais c'est très imprécis. Car, c'est oublier l'unité d'ensemble du joint synovial. On peut séparer cette unité en trois tissus **conjonctifs** distincts :

- Les surfaces articulaires c'est à dire le tissu cartilagineux et le tissu méniscal
- Les tissus péri-articulaires : membrane synoviale, capsule, ligament
- Le liquide synovial sous forme de film liquidien

Ces trois tissus conjonctifs remplissent chacun un rôle dans la mécanique du joint articulaire et forment une **unité indissociable**. Lors des mouvements chacun interagit avec les deux autres. Le liquide synovial est connu pour ses rôles de trophicité et de lubrification du cartilage [14]. Il a en plus, un rôle évident mais pourtant méconnu, c'est son rôle de **cohésion** articulaire, comme une sorte de colle qui unie les deux autres tissus. Le liquide comble ainsi tous les défauts physiologiques de congruence entre les surfaces articulaires. Ainsi les trois tissus forment une **unité de matière tridimensionnelle**, sans **aucune discontinuité**. Au « repos articulaire » ou « position neutre », ce n'est pas **seulement** l'appareil capsulo-ligamentaire qui va retenir la cohésion articulaire, mais aussi le liquide synovial. En effet, la **force de tension superficielle** due à la présence de liquide, attire tous les tissus à son contact. On appelle ce phénomène **capillarité** d'un liquide **mouillant** entre deux surfaces proches. C'est un réel effet " **ventouse**" qui se produit, véritable colle physique (tension superficielle de l'eau à 0°C : 0.076 N/ m). Un autre phénomène intervient de pair avec cette force de tension superficielle, et sans doute de façon plus **importante**, c'est la **dépression** intra-articulaire. Car si le liquide synovial aspire tous les tissus à son contact, c'est aussi parce qu'il est présent sous une **pression sub-atmosphérique**, soit environ -4 mm de Mercure (environ -0.76 Atmosphère) [15 ; 33]. Affirmer que le liquide synovial est le seul tissu à assurer la cohésion de l'articulation est également un non-sens. C'est par la présence de l'appareil capsulo ligamentaire, que l'étanchéité relative du joint articulaire est possible. Ainsi l'effet ventouse du liquide, met en **tension basale** (voire chronologie de la manipulation) la capsule et les ligaments en aspirant ces tissus vers l'intérieur de l'articulation. Ces tissus se retrouvant alors plaqués de part et d'autre des surfaces articulaires ; Ils épousent parfaitement les contours péri-articulaires. Le **pseudo-contact** entre les deux surfaces articulaires est donc maintenu par l'effet ventouse du liquide et la mise en tension basale des tissus capsulo-ligamentaires. La dépression qui règne à



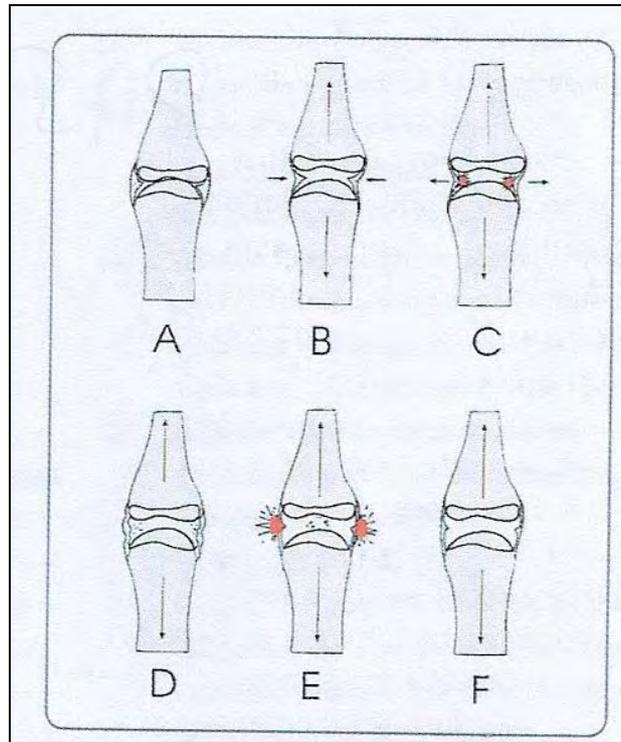
l'intérieur de l'articulation accole également tous les replis synoviaux. On peut dire que l'articulation, est déjà en **autocontrainte**, même au repos. Les deux surfaces articulaires sont toujours séparées par le film liquidien. Le liquide accole donc tous les tissus entre eux, mais favorise leurs **glissements tangentiels**.

Pour exemple, prenez un sac poubelle, introduisez un peu d'eau savonneuse à l'intérieur, faite le vide, puis faites un nœud pour le rendre étanche. Si vous le mettez au sol, vous obtenez un excellent plan de glissement. Chaque feuillet du sac peut glisser tangentiellement l'un par rapport à l'autre. Mais il vous sera impossible de séparer les deux parois du sac.

Quand on contraint une articulation dans sa fin d'amplitude physiologique, on accroît la dépression du liquide, donc l'effet ventouse s'oppose d'autant plus à la déformation. Par contre, la tension basale devient une **tension locale majorée**, sur la partie capsulo-ligamentaire qui limite spécifiquement le degré de liberté concerné. La localisation de l'augmentation de la dépression se fera donc à proximité immédiate de la tension locale majorée. Donc la bulle de cavitation se formerait et imploserait à proximité du site de tension locale majorée. Il faut reconsidérer la notion de barrière physiologique, ou de fin d'amplitude, en incluant ce **facteur de dépression liquidienne** de position neutre et qui tend à augmenter avec la contrainte donc avec la **quantité d'énergie** que le joint **emmagasine**. Pendant la manipulation la dépression liquidienne peut atteindre de **- 2 à - 3 atmosphères !** [30]. On peut dire que si la tension des tissus péri-articulaires augment, celle du liquide synovial aussi. L'énergie de contrainte imposée à l'approche de la barrière physiologique, est **absorbée** dans le tissu capsulo-ligamentaire et dans **le liquide synovial**.



#### 4.4. Chronologie biophysique et modélisation d'une manipulation structurelle synoviale



Cette chronologie provient de Brodeur [2] on la retrouve chez Trudelle [34], ses schémas illustrent les différentes étapes qui se déroulent au cours d'une manipulation par cavitation en décoaptation d'une articulation métacarpo-phalangienne du III. (C'est une modélisation bien-sûr)

Nous allons toutefois adapter cette chronologie et utiliser les termes et explications précédemment développées :

- A : Unité tridimensionnelle du joint synovial, **tension basale** de l'appareil capsulo-ligamentaire et **tension basale** sub-atmosphérique du liquide synovial, articulation au « repos »
- B : Application d'une force de traction perpendiculaire au plan de glissement articulaire. La décoaptation tend à faire augmenter le volume intra articulaire. Il y a une mise en tension de l'appareil capsulo-ligamentaire de façon **curviligne** par dépression du liquide synovial. La **tension locale majorée** de la capsule est la



résultante de deux forces perpendiculaires entre elles : une force de tension parallèle à la force de traction et une force perpendiculaire vers le milieu intra articulaire due à l'augmentation **concomitante** de la **dépression** du liquide synovial.

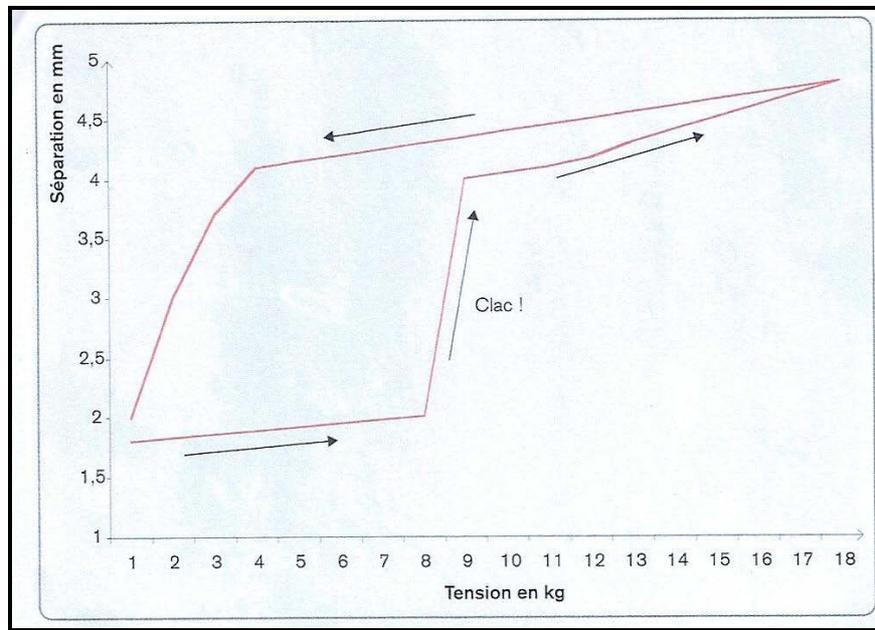
- C : Le joint conjonctif synovial a accumulé une **quantité d'énergie seuil** au-delà de laquelle la cohésion tridimensionnelle ne peut être maintenue. L'énergie élastique atteint le **seuil de vapeur saturante** du liquide synovial. Lors d'une manipulation, la dépression intra-articulaire peut atteindre **-2 atmosphères** [29] et même -3 atmosphères (d'après Ruston et Haines). Une bulle de gaz se forme et implose en quelques microsecondes par **cavitation**, c'est le **premier bruit articulaire**. L'onde de choc de l'implosion percute la capsule. La dépression intra-articulaire disparaît instantanément par le phénomène de cavitation.
- D : La tension de la capsule disparaît transitoirement par disparition de la force de dépression qui lui était appliquée par le liquide. Il y a rupture de la cohésion du liquide synovial et séparation des surfaces articulaires. L'autocontrainte disparaît.
- E : Remise en tension de la capsule par inertie cinétique de la force de traction (en relation avec la Masse), c'est le **deuxième bruit articulaire**.
- F : Période réfractaire, qui varie en fonction de la quantité de gaz à réintégrer dans le liquide et le volume de ce dernier.

Ces différentes étapes se déroulent bien sûr de façon continue, elles ne sont décomposées qu'à visée pédagogique. L'enchaînement de toutes ses phases ne dure que quelques millisecondes.



## 4.5. Courbes Tension-Longueur/Dépression-volume

### 4.5.1. Courbe Tension-longueur caractéristique de la cavitation intra articulaire synoviale :



Courbe de séparation des surfaces articulaires en fonction de la force appliquée lors d'un craquement articulaire (articulation MCP du III). La courbe du bas montre l'écartement des surfaces articulaires lors de la traction et l'on observe un large écart lors du bruit. La courbe du haut montre le comportement du joint articulaire lors du relâchement de la tension (adapté de Roston et Haines [34] tiré de Trudelle).

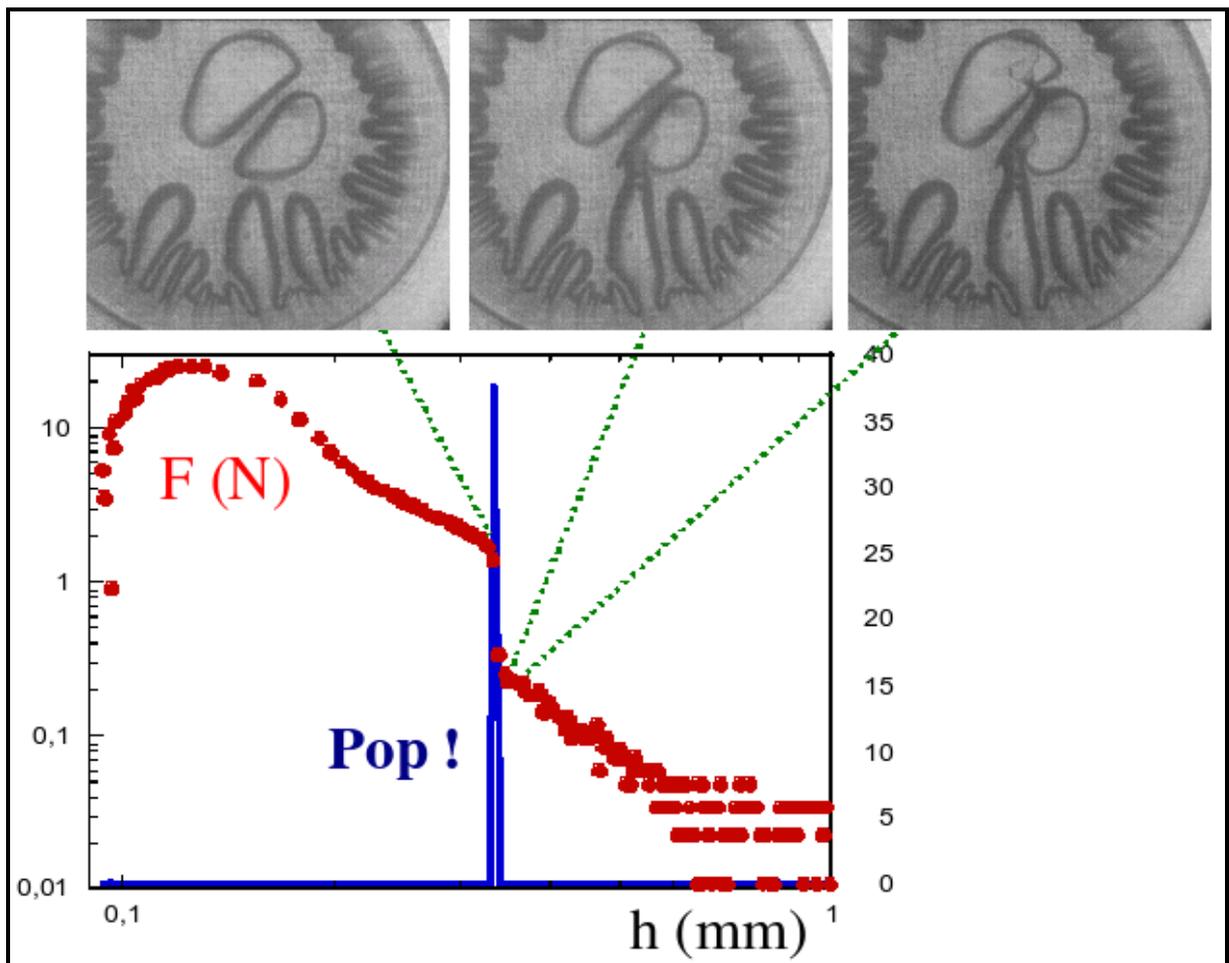
On remarque que lors du « clac », il y a une brusque séparation des surfaces articulaires ; c'est à dire, une brusque augmentation du volume intra-articulaire, qui correspond au volume de gaz créé par cavitation. Toutefois la tension reste quasi constante lors de ce phénomène. Cette forme de courbe en « s » est **caractéristique des courbes thermodynamiques** de changement d'état liquide en vapeur (diminution de pression isotherme). Mais cette courbe a été obtenue « in vivo », elle représente la tension absorbée par l'ensemble des tissus conjonctifs de l'articulation. Si on la transpose au modèle précédent, l'énergie de traction est absorbée à la fois dans le tissu conjonctif péri-articulaire (capsule-membrane synoviale-ligament), mais aussi dans le tissu conjonctif intra-articulaire (liquide synovial). Si on ajoute en plus les lois de la thermodynamique, on en tire encore des informations :

- Dans la première partie de la courbe (tension de 1 à 8), la tension s'accumule bien dans tous les tissus péri et intra-articulaire.



- Dans la deuxième partie (de 8 à 9) tout change au-delà du seuil de rupture du liquide synovial : la tension dans le liquide reste constante car la phase liquide est plus stable que la phase gazeuse. La tension dans le gaz augmente et accroît son volume. La tension dans les parois péri-articulaire chute brusquement. On peut dire que la tension idéalement répartie pendant la première phase, est brusquement absorbée par la vaporisation et l'accroissement de volume de ce gaz.
- Dans la troisième partie de la courbe (de 9 à 18), le volume intra articulaire a atteint son maximum **physiologique**. La tension ré-augmente subitement dans les tissus périarticulaires.

4.5.2. Démonstration expérimentale de rupture de cohésion d'un gel par cavitation entre deux cylindres de verre :

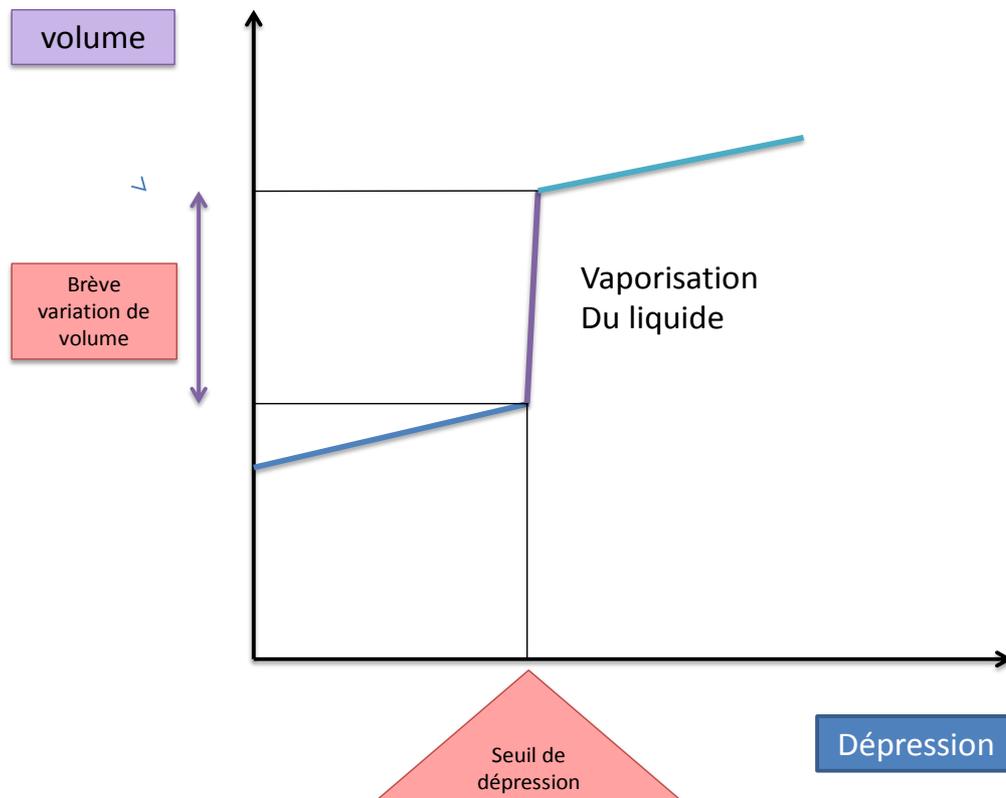


Tout d'abord cette expérience est différente de la cavitation intra articulaire car il n'y a pas de paroi avec le milieu extérieur .Mais justement elle permet de se rendre compte de l'effet unique de cohésion du gel sur les deux surfaces.

On place un gel entre deux cylindres de verre, puis on leur applique une force de séparation perpendiculaire aux surfaces, force égale et opposée (traction). Initialement le gel est réparti de façon homogène sur la surface ; mais il y a un germe de cavitation au milieu. Une première poche de gaz apparaît justement par cette amorce de rupture et grandit proportionnellement à la force de traction. Des franges de dépression apparaissent également en périphérie, qui aspireraient les parois vers l'intérieur s'il y en avait. Une deuxième poche apparaît, puis c'est la rupture totale par implosion des poches lors du « pop ». On observe alors la forme de courbe en « s » caractéristique (courbe de force en rouge, inversée bien sûr par abysse /ordonnée).Une courbe tension longueur d'un tissu conjonctif « solide » seul, aura volontiers une forme plus connue, de « j » [13].

4.5.3. Courbe thermodynamique Tension-volume caractéristique d'un changement d'état liquide-vapeur isobare :





On observe sur cette courbe, une brusque augmentation du volume, par vaporisation de l'eau, au-delà de la pression de vapeur saturante du liquide. Elle se passe de façon quasi isobare (même pression). Ainsi une **petite variation de pression peut augmenter le volume de façon très importante**. Pour rappel, la tension d'un liquide est une dépression en dessous d'une pression référence. La forme de la courbe est typiquement en « s ».

A noter que la température et la teneur en chlorure de sodium (Na-Cl), du liquide synovial, doit favoriser sa vaporisation lors d'une dépression.

#### **4.6. Période réfractaire de cavitation intra articulaire**

La période réfractaire du joint synovial, est la durée pendant laquelle il est impossible de refaire craquer l'articulation qui a déjà cavité lors d'une précédente manipulation. Ce temps de latence entre deux manipulations qui cavitent, a déjà été objectivé par l'expérimentation.



Ainsi Unsworth et al, ont prélevé du liquide synovial de 4 patients ; Ils en tirent quatre courbes de résorption du gaz sous une pression de 17 cm de mercure. Le temps de résorption moyen du gaz dans le liquide synovial est alors de 30 minutes. Ils confirment leurs résultats in vivo en manipulant l'articulation métacarpo-phalangienne de 7 patients. En effet, il leur est impossible de refaire craquer cette articulation avant une période de 20 à 30 minutes [33 ; 35]. D'autres auteurs corroborent également l'existence d'une période réfractaire. Ainsi David Ewans .et al trouvent une période réfractaire moyenne de 68 minutes, pour le joint zygapophysaire lombaire [8] et Pierre TRUDELLE indique une période réfractaire allant de 17 à 22 minutes (Watson P.et al) pour l'articulation métacarpo-phalangienne.

On peut expliquer physiquement ce temps de latence entre deux cavitations articulaires : en effet, lors d'une manipulation, une bulle ou poche de vapeur se forme et « aspire » vers elle une partie des gaz dissous contenus dans le liquide intra-articulaire. Cette bulle qui va imploser est composée de vapeur d'eau, de gaz préalablement dissout et de gaz préalablement occlus (germes de cavitation).

Les gaz dissous sont composés à 80% de CO<sub>2</sub> [2 ; 7]. Une fois sous forme de bulles l'ensemble des gaz, représentent 15 % à 20 % du volume de l'articulation [2]. Le **volume initial** de l'articulation **augmente subitement de 15 à 20 %**.

Quand la bulle principale implose, la vapeur d'eau retourne à l'état liquide, tandis qu'il se forme une multitude de microbulles résiduelles. Elles contiennent alors à la fois les gaz occlus et les gaz dissous. Le volume de ses microbulles va décroître progressivement, car il existe une **tension superficielle** à leur surface qui s'oppose à la **diffusion** des gaz. La tension superficielle d'une interface s'observe facilement dans le phénomène de **capillarité** (liquide aspiré dans un tube suffisamment fin). La tension superficielle ralentie seulement la diffusion des gaz et une grande partie du volume des microbulles retourne à l'état de gaz dissous. Mais, au fur et à mesure que le diamètre des microbulles diminue, la tension superficielle augmente empêchant toute diffusion de gaz. Il persistera donc ces gaz occlus sous forme d'infimes bulles (germes de cavitation). On retrouverait alors les conditions physiques antérieures à la manipulation, et cela en une vingtaine de minutes (pour les MCP).

En effet, la **relation de Henry** détermine l'équilibre de diffusion entre un liquide et un élément gazeux qui ont une interface plate. EPSTEIN et PLESSET(1950) [13] ont calculé le



temps de résorption d'une bulle de gaz dans un liquide (interface sphérique). En négligeant le terme de tension superficielle, ils obtiennent le temps de résorption suivant :

$$T_r = R_o^2 / 2D \cdot \rho_g / (C_s - C_\infty)$$

Pour une bulle d'air de 1 mm ( $R_o$ ), dans l'eau, sous une pression de 1 bar :

On a pour l'azote une concentration à saturation dans l'eau de 19 ppm (partie par million, en masse) et 43 ppm pour l'oxygène. Compte tenu des pressions partielles des deux éléments dans l'atmosphère, on obtient alors 15 ppm d'azote et 9 ppm d'oxygène. Soit 24 ppm d'air dans l'eau sous 1 bar. La constante de Henry vaut alors  $0.24 \cdot 10^{-6}$  (s/m)<sup>2</sup> et  $D$  qui est le coefficient de diffusivité de masse d'un élément vaut  $2 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s pour l'air dans l'eau.  $C_\infty = 0$  et  $C_s = 0.024$  Kg/m<sup>3</sup>.  $\rho_g$  qui est la masse volumique du gaz dans la bulle ici = 1 Kg/m<sup>3</sup> pour l'air. On trouve alors un temps de résorption de 1042 secondes soit **17 minutes** [13].

On retrouve mathématiquement des temps de résorption de bulles, proches de ceux retrouvés lors de manipulation. Il faut néanmoins relativiser ces chiffres. En effet, les conditions physiques de ces calculs diffèrent légèrement des conditions physiques du joint articulaire. Ainsi le liquide synovial possède des propriétés **rhéologiques** (propriétés physiques d'un fluide lors de son écoulement) très différentes de l'eau. Le liquide intra-articulaire est un **liquide non newtonien**, c'est-à-dire que sa viscoélasticité n'est pas représentée par une fonction linéaire. Elle n'est pas proportionnelle à la contrainte (anisotrope) et même diminue avec la vitesse de déformation (rhéofluidifiant). On pourrait alors penser que la viscoélasticité du liquide synovial influence la formation et l'implosion de la bulle principale et la vitesse de résorption des microbulles secondaires. Une étude a été réalisée sur la cavitation par impulsion laser, sur un liquide aux propriétés rhéologiques non newtoniennes (tel que le liquide synovial). Elle révèle que la viscoélasticité de ce liquide influence très peu les paramètres de cavitation. Ainsi on obtient les mêmes seuils de cavitation que dans l'eau [3]. Par contre le facteur de dépression intra-articulaire doit sans doute ralentir la résorption des gaz formés au cours de la cavitation, tout comme la probable forte tension superficielle du liquide synovial.



#### **4.7. Incidences des connaissances physiques de la cavitation intra-articulaire sur notre concept structurel de lésion**

La compréhension de ce phénomène physique, amène à réfléchir sur notre pratique thérapeutique quotidienne.

##### 4.7.1 Test de densité avant manipulation

Lors du test de densité ou, lors du Slack, on explore la plus ou moins grande capacité de déformation des tissus conjonctifs entre deux segments osseux (pour la manipulation structurelle synoviale). Cela nous informe sur les qualités dynamiques de ces tissus. Ainsi, on subjective la présence d'une éventuelle lésion tissulaire. La contrainte engendrée par ce test explorerait deux paramètres : la tension des éléments capsulo-ligamentaires péri-articulaires et la **tension liquidienne** intra-articulaire. En effet, nous avons vu plus en amont, l'existence de cette tension interne.

##### 4.7.2 Changement d'état biophysique du joint synovial et test de densité après manipulation

Le thérapeute doit refaire son test de densité sur le même joint conjonctif, après la manipulation. Non pas pour s'assurer d'un **changement d'Etat biochimique** du tissu péri-articulaire mais seulement pour s'assurer de la réelle **localisation** de son action. En effet s'il y a un changement d'état dans l'instant au cours de la manipulation, il ne se situe surtout pas au cœur du tissu conjonctif péri-articulaire. Il se situe au cœur d'un autre tissu conjonctif : **Le liquide synovial**. Ce changement d'**Etat** est celui de l'eau au cours de sa **vaporisation**. Il ne faut pas se laisser abuser par une soudaine et miraculeuse restauration des qualités visco-élastiques du tissu conjonctif, objectivée par un nouveau test de densité. Le joint articulaire synovial a simplement **perdu** temporairement sa **cohésion**, par rupture de son milieu continu. La présence de gaz dans le film liquidien, annihile quasiment tout effet ventouse (voir l'exemple de la seringue chapitre 1 : relation pression / volume). Le liquide devient temporairement compressible et décompressible par hétérogénéité. La disparition relative de la tension liquidienne va donner au thérapeute la sensation d'une plus grande souplesse des tissus. Cela va se traduire fonctionnellement, par une plus grande déformabilité donc une plus grande amplitude du joint. Il faut comprendre que la tension du liquide fait partie intégrante des propriétés physiques du joint synovial. Et cela indissociablement du tissu péri-articulaire. Seul un phénomène physique est cause de cette **modification soudaine et temporaire des propriétés mécaniques** du joint conjonctif. Notons toutefois qu'il y a quand même un léger **fluage** immédiat des tissus péri-articulaires.



Mais il n'est nullement spécifique de la manipulation, car il existe dans toutes les mises en tension tissulaires [13]. C'est donc un changement **d'état biophysique réversible** du liquide synovial qui est responsable de la modification immédiate de notre test de densité.

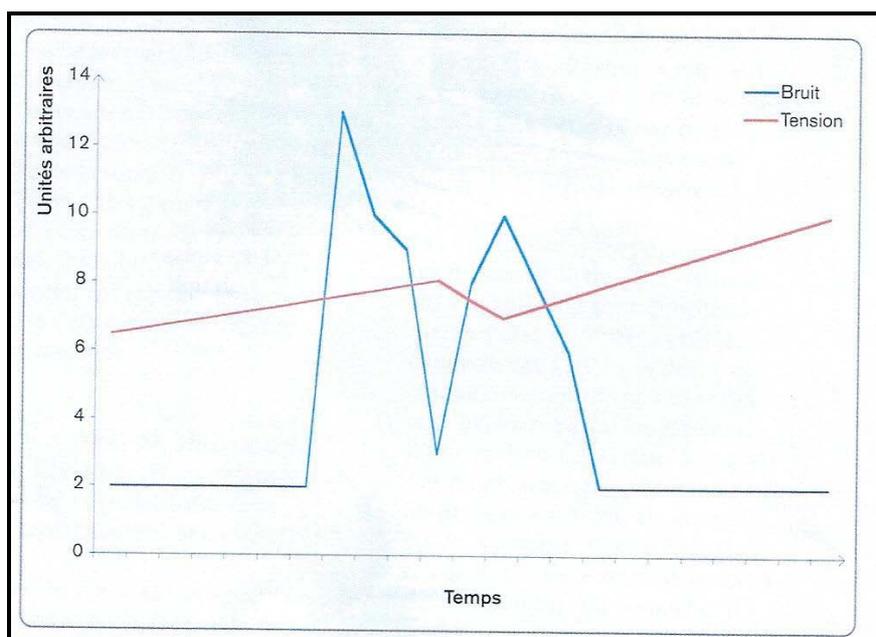
#### 4.7.3 Période réfractaire

Ainsi, si on admet l'existence d'une période réfractaire, il faut se résoudre à comprendre que l'on ne peut pas manipuler plusieurs fois un même joint synovial et obtenir plus d'un seul « crack ». Même si on change les paramètres de la manipulation, il est formellement impossible de faire craquer deux fois un même joint synovial au cours d'une séance. Si cela semble se produire, c'est que la cavitation se produit sur le joint controlatéral, le joint du dessus ou du dessous. Sans parler des manipulations à grand bras de levier, ou la cavitation se localise aléatoirement, en fonction de la qualité des tissus conjonctifs intercalés. Toutefois on peut après cavitation du joint conjonctif visé, refaire une autre manipulation de ce joint avec d'autres paramètres de direction de vitesse, d'accélération ou de masse, dans le seul but d'exploiter la viscoélasticité du tissu conjonctif péri-articulaire et de réinformer les tissus. En effet, durant la période réfractaire, la cohésion des surfaces articulaires est rompue par la présence de gaz au sein du film synovial. Ainsi, seuls les tissus péri-articulaires retiennent l'articulation en fin d'amplitude car l'effet ventouse est devenu quasi nul ; mais seulement pour une durée de quelques minutes. Toutefois, l'expérience pratique nous conduit à modérer ces propos. Il nous arrive parfois d'être certains d'avoir fait « craquer » deux fois de suite une même articulation. On peut introduire alors, la notion de **lésion**, qui empêche l'exploitation maximum du volume articulaire au cours d'une unique manipulation. **L'altération des propriétés dynamiques des tissus conjonctifs**, est un frein possible à la cavitation. Seule une partie du volume possible des gaz se vaporise (une partie des 15 % de gaz potentiel du joint). Au cours d'une deuxième manipulation avec d'autres paramètres de direction, de vitesse, on pourra alors exploiter l'autre partie des gaz potentiels de l'articulation. On retombera alors dans cette période réfractaire. On remarque tout de même que le bruit obtenu avec une seule manipulation d'un joint en lésion est plus important que ceux obtenus en deux fois. Il y a un rapport direct entre le volume de la bulle, la sonorité et l'intensité du « crack ».

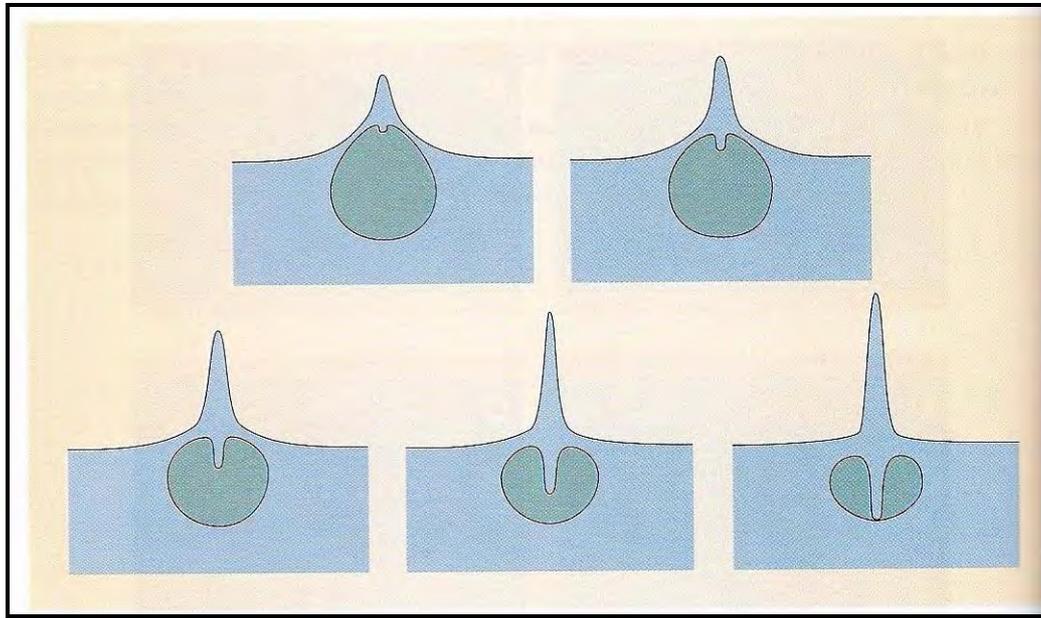


#### 4.8. Pression acoustique, onde de choc et information des tissus

S'il y a bien un moyen d'informer le tissu conjonctif de manière brève, locale, intense et isolée, c'est bien par l'implosion d'une bulle de cavitation. En effet on peut comparer le comportement sonore produit, avec un choc [13] : on parlera de pression acoustique. Une partie de l'énergie accumulée dans la mise en tension du joint synovial, se dissipe très localement par la formation et l'implosion d'une bulle de cavitation. Une autre partie de l'énergie est dissipée par remise en tension brusque du tissu capsulo-ligamentaire. Il y a deux pics informatifs pour les tissus, comme on le voit dans le graphique suivant. L'énergie libérée est évaluée entre 0.07 et 0.1 milli joules / mm<sup>3</sup> [30 ; 34]. Le son perçu est de 110 Hz pour certains [34] et de 250 à 750 Hz pour d'autres [25]. Mais tout port à croire que la fréquence provient de la relation entre le volume de la bulle et le volume articulaire potentiel. Sur une articulation métacarpo-phalangienne, la fréquence de plus grande amplitude est de 110 Hz. Pour les articulaire postérieur de C3 /C4, cette fréquence est comprise entre 285 et 380 Hz. Une partie de l'énergie se dissipe alors sous forme d'ondes sonores qui traverse les tissus jusqu'à notre oreille ! Devant la puissance des pics de pression locale occasionnés par l'implosion d'une bulle, on peut penser qu'ils influencent la polymérisation des macromolécules du liquide synovial, et donc sa viscoélasticité. Il est fort probable que les cellules contenues dans le liquide, subissent également une mécanotransduction (synthèse de protéines en réponse à un stress mécanique).



Graphique synchronisant le bruit et la tension appliquée à une articulation Métacarpo-phalangienne du III (adapté de Meal et Scott [34]). On observe deux pics sonores, la fin du premier bruit fait chuter la tension du tissu capsulaire (cavitation), le second bruit correspond à la remise en tension de la capsule.



Implosion d'une bulle au voisinage d'une surface libre .Absorption de l'énergie de cavitation par la surface .D'après Blake (1994) [13].

#### 4.9. Rôles physiologiques de la cavitation synoviale

Si la nature a sélectionné ce mécanisme, il y forcément une raison. En effet, le changement d'état de l'eau liquide en gaz, réclame énormément d'énergie par rapport à la quantité de matière concernée. De plus ce changement est réversible et reproductible. La cavitation intra-articulaire serait peut être un moyen d'absorber un surplus d'énergie qui aurait pu traumatiser le joint articulaire, si ce phénomène n'avait pas été possible. La capacité d'une articulation à caviter serait alors complètement physiologique et signerait une grande qualité dynamique des tissus qui la composent. Contrairement à ce que l'on peut entendre, aucune étude n'a montré d'effet négatif sur le cartilage, concernant les personnes qui se font régulièrement craquer les doigts [5], par contre les tissus péri articulaire eux sont susceptible d'être endommagés. Un autre mécanisme biophysique, qui utilise cette énorme dissipation d'énergie par la vaporisation de l'eau, est la transpiration, un moyen important de thermorégulation des animaux à sang chaud.



#### 4.10. Changements d'états biochimiques des tissus et modification des propriétés viscoélastiques du joint synovial

On a vu plus haut que c'est le changement d'état **biophysique** du liquide synovial qui provoquait la cavitation. C'est un changement d'état physique, instantané (10 microsecondes), furtif et surtout **réversible**. La solution de continuité produite par « fracture » du liquide, permet subitement un gain de volume articulaire de 15 à 20 %, ce volume correspond au volume de liquide initial, plus le volume de gaz produit. Il y a alors une modification transitoire des propriétés mécaniques du joint synovial.

Notre outil de mesure étant physique, il ne peut subjectiver qu'une différence de propriétés biophysiques entre différents joints synoviaux. Ce changement ou altération des propriétés biophysiques du joint synovial est dans notre concept, dû à une modification d'état **physico-chimique** des tissus. Mais nous n'avons en pratique quotidienne, aucun moyen de quantifier ce changement, sauf par ses conséquences biophysiques sur l'articulation.

Lorsqu'une articulation est en état inflammatoire, il y a une dépolymérisation des chaînes d'acides hyaluroniques, qui influence directement la viscosité dynamique du liquide synovial, mais il y a aussi une augmentation du volume du liquide donc de la pression [37]. Cette modification, empêche la cavitation de se produire. De même que l'imprégnation hormonale pendant la grossesse abaisse la viscoélasticité capsulo-ligamentaire du sujet (diminution du module de Young) le tissu ne serait donc plus en mesure d'accumuler suffisamment d'énergie nécessaire à la cavitation. Dans ces deux exemples, une modification biochimique tissulaire entraîne une modification des propriétés mécaniques du joint conjonctif. Nous postulons pour que l'inverse soit également possible. C'est la base absolue de notre traitement, c'est-à-dire que l'on doit pouvoir influencer la biochimie du tissu de façon directe et /ou réflexe, en le stimulant par une **information biophysique de cavitation** lors d'une manipulation.

## 5. LA CAVITATION INTRA ARTICULAIRE EN QUELQUES CHIFFRES

- Durée du craquement de 2 centièmes de secondes à 1 dixième de secondes
- Vibrations sonores riches en harmonique de 110 à 750 Hertz (fréquences audibles par l'oreille humaine entre 20 et 20 000 Hz)



- Dépression intra-articulaire synoviale de -2 à - 3 atmosphères lors d'une manipulation par cavitation
- Augmentation du volume intra- articulaire de 15 à 20 % (ensemble des gaz potentiels) lors d'une manipulation par cavitation
- Energie dissipée par cavitation évaluée de 0.07 à 0.1 milli joules par millimètre-cube
- Formation et implosion d'une bulle entre 1 et 10 millièmes de seconde
- Implosion de la bulle en 1 à 10 microsecondes
- Vitesse de l'interface liquide-vapeur de l'ordre de la vitesse du son
- Surface de contact sur la paroi lors de l'implosion de 10 à 100 microns
- Pression local sur les parois provoquées par l'implosion des structures de vapeur de l'ordre de la centaine de Méga-Pascal (environ 1000 atmosphères)

## 6. DISCUSSION

Dans notre modèle de compréhension, on dit que la lésion se situe dans le conjonctif du joint. En considérant ce joint comme une **unité tridimensionnelle** de différents conjonctifs, on peut dire que la lésion est **volumétrique**. Il faut donc avoir une intension « volumétrique » lors d'une manipulation et non de déplacement (si toutefois il y a une intension). Cette approche volumétrique et « thermodynamique » de la manipulation, est loin d'être aboutie, même si elle semble cohérente et s'approcher d'une réalité dite scientifique. Il persiste encore de nombreuses questions sans réponse, même après deux années passées à réunir et fusionner l'information. Quel gradient de pression adverse fait imploser la bulle, y a-t-il plusieurs bulles, quel est le mécanisme à l'origine de la dépression synoviale de repos, quelle est la force de tension superficielle réelle de ce liquide, quelle est la répartition exacte de la dissipation d'énergie, quel impact cela a sur la polymérisation des macromolécules et cellules du liquide synovial, enfin quel est le niveau d'intégration, cellulaire, tissulaire, systémique de ce message ?

Il faudrait bien sûr, faire et refaire de nombreuses expériences pour confirmer ou infirmer ces propos. Il ne manquerait plus que la motivation des professionnels, des laboratoires et bien sûr de budget dédié à cette recherche pour avancer sur cette voie.



## 7. CONCLUSION

Les mots utilisés dans notre concept et les modélisations de notre discipline thérapeutique, sont ceux utilisés en Mécanique des fluides. On retrouve dans les deux disciplines, des termes comme : variables d'état, variables de milieu, domaine de fonctionnement... Même si la rigueur du concept est aussi proche de la rigueur de cette physique, les définitions s'éloignent quelque peu. Dans un souci d'harmonisation du savoir interdisciplinaire, nous devons nous aligner sur les définitions dites de convention internationale ; c'est par la qualité et la cohérence des idées, définies par des mots justes, que nous sortirons de l'obscurantisme apparent de notre discipline. Ainsi, il faut différencier le changement d' « Etat biophysique » du liquide synovial à l'instant de la manipulation, du possible changement d' « état biochimique » des tissus articulaires, post-manipulatif utilisé dans notre modèle.

D'un point de vue physique, la manipulation se définirait par: une **quantité d'énergie** mécanique transmise, juste, adaptée et nécessaire à la cavitation d'un joint articulaire synovial. Mais du point de vue thérapeutique, c'est très différent car le « savoir- faire » prime sur le « Savoir ». Le savoir-faire thérapeutique, c'est savoir lancer son oreille interne (organe de l'équilibre), avec tact et mesure au moment opportun lors de la manipulation. Mais c'est aussi recevoir par cette même oreille, la récompense **sonore** en feedback de cette justesse (la cavitation). La manipulation est alors un jeu de communication et d'écoute patient-thérapeute, au sens plus large. Ce sont cette quantité et cette qualité du message énergétique, qui subliment notre Art de soigner. Telle l'oreille, se pourrait t'il que le « Savoir » puisse être absolu? Dans cette quête du Graal spécifiquement humaine, je n'ai avancé que d'un seul pas, mais d'un bloc uni. Ce pas symbolise la fin de mes études au sein de cette école dite « structurelle », mais surtout « structurante » pour l'esprit de l'étudiant.



## 8. BIBLIOGRAPHIE

1. Beffa R, Mathews R, **Does the adjustment cavitate the targeted joint? An investigation into the location of cavitation sounds**, J Manipulative Physiol Ther, **26**:356-64, jul-aug 2003.
2. Brodeur R., **The audible release associated with joint manipulation**, in Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics, vol. 18(3), pp. 155-164, 1995.
3. Brujan E-A, Williams P-R, **Cavitation phenomena in non-newtonian liquids**, Chemical Engineering Research and Design, 84: 293-299, April 2006.
4. Cascioli V, Corr P, Till Ag AG, **An investigation into the production of intra-articular gas bubbles and increase in joint space in the zygapophyseal joints of the cervical spine in asymptomatic subjects after spinal manipulation**, J Manipulative Physiol Ther, **27**:e2, feb 2004.
5. Castellanos J, Axelrod D, **Effect of habitual knuckle cracking on hand function**, Annals of the rheumatic diseases, 49: 308-309, 1990.
6. Collectif, **Dictionnaire de la physique, mécanique et thermodynamique**, Encyclopaedia Universalis, Albin Michel, 2001, 1231 pages.
7. Courty J-M, Kierlik E, **Craquement de doigts**, Pour la Science, N° 349, Nov 2006.
8. David Ewans, Cosma G, and al, **The Refractory period of the audible crack after lumbar manipulation: a preliminary study**, J Manipulative physiol ther , 31:199-203, 2008.
9. David Ewans, Nicolas Lucas, **What is “manipulation”? A reappraisal**, Manual Therapy 15 ,286-291,2010
10. Delhaye J.M., **Thermohydraulique des réacteurs**, Collection/Sujet Génie Atomique /Nuclear Engineering, 508 pages, 2008.
11. Dunning J, Rushton A, **The effects of cervical high-velocity low-amplitude thrust manipulation on resting electromyographic activity of the biceps brachii muscle**, Man Ther, **14**:508-13, oct 2009.



12. Evans DW, Breen AC, **A biomechanical model for mechanically efficient cavitation production during spinal manipulation: prethrust position and the neutral zone**, J Manipulative Physiol Ther, **29**: 72 - 82, jan 2006.
13. Franc J.P. et al, **La Cavitation, mécanismes physiques et aspects industriels**, Génie atomique, 582 pages EDP sciences, 2000.
14. Fung Y.C., **Biomechanics: mechanical properties of living tissues**, second edition springer, 1993.
15. Gehin Alain, **Concept de tenségrité en ostéopathie**, Sauramps médical, 2010.
16. Haas M, **The physics of spinal manipulation. Part IV. A theoretical consideration of the physician impact force and energy requirements needed to produce synovial joint cavitation**, J Manipulative Physiol Ther, **13**:378-83, Sep 1990.
17. Herzog W, **The biomechanics of spinal manipulation**, journal of bodywork and movement therapies, 14, 280-286, 2010.
18. Herzog W, Zhang YT, Conway PJ, Kawchuk GN, **Cavitation sounds during spinal manipulative treatments**, J Manipulative Physiol Ther, **16**:523-6, oct 1993.
19. Kimbrough D, **Henry's law and noisy knuckles**, in Journal of Chemical Education, vol. 76, n° 11, p. 1509, 1999.
20. Marina G.Protapapas,Tyler C Cymet,**Joint cracking and popping: Understanding noises that accompany articular release**,JAOA.vol 102.N°5.May 2002.
21. Miller T, Smiley JT, **Cavitation sounds during spinal manipulative treatments**, J Manipulative Physiol Ther, **17**:268-70, may 1994.



22. Moholkar VS, Rekveld S, Warmoeskerken MM, **Modeling of the acoustic pressure fields and the distribution of the cavitation phenomena in a dual frequency sonic processor**, *Ultrasonics*, **38**:666-70, mar 2000.
23. Patek S. N, and R. L. Caldwell, **Extreme impact and cavitation forces of a biological hammer: strike forces of the peacock mantis shrimp *Odontodactylus scyllarus***, *The Journal of Experimental Biology* 208, 3655-3664, Published by The Company of Biologists 2005.
24. Reggars JW, **Recording techniques and analysis of the articular crack, A critical review of the literature**, *Australas Chiropr Osteopathy*, **5**:86-92, nov 1996.
25. Reggars JW., **The manipulative crack. Frequency analysis**, *Australas Chiropr Osteopathy*, Jul; 5(2): 39 – 44, 1996.
26. Reggars JW, **The therapeutic benefit of the audible release associated with spinal manipulative therapy, A critical review of the literature**, *Australas Chiropr Osteopathy*, **7**: 80 - 5, jul 1998.
27. Reggars JW., **Multiple channels recording of the articular crack associated with manipulation of the metacarpophalangeal joint. An observational study**. *Australas Chiropr Osteopathy*, 8 (1) : 16 - 20, mar 1999.
28. Rosner, Anthony PhD, **Cavitation Emptor: Tracking the Holy Grail of Manipulation**, *mic Chiropractic*, Vol. 22, Issue 19, 2004.
29. Ross JK, Bereznick DE, McGill SM, **Determining cavitation location during lumbar and thoracic spinal manipulation: is spinal manipulation accurate and specific?**, *Spine (Phila Pa 1976)*, **29**:1452-7, jul 2004.
30. Scientific American, **What makes the sound when we crack our knuckles**, *Scientific American*, oct 2001.
31. Science et vie, **D'où vient le craquement des articulations**, N° 1065, p 130, juin 2006.



32. Simkin P A, **Habitual knuckle cracking and hand function**, *Ann Rheum Dis*, 49: 957, 1990.
33. Simkin A Peter, **Feeling the pressure**, *Annals of the rheumatic Diseases*; **54**: 611-612, 1995.
34. Trudelle Pierre, **Beaucoup de bruits autour du bruit articulaire**, *Kinésithérapie, les cahiers*, N° 29-30, p 76-80, Mai Juin 2004.
35. Tsujino T, **Cavitation damage and noise spectra in a polymer solution**, *Ultrasonics*, Vol 25, Mars 1987.
36. Unsworth A., Dowson D., Wright V., **Cracking joints, A bioengineering study of cavitation in the metacarpophalangeal joint**, *Annals of the Rheumatic Diseases*, 30, 348-358, 1971.
37. Valdiguié P, **l'observatoire du mouvement : le liquide synovial**, n°26, 2008.

## 9. ANNEXES

### 9.1. Annexes 1

Une petite parenthèse au sujet du « contact des surfaces articulaires » peut être ouverte. On peut mener une réflexion sur la véracité du contact des surfaces. Il est d'actualité d'entendre que les surfaces cartilagineuses d'une articulation synoviale ne se touchent jamais et ce malgré les contraintes qui lui sont appliquées. Voir même dans les principes de tenségrité que, plus on contraint une articulation, plus les surfaces s'écartent ! En effet, les propriétés du liquide synovial, de par la forte teneur en molécule de très haut poids moléculaires hydrophiles, empêche tout contact réel et permet de maintenir un volume d'interface non-virtuel entre les deux surfaces [Fung]. Si on regarde l'aspect de cette surface au microscope électronique, on s'aperçoit qu'elle n'est pas lisse. Elle présente de multiples villosités qui forment des demi-sphères creuses de 15 à 30 micromètres de diamètre. Elles sont réparties de façon géométrique. Alors si les surfaces ne sont pas lisses, on pourrait penser que le coefficient de friction ou frottement entre deux surfaces est important. Mais on sait en Tribologie (Etude des Frottements), que le cartilage articulaire, à un coefficient de frottement



inférieur à celui du frottement de deux glaçons entre eux ! (Comme faire du patin à glace, avec des lames de glace à la place de l'acier !). Il faut réunir la tribologie et la Rhéologie (Etude des Ecoulements), pour tenter d'expliquer cet exploit. Car si c'est possible, c'est par le trio : surfaces-liquide-surfaces. La surface organise le **flux turbulent** de la **couche limite** du liquide lorsqu'on lui applique une contrainte de compression-cisaillement par exemple. Ce phénomène complexe est exploité par la peau des requins ou les ailes des avions pour réduire la perte d'énergie produite par frottement dans l'eau ou dans l'air lors d'un déplacement. La structure de la surface dite **poreuse**, emprisonne virtuellement une fraction infime de fluides à son contact par un flux turbulent rotatif, laissant passer un flux dit **laminaire** au-dessus (comme un tapis de roulements à bille qui ferait glisser votre valise droit devant vous à l'aéroport !). L'unité articulaire en contrainte enfermerait virtuellement un liquide au flux laminaire de cisaillement, entre deux flux de liquide turbulent de surface.

Les villosités servent sans doute aussi, à augmenter la surface d'**échange** liquide-cartilage, car ce dernier n'a pas de vaisseaux, ni de nerfs. Les seules sources de **nutrition** et d'**information** sont donc l'os sous-chondral, et surtout le liquide synovial. Elles doivent également servir à la régulation de la quantité de liquide présent dans l'articulation pour maintenir le ratio Pression-Volume du liquide lors de brusque changement de contrainte. Elles doivent également être à l'origine de la dépression sous atmosphérique du liquide au repos, par un jeu de « sécrétion-absorption », « membrane synovial-cartilage ». Le cartilage pourrait absorber plus de liquide que ne produit la membrane synoviale et ainsi maintenir un delta de pression oncotique dû à la teneur en macromolécule à haut poids moléculaire fortement hydrophile, favorisant par la même occasion l'effet de tension superficielle du liquide. Même si ce TER développe des notions d'**autocontrainte** et de **continuité** anatomique des **éléments** en **tension**, comme ce qu'on peut apprendre du concept de Tenségrité, ce n'est pas pour les mêmes raisons. La séparation (et non la compression) des surfaces sous la contrainte est une notion contre intuitive. Elle est obtenue ici lors de contrainte dépassant le seuil de changement d'état du liquide, et non pour toute contrainte, comme dans le concept de Tenségrité, même si la dépression intra articulaire y est mentionnée [15]. Cette petite parenthèse se referme sans contenir aucune référence bibliographique, elle est le fruit de petites réflexions personnelles qui gravitent autour du sujet de la cavitation synoviale. Elle ne peut donc pas prétendre être totalement juste.



## 9.2. Annexes 2

Même si on sait que la manipulation induit une baisse du tonus dans le myotome correspondant [11], a-t-on raison de penser qu'elle induirait aussi une modification de tonus de l'angiotome et une vasodilatation reflexe. Nous « Testons » les caractéristiques physiques d'une lésion, pour la même raison que nous définissons la « lésion », par une modification de caractéristiques physiques d'un tissu conjonctif. Car notre outil est purement physique : la manipulation.

Mais pourquoi introduire une notion de sensibilité neurologique (sensible quand on y touche) dans notre repérage de zone en lésion, si elle ne fait pas partie intégrante de la définition de la lésion tissulaire réversible. L'amalgame entre sensibilité douloureuse consciente et boucle reflexe neurocirculatoire sympathique inconsciente, est-elle justifiée. On ne manipulerait ainsi, que les tissus altérés dans leurs propriétés dynamiques, avec en plus une notion de sensibilité nociceptive consciente, qui indiquerait l'intégrité de la boucle reflexe neurocirculatoire sympathique nécessaire à notre action thérapeutique. N'est-ce pas mettre une censure dogmatique sur le concept de **lésion synaptique** réversible. Si on ne manipule que des altérations tissulaires dites « sensibles », n'est-ce pas tout miser sur la théorie du reflexe orthosympathique, et écarter en conscience d'autres mécanismes de régulation tissulaire. Quel crédibilité aurait ont si l'interprétation de ce reflexe n'était que pur fantasme, devant l'extraordinaire système d'homéostasie produite par le monde animal. Alors que mes questions « bio-physico-chimiques », ont trouvé une amorce de réponse cohérente construit sur deux années, en voici quelques autres sur l'intégration du message de cavitation sur le système neurologique.

