

La fusion froide

M. Jaminon*

Université de Liège, Institut de Physique B5, Sart Tilman, B-4000 Liège 1

Maison de la Science, 22 Quai Van Beneden, 4000 Liège

(October 15, 2001)

Abstract

We draw a brief review of the scientific events that have preceded the announcement of the achievement of cold fusion. The works of the two groups, Pons-Fleischmann and Jones-Palmer are presented with some details. The present situation in thermonuclear and in muonic fusions is summarized.

*e-mail: Martine.Jaminon@ulg.ac.be

I. INTRODUCTION

Les événements qui ont concerné et concernent encore la fusion froide constituent une véritable saga. Les décrire en quelques pages ne ferait que reprendre un des nombreux résumés, extrêmement réductifs, qui leur ont été consacrés. J'ai donc choisi dans ce texte de privilégier quelques points précis, moins souvent développés, me focalisant plus sur les événements précédant la querelle entre les équipes rivales Pons-Fleischmann et Jones-Palmer que sur la dispute proprement dite. Pour une approche exhaustive du problème, je convie le lecteur à se pencher dans la lecture des ouvrages remarquables de Frank Close "To hot to handle", de Gary Taubes "The Short Life and Weird Times of Cold Fusion" ou de John R. Huizeng "Cold Fusion, The Scientific Fiasco of the Century".

II. AVANTAGES DE LA FUSION NUCLÉAIRE

Il est bien connu que la production d'énergie au cours de réactions nucléaires peut se faire de deux manières.

- A partir de la fission d'un noyau lourd en deux noyaux de masse comparable. Celle-ci est généralement induite par la capture de neutrons lents ou par bombardement avec des noyaux légers (p, d...) ou un rayonnement γ . Ceux-ci fournissent l'énergie nécessaire pour vaincre la barrière de potentiel qui empêche une fission spontanée. Lors de la fission, le rapport N/Z initial est conservé dans les deux fragments de fission. Ceux-ci sont donc trop riches en neutrons par rapport à la ligne de stabilité. Il en résulte une émission très rapide (10^{-17} s) de neutrons suivie généralement d'une émission de rayons γ . C'est le principe de la bombe A et des réacteurs nucléaires. Ex: $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{94}\text{Sr} + ^{140}\text{Xe} + 2n + \Delta E$, où ΔE est l'énergie libérée.
- A partir de la fusion de deux noyaux légers qui libère une partie de l'énergie de liaison des deux noyaux initiaux. C'est le principe de la bombe H.
Ex: $d + d \rightarrow ^3\text{He} + n + \Delta E$.

Les deux réactions, fission et fusion, reposent sur les deux observations suivantes:

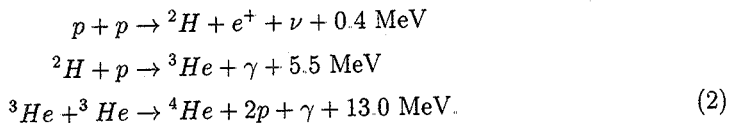
- La masse du(des) noyau(x) initial(aux) est supérieure à la masse totale des produits de la réaction.
- Ce défaut de masse se retrouve sous forme d'énergie en vertu de la relation d'Einstein $E = mc^2$ qui stipule l'équivalence entre masse et énergie. Les énergies libérées par réaction nucléaire sont de l'ordre du MeV soit un million de fois supérieures à celles impliquées dans les réactions chimiques.

Si la fission nucléaire est relativement aisée à réaliser et à contrôler, il n'est guère aussi évident d'obtenir la fusion de noyaux légers. En effet, l'attraction nucléaire a une portée de l'ordre du fermi (10^{-15} m) alors que la répulsion coulombienne entre les noyaux tous deux chargés positivement agit sur une distance de l'ordre de la taille de l'atome (10^{-10} m). Il faut donc atteindre des pressions énormes et des températures extrêmement élevées pour vaincre cette répulsion coulombienne. A de telles températures, les atomes n'existent plus en tant que tels. Il se forme un plasma, quatrième état de la matière où électrons et noyaux se déplacent librement les uns par rapport aux autres. Densité (n) et température (T) se combinent avec un troisième paramètre, le temps de confinement (τ), pour donner le critère de Lawson

$$\begin{aligned} nT\tau &= 10^{28} \text{ m}^3\text{sK} \quad (\text{breakeven}) \\ nT\tau &= 6 \cdot 10^{28} \text{ m}^3\text{sK} \quad (\text{ignition}) \end{aligned} \quad (1)$$

qui doit nécessairement être vérifié pour atteindre le breakeven (gain de puissance = 1) ou l'ignition (gain de puissance = ∞). Quand l'ignition est atteinte, le réacteur à fusion fonctionne sans apport d'énergie. Se posent alors les questions suivantes. Comment contenir ou confiner ce plasma? Comment amener le carburant dans les conditions requises à la fusion (bâptisée fusion thermonucléaire contrôlée) tout en recueillant plus d'énergie que ce qu'on en apporte. Problèmes extrêmement difficiles sur lesquels travaillent de nombreux laboratoires depuis plus de 50 ans. On peut alors se demander pourquoi physiciens et ingénieurs s'acharnent à reproduire sur terre ce qui se passe, selon les médias, dans le soleil?

Il faut d'abord corriger l'image médiatique de la fusion thermonucléaire. En effet, à part le phénomène de fusion en lui-même, ce qui se passe dans un réacteur à fusion est assez différent de ce qui se passe à l'intérieur du soleil. Tout d'abord, la température du soleil n'est que de 15 millions de degrés, alors que la fusion en réacteur demande des températures de plus de 100 millions de degrés. Ensuite le carburant est totalement différent. Au niveau du soleil, c'est le cycle du proton qui fournit une part du rayonnement qui arrive sur terre:



probabilité de réaction entre les 2 protons est très faible. Ceci permet certes de limiter la vitesse avec laquelle le soleil brûle son carburant mais implique également qu'on ne peut pas rêver à la fusion de deux protons dans un quelconque appareillage pour produire de l'énergie. Dans les réacteurs à fusion, ce sont le deutérium et le tritium qui fournissent le carburant. Les températures requises et les produits de réactions sont indiqués dans la table ci-dessous.

Exemples de reactions de fusion	Température requise (10 ⁶ degrés)
$d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3.2 \text{ MeV}$	400
$d + d \rightarrow t + p + 4.0 \text{ MeV}$	400
$d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$	45

Après cette mise au point, passons aux cinq avantages majeurs de la fusion thermonucléaire par rapport à la fission.

1. Absence de production des gaz rejetés par les centrales thermiques classiques: CO_2 , SO_2 , NO_x , ... La fusion ne crée pas d'effet de serre, ni de pluie acide, elle n'attaque pas la couche d'ozone.
2. Absence de production de cendres radioactives sous forme d'actinides à longue durée de vie, d'où apports économiques et écologiques considérables.
3. Absence de réaction en chaîne et de masse critique. Plus de Tchernobyl possible!
4. Tout incident provoquerait l'arrêt de la réaction de fusion.
5. Les combustibles sont inépuisables. 10g de deutérium et 15g de tritium produiraient l'électricité utilisée en moyenne par un Européen pendant toute sa vie. Vu la quantité d'eau sur terre, les combustibles sont suffisants pour tenir des centaines de millions d'années, même en tenant compte d'un accroissement de nos besoins en énergie.

Comme le tritium est radioactif avec une durée de vie courte de 12 ans, on peut néanmoins s'inquiéter quant aux conséquences potentielles de cette radioactivité. Les risques sont en fait beaucoup moins grands que dans le cas d'une centrale à fission, puisque il n'y a pas possibilité d'emballement et que la cendre de la réaction, l'hélium, est un gaz chimiquement inerte et non radioactif. De plus, un maximum de 5kg de tritium devrait être stocké sur le site d'une centrale à fusion et à n'importe quel moment, la quantité de tritium dans le réacteur ne devrait pas dépasser 2 grammes. Enfin, le tritium utilisé est produit dans le réacteur même, en boucle fermée. Seuls le deutérium et le lithium nécessaires à la production du tritium doivent être transportés sur le site.

III. FUSION: ETAT DES LIEUX

Si le sujet de cette conférence concerne principalement la fusion froide, il convient cependant de faire un bref bilan de la situation des recherches en fusion "traditionnelle".

A. Fusion muonique

Seul phénomène de fusion froide reconnu actuellement, la fusion muonique consiste à faire fusionner deux noyaux, par exemple de deutérium, en diminuant considérablement la portée de la répulsion coulombienne par remplacement de l'électron par un muon. En effet, puisque le muon est 207 fois plus massif que l'électron, la taille de l'atome, dit muonique, est réduite dans une proportion similaire, ce qui augmente fortement la probabilité d'effet tunnel et donc de fusion. Dans la réaction de fusion utilisée, le muon est libéré à nouveau. Il sert donc de catalyseur et on pourrait avoir l'impression que cette fusion à froid est réalisable sans problème. Mais le temps de vie du muon n'est que de 2 microsecondes. Il n'existe donc pas dans la nature et la fusion muonique requiert sa fabrication dans des accélérateurs qui consomment énormément d'énergie. Des estimations théoriques ont montré qu'il fallait qu'un seul muon provoque entre 250 et 1000 réactions pour rentabiliser la fusion muonique. Actuellement, on en est au maximum à 150 réactions, le nombre de ces réactions étant principalement limité par le fait que le muon s'attache à l'hélium, formant avec celui-ci un système stable. Les recherches sur la fusion muonique sont majoritairement poursuivies à TRIUMPH (Canada's National Laboratory for Particle and Nuclear Physics, Vancouver, Canada), à l'Université d'Uppsala (Suède), aux KEK (High energy accelerator research organization) et RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research), tous deux situés au Japon et au RAL (Rutherford Appleton Laboratory, Grande Bretagne)

B. Fusion thermonucléaire par confinement magnétique

1. Confinement du plasma

Les champs magnétiques permettent de confiner un plasma en forçant les particules chargées qui le constituent à décrire un mouvement hélicoïdal le long des lignes de champ. Actuellement, les lignes de champ magnétique sont elles-mêmes des hélices le long desquelles les particules de plasma sont confinées. Il existe trois systèmes de production de ces champs magnétiques hélicoïdaux.

- *Les Tokamaks.* Dans un Tokamak, le champ hélicoïdal est produit par la superposition d'un champ toroïdal, créé par une série de bobines disposées autour du tore et d'un champ poloïdal créé par un courant électrique intense circulant dans le plasma.
- *Les Stellarators.* Dans un Stellarator, le champ hélicoïdal est directement produit par une série de bobines qui ont elles-mêmes une forme d'hélice. Il n'y a pas de courant produit dans le plasma.

- *Striction par champ inversé* (RFP). Ce système fonctionne sur le même principe que le Tokamak, si ce n'est que le courant circulant dans le plasma est beaucoup plus élevé que dans un Tokamak pour le même champ toroïdal.

2. Chauffage du plasma

Dans les tokamaks et les RFP, le courant circulant dans le plasma et créant la composante poloidale du champ sert aussi à chauffer le plasma par effet Joule. Lorsque la température atteint 10 millions de degrés, la résistivité du plasma diminue fortement et il faut adjoindre des systèmes de chauffage pour poursuivre l'élévation de température. Dans les stellators, l'absence de courant implique que ces systèmes de chauffage doivent fournir toute l'énergie nécessaire. Trois méthodes de chauffage sont actuellement utilisées.

- Injection de faisceau d'atomes neutres, fortement accélérés. Ionisés dans le plasma, ils sont confinés le long des lignes de champ. Par collision successives, leur énergie est redistribuée et la température augmente.
- Absorption d'énergie électromagnétique sous forme d'un champ radio-fréquence correspondant aux fréquences cyclotroniques des ions et des électrons.
- Compression adiabatique du plasma par augmentation progressive du champ magnétique poloidal. Cette méthode est néanmoins moins utilisée (uniquement à Princeton) car elle requiert des techniques de mode pulsé très difficiles à mettre en oeuvre.

La température atteinte est de l'ordre de 10^8 degrés, le temps de confinement est relativement long ($\tau \approx 10$ s) ce qui permet des densités assez faibles $n \approx 10^{14}$ atomes/cm³ (10^{-5} fois la densité de l'air). Pendant dix-sept ans, le JET (Joint European Torus, Grande-Bretagne) fut un des plus importants projets européens en matière de fusion par confinement magnétique. Le 1^{er} janvier 2000, le JET s'est arrêté pour céder la place à la collaboration ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). D'autres recherches sont en cours à Jülich au KFA en collaboration avec le laboratoire de physique des plasmas de l'Ecole Royale Militaire à Bruxelles. Le Tokamak utilisé y porte le nom de TEXTOR (Tokamak EXperiment for Technology Oriented Research).

C. Fusion thermonucléaire par confinement inertiel

Un flux d'énergie très intense, produit par un laser est focalisé sur une petite bille de deutérium et de tritium dont le diamètre devrait être de 1 mm dans les futurs réacteurs

thermonucléaires. Actuellement cette bille a les dimensions d'un grain de sable. Ce flux d'énergie provoque la détente de l'ablateur ¹ qui induit dans le plasma une onde de choc, augmentant la température et permettant ainsi le phénomène de fusion.

Dans ce cas, le temps de confinement est extrêmement court ($\tau \approx 3 \cdot 10^{-11}$ s) ce qui nécessite des densités élevées ($n \approx 3 \cdot 10^{25}$ atomes/cm³) pour une même température de 10⁸ degrés. L'énergie des lasers devrait être de l'ordre de quelques dizaines de mégajoules, ce qui n'est pas encore atteint à ce jour. En 2008, s'achèvera la construction du NIF (National Ignition Facility) à LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory), installation disposant de 192 lignes de faisceau laser de 5.2 kJ par faisceau. Cette installation succèdera au NLF (Nova Laser Facility), en fonctionnement entre 1985 et 1999, qui disposait de 10 faisceaux laser.

Une autre méthode consisterait à irradier la cible avec des faisceaux d'ions lourds, fabriqués dans les accélérateurs. Très récemment, Ryosuke Kodama et ses collaborateurs de l'Université d'Osaka ainsi que des chercheurs du Rutherford Appleton Laboratory, de l'Imperial College et de l'Université de York ont annoncé dans *Nature* l'obtention de l'ignition à partir d'une nouvelle technique de confinement inertiel. Selon cette technique, l'onde de choc est remplacée par un second pulse laser qui initie la réaction en chaîne. Elle permettrait de diminuer d'un facteur 2 l'énergie nécessaire du premier laser.

IV. FUSION FROIDE

Comme on vient de le voir rapidement, en 2001, la fusion thermonucléaire est encore loin de pouvoir être considérée, sur le plan commercial, comme une source d'énergie. On peut donc imaginer sans difficulté l'impact qu'eut la conférence de presse de Pons et Fleischmann lorsqu'ils annoncèrent le 23 mars 1989 qu'ils avaient réalisé la fusion à froid de deux noyaux de deutérium en un noyau de tritium avec émission de neutrons pour à peine quelques centaines de dollars. Juste une batterie, de l'eau et du palladium métallique. Impact d'autant plus important que le tritium et les neutrons produits lors de cette fusion sont des éléments essentiels lors de la fusion thermonucléaire non contrôlée dans les bombes H. Les Etats-Unis ont un stock de tritium de 100 kg, incluant le tritium des bombes. Comme la demi-vie du tritium est de 12,3 ans, 5,5% du tritium se désintègre chaque année, demandant la fabrication de 5 à 6 kg de tritium pour conserver le stock.

¹composant sans propriété thermonucléaire intéressante (silice ou matière plastique quelconque) formant la couche extérieure de la bille

Le nombre d'Etats possédant la bombe H est relativement restreint parce que la technologie de fabrication du tritium est extrêmement pointue. Mais cette nouvelle fusion froide, à la fois productrice de tritium et très simple à réaliser, aurait pu modifier fortement le rapport de force entre les Etats. De plus, on pouvait s'inquiéter de la puissance extraordinaire qu'auraient les Etats possédant le palladium comme ressource minérale naturelle, c'est-à-dire l'ex URSS et l'Afrique du Sud.

A. Travaux préliminaires

Les coïncidences que présente cette aventure ultra-médiatisée de la fusion froide doivent inévitablement paraître étranges à toute personne ayant un sens critique tant soit peu développé. Corneille et Racine retrouveraient dans cette mise en scène les trois chevaux de bataille du théâtre classique. *Unité de temps*: les recherches menées par Pons et Fleischmann, d'une part, et celles développées par Stevens et Jones, d'autre part, aboutirent simultanément, conférence de presse ou soumission d'article à l'appui. *Unité de lieu*: l'université de l'Utah à Salt Lake City et la Brigham Young University à Provo sont distantes de quelques miles. Enfin, *unité d'action*: même chasse au trésor pour une énergie peu coûteuse et inépuisable. Comment de telles coïncidences parentelles avoir lieu?

Une idée géniale ne sort pas du néant. Elle s'inscrit souvent dans un contexte de recherches que d'autres ont amorcées antérieurement. Un peu comme la vedette américaine chauffe la salle avant le passage de l'illustre chanteur. L'idée que la fusion de l'hydrogène pourrait se réaliser à basse température date des années 20. Un des dirigeables de l'Allemand Ferdinand Graf von Zeppelin ayant pris feu aux USA, l'hydrogène avait été remplacé par de l'hélium comme gaz porteur. Or l'Allemagne possédait très peu d'hélium et les USA, producteur principal, ne désiraient pas lui en fournir, si peu de temps après la première guerre mondiale.

C'est pourquoi, deux chimistes allemands de l'Université de Berlin, Fritz Paneth et Kurt Peters se mirent en quête d'un nouveau moyen de production d'hélium. La récente découverte de la structure des atomes leur suggérèrent que l'hélium pouvait être fabriqué à partir d'hydrogène. Encore fallait-il trouver les conditions dans lesquelles cette fusion pourrait se produire. Paneth et Peters connaissaient déjà la grande affinité du palladium pour l'hydrogène (le palladium peut absorber jusqu'à 900 fois son propre volume en gaz d'hydrogène). L'hydrogène remplit les espaces vides entre les atomes de palladium. Il en résulte une forte pression interne (plusieurs milliers de fois la pression atmosphérique) pouvant augmenter les chances de fusion. Ces chercheurs firent diffuser l'hydrogène au travers d'un tube capillaire en palladium chauffé au rouge. Des traces

d'hélium furent effectivement détectées mais en bien trop petite quantité pour remplir un dirigeable!

Un autre chercheur entra alors dans le jeu. John Tanberg, futur directeur d'Electrolux, eut connaissance des travaux de Paneth et Peters et anticipa le second ingrédient des travaux de Pons et Fleischmann: il introduisit le phénomène d'électrolyse qui, par la séparation des ions H^+ et O^- , utilisait à bon escient la force électrique entre les H^+ et la cathode en palladium. Son expérience produisit de l'hélium et de l'énergie. Fort de son succès, il déposa en 1927 un brevet qui fut rejeté sur l'argument que la description était si imprécise que même un expert était incapable de reproduire l'invention. Le dénouement de cette aventure est rapporté dans le livre *Radiation from Radioactive Substances* de Chadwick, Ellis et Sir Ernest Rutherford et publié en 1939. Une explication tout à fait prosaïque justifiant la présence d'hélium fut avancée: toute surface en verre peut absorber une quantité détectable d'hélium en provenance de l'atmosphère, après seulement un jour de contact avec l'air! L'hélium observé n'était donc pas un produit de fusion mais le résultat d'une interaction avec l'environnement.

On sait actuellement que la fusion de deux noyaux d'hydrogène ne donnera jamais un noyau d'hélium, dont la stabilité requiert la présence de 1 (3He) ou 2 neutrons (4He). Mais, dans les années 20, le neutron n'avait pas encore été découvert (Chadwick 1932) et on peut donc comprendre l'erreur de Paneth et Peters. Lorsque le deutérium fut découvert en 1931, Tangers refit son expérience en remplaçant l'eau (H_2O) par de l'eau lourde (D_2O) où les atomes d'hydrogène sont remplacés par des atomes d'hydrogène lourd ou deutérium. Les conclusions de ses travaux peuvent se résumer ainsi: pas de production d'hélium ou production non mesurable, pas de production d'énergie! Energie pour laquelle ces recherches sur la fusion commençaient à se faire, indépendamment de la production d'hélium.

Les travaux de Jones ont aussi été anticipés quelque 50 ans auparavant mais cette fois, c'est en Inde et non en Allemagne que l'histoire débuta. Lorsque le phénomène de condensation des particules de spin entier ou bosons (condensation de Bose-Einstein) fut connu, phénomène crucial pour le comportement de l'hélium liquide, produire de l'hélium devint très vite indispensable pour le fonctionnement de laboratoires modernes où des expériences à basse température sont réalisées. Dans les années 20, encore une fois, des géologues anglais trouvèrent la présence d'hélium au voisinage de sources chaudes dans le nord de l'Inde. Pendant de très nombreuses années, Shyamadas Chatterjee, collègue de Bose, tenta par diverses recherches d'expliquer cette présence. Cependant, ce n'est qu'au début des années 80 que Chatterjee, inspiré par

les travaux de trois soviétiques² émit l'hypothèse que l'hélium trouvé près des sources, pourrait être produit lors d'un phénomène de fusion à une profondeur de 50 kilomètres, là où la pression et la température sont extrêmement élevées. Il fit part de son idée au directeur du cyclotron de Calcutta, Bikash Sinha qui n'y crut pas et la laissa momentanément - tomber aux oubliettes.

Entretiens, à des milliers de kilomètres, Paul Palmer de la Brigham Young University travaillait sur la présence d'hélium dans l'atmosphère. Il avait pour idée que la grande quantité d'³He mesurée pouvait s'expliquer, tout en gardant le concept de la Terre vieille de plusieurs milliards d'années comme le suggère la datation par le ¹⁴C, en supposant qu'un phénomène de fusion se produisait à tout moment. Mais où se produisait-il et comment? En 1986, Palmer eut aussi connaissance de l'article des soviétiques qui suggéraient les muons, particules cosmiques versions lourdes des électrons, comme catalyseur de la fusion dans les métaux étudiés. Ayant pris connaissance des travaux de Stephen Jones qui tentait depuis quatre ans d'induire la fusion en laboratoire à l'aide de muons, ils entamèrent une collaboration pour produire une fusion froide à l'intérieur de métaux, dans le but de voir si la chaleur de la Terre et l'³He pourraient être dus au phénomène de fusion naturelle.

Etrangement, chacune des deux équipes, Pons-Fleischmann et Palmer-Jones, était ignorante de l'autre. De même, aucune des deux ne savait rien de ce qui se passait en Inde ni des travaux antérieurs de Tanberg.

La saga n'était pourtant pas terminée. Lorsque Pons et Fleischmann annoncèrent les résultats de leur travaux, Sinha se souvint presque immédiatement des remarques de Chatterjee et il fit le lien entre sources chaudes, hélium et fusion. Indépendamment donc, l'équipe indienne arrivait aux mêmes conclusions que celles de Palmer et Jones.

Si l'hélium fut le point commun des recherches des trois équipes, il est amusant de noter que lors des expériences réalisées en laboratoires après la conférence de presse de mars 1989, qui utilisaient la production de chaleur et de neutrons comme preuve de fusion, jamais aucune production d'hélium n'a pu être mesurée!

Reprenons à présent plus en détail les travaux de Jones et Palmer d'abord, ceux de Pons et Fleischmann ensuite.

²Ces trois soviétiques avaient remarqué une production anormalement élevée d'³He dans certains métaux et l'expliquaient par un phénomène de fusion induite par les muons des rayons cosmiques.

B. Travaux de Jones et Palmer

L'étude de la fusion froide remonte à Charles Frank quand, en 1947, il émet l'idée que la fusion pourrait être catalysée par un muon. En 1956 Luis Alvarez observe par hasard la première fusion catalysée par muon, ce qui entraîne immédiatement de nombreux calculs théoriques. En moins d'un mois, David Jackson montre que cette fusion requiert nettement plus d'énergie qu'elle n'en donne et l'idée de fusion muonique est abandonnée. Dans les années 60, un regain d'intérêt voit le jour quand Dzhelepov montre que la fusion dépend de la température. C'est Gershtein et son étudiant Vesman qui fournissent l'explication du phénomène. La fusion est décrite comme un véritable phénomène de résonance, lorsque l'énergie dégagée lors de la capture du muon est égale à un des niveaux d'énergie de la molécule complexe formée par les deutérium, les électrons et les muons. Ponoramev, appliquant cette théorie au cas de la fusion du deutérium et du tritium, annonce en 1977, lors de la Conférence Internationale de Physique Nucléaire, que l'on pourrait espérer 100 à 1000 fusions par muon. La voie de la fusion du deutérium et du tritium paraît donc prometteuse. En 1979, la première fusion est observée à Dubna et l'intérêt pour la fusion froide se fait croissant.

En 1982 Jones, alors à Idaho au *National Engineering laboratory* réalise 8 fusions par muon, avec un dégagement d'énergie supérieur à la masse au repos du muon. En 1986, il écrit un article avec Clinton van Sיעlen dans lequel ils constatent que la fusion muonique est influencée par la pression et les matériaux utilisés. Ensemble, ils parlent de fusion piézonucléaire. Palmer, ayant eu vent des travaux de Jones, se trouve dans l'auditoire lorsque Jones présente ses résultats lors du traditionnel séminaire hebdomadaire de son département. Comme on l'a vu, Palmer s'intéressait à l'excès de production d' ^3He dans les régions volcaniques et attribuait cet excès à la fusion catalysée par la forte pression dans les couches profondes terrestres. Une collaboration entre Jones et Palmer démarre, à laquelle s'adjoignent B. Cziri, membre de la même université, et le théoricien de renom J. Rafelski qui devait quitter Cape Town pour l'Université d'Arizona.

Le 22 mai 1986, l'équipe de Jones construit sa première cellule électrochimique, bassin rempli d'eau à laquelle a été ajouté de l'acide hydrochlorique comme électrolyte. La cathode utilisée est faite de cuivre. La fusion du deutérium, présent dans l'eau, et de l'hydrogène doit libérer des rayons γ qu'ils se proposent de détecter comme signature de fusion. Cette première expérience n'est pas significative: trop peu de signal par rapport au bruit de fond. Ils refont la même expérience en ajoutant 10% d'eau lourde, augmentant ainsi la quantité de deutérium. Résultat toujours peu convainquant! Ils remplacent alors le cuivre de la cathode par du palladium dont ils connaissent la grande affinité pour l'hydrogène. Ils rejoignent ainsi la voie suivie par Pons et Fleischmann.

En augmentant la quantité de deutérium, la fusion de deux noyaux de deutérium

devient plus probable. Cette fusion donne soit du tritium et un proton soit de l'hélium-3 et un neutron avec pratiquement une égale probabilité. Le neutron semblant la particule la plus simple à détecter, ils se lancent dans la construction d'un détecteur à neutrons dont la sensibilité ne sera suffisante que vers la moitié de l'année 1988. Comme la fusion, si fusion il y a, doit produire du tritium ou de l'hélium au niveau de la cathode, plusieurs spécimens de cathode sont envoyés à San Diego pour analyse où aucune trace transcendante de ces deux éléments ne sera identifiée.

De nouvelles expériences débiteront au tout début 1989. Et cette fois, un excès de neutrons est mesuré dans le domaine d'énergie ≈ 2.5 MeV du spectre. Le 23 février 1989, Jones communique les résultats de son équipe à Pons et Fleischmann qu'il savait à présent travailler dans le même domaine et il se prépare à les présenter à la réunion de l'*American Physical Society* qui doit avoir lieu le 1^{er} mai. Il a même envoyé un abstract pour annoncer son exposé. Mais...

Le 20 septembre 1988, soit 5 mois auparavant, Jones et Rafelski avaient reçu le projet de recherches de Pons et Fleischmann.

C. Travaux de Pons et Fleischmann

Pons est un de ces scientifiques qui a eu une carrière peu traditionnelle dans le sens qu'il interrompit sa thèse pendant sept ans pour gérer les filiales de l'entreprise familiale. En 1975, lorsqu'il décide de reprendre un travail de recherche, il sait pertinemment qu'il sera difficile de réintégrer le milieu scientifique aux Etats-Unis. La réputation scientifique de Fleischmann, Professeur à l'université de Southampton, attire Pons en Angleterre. Curieusement, c'est leur commun amour pour le ski et la cuisine qui liera les deux hommes. Sa thèse achevée, Pons rentre aux USA où Fleischmann viendra le rejoindre en 1983. Fleischmann vient de prendre sa retraite forcée par les restrictions économiques du gouvernement Thatcher.

A quand remontent leurs travaux sur la fusion froide? Selon les médias, dès 1985, ils se mettent à travailler sur le sujet. Difficile à croire vu le nombre considérable d'articles qu'ils publient ensemble ou séparément entre 1985 et 1988 sur des sujets sans grand lien avec la fusion froide. Désirant garder le secret et estimant que personne ne croirait suffisamment en leurs travaux pour accepter de les financer, ils auto-financent leurs premières expériences, se préoccupant assez peu des règles de sécurité. Ils reprennent en somme les mêmes expériences que celles qui ont été réalisées par Tanberg en Suède 50 ans plus tôt, forçant la fusion dd en "chargeant" le palladium avec le deutérium par électrolyse. Pour cette électrolyse, ils utilisent un bloc de palladium de 1 cm^3 , un courant de 1.5 A et du LiOD comme électrolyte. Fleischmann est en Angleterre quand, une nuit, le fils de Pons est envoyé au laboratoire pour réduire l'intensité du courant.

A-t-il réalisé correctement l'opération? Personne ne le sait. Toujours est-il que le lendemain matin, le palladium a complètement disparu et une grande partie de la sorbonne abritant les expériences a été détruite. S'agissait-il d'une explosion nucléaire? Dans un premier interview, Fleischmann a affirmé qu'il voyait dans le phénomène un signe de fusion. Dans la suite, plus pondéré, il affirmera qu'il y voyait le signe qu'il fallait poursuivre les recherches. Ce qu'ils firent en diminuant principalement l'intensité du courant par crainte de créer une véritable bombe nucléaire. Tout leur travail repose sur le bilan puissance fournie - puissance dégagée. Avec un courant de 0.2 A, ils observent ce qu'ils appellent un excès de chaleur de 25%. Les mesures à ce stade ne sont pas suffisamment concluantes. Ils planifient donc d'autres expériences en faisant varier les différents paramètres possibles: taille et forme des bâtonnets de palladium, intensité du courant, nature du métal et de l'électrolyte. Ces expériences devraient durer trois ans car la durée de charge d'un bâtonnet dépend fortement de son diamètre. Ces expériences seront nettement plus coûteuses que les précédentes. Ils rédigent donc un projet de recherches qu'ils soumettent au Département de l'Energie(DEO) à Washington.

Jones sera choisi comme un des referees.

D. Mousquetaires ou cow-boys

En ce mois de septembre 1988, la situation paraît claire. Les deux équipes ont le même espoir de réussite. Elles sont cependant convaincues que des investigations supplémentaires s'imposent pour affermir et valider leurs résultats. Le groupe de Jones semble néanmoins plus prêt du but. L'appareillage est au point, les observables sont parfaitement définis. Quant au groupe de Fleischmann, s'ils observent effectivement un excès de chaleur, on peut déjà à ce stade faire une brève critique de leurs résultats.

- Absence de détection des neutrons, dont la présence dans un domaine bien précis du spectre est la seule preuve irréfutable de la fusion.
- Utilisation d'arrondis entraînant des erreurs dans l'interprétation des résultats.
- L'excès d'énergie annoncé est en fait un moins grand déficit. La cellule ne produit pas plus d'énergie qu'elle n'en consomme.
- Recherches gardées secrètes dans des conditions de sécurité douteuses.

Les événements vont aller en s'accéléralant. Leur interprétation est évidemment différente suivant l'équipe qui les relate. Ils s'imbriquent les uns dans les autres et il est assez difficile d'en donner une image structurée et complète en quelques lignes.

Le 23 février 1989, Fleischmann et Pons visitent le laboratoire de Palmer et Jones. C'est leur première rencontre avec l'équipe concurrente. Entretemps, l'équipe Palmers-Jones a eu le temps de faire tourner six "runs" de mesures. Un excès faible mais évident de neutrons dans le domaine d'énergie attendu est mesuré. Jones a abandonné l'anonymat en tant que referee du projet de ses rivaux et a recommandé l'acceptation de celui-ci. L'équipe Fleischmann et Pons, quant à elle, s'est procurée un détecteur à neutrons de faible sensibilité. Ils affirment mesurer trois fois plus de neutrons dans la cellule que loin de celle-ci. Ils y voient la preuve de la fusion. La critique de ces mesures sera aisée: pas de mesure de l'énergie des neutrons; pas d'estimation correcte du bruit de fond.

La dispute couve déjà: de manière indirecte, Fleischmann et Pons accusent Jones de piratage, puis se rétractent.

Ce même 23 février, Jones propose, selon lui, de prêter ses infrastructures expérimentales à l'équipe adverse. La date aurait été fixée au 27 février. Selon Fleischmann, il n'a jamais eu besoin du spectromètre à neutrons de Jones. Il enverra en fait tout son appareillage par avion à Harwell où se trouve un détecteur très performant. Jones aurait proposé de publier ensemble les résultats des deux groupes de recherches. Fleischmann aurait conseillé la prudence, enjoignant d'attendre, les uns et les autres.

Début mars, les autorités académiques des deux universités entrent réellement dans le jeu. Ils voudraient une alliance pour d'éventuels supports financiers ou un éventuel Prix Nobel. Après discussion, il semble acquis que les deux équipes soumettraient ensemble les résultats de leurs travaux en vue d'une publication simultanée dans *Nature*. Cette soumission est prévue pour le 24 mars. Aucune divulgation publique ne pourra être faite avant cette date.

Deux événements feront que l'équipe Pons-Fleischmann casse l'accord qui a été pris. D'abord, comme ils restent sans mesure précise de neutrons, ils décident de mesurer, à l'aide de cristaux NaI, le spectre des γ produits lorsque les neutrons se recombinent avec les protons dans l'eau. En l'absence de fusion, ce spectre doit contenir deux pics (^{40}K à 1.461 MeV et ^{208}Tl à 2.615 MeV). Un troisième pic, à 2.496 GeV est observé. Ils l'attribuent erronément aux neutrons produits dans la fusion. A tort car un tel pic devrait se trouver à 2.224 GeV.

Ensuite, pressé par l'éditeur Ron Fawcett du "Journal of Electroanalytical Chemistry", Pons soumet le 11 mars pour publication dans ce même journal, un article de huit pages trop rapidement écrit, truffé d'imprécisions et même d'erreurs. Ce papier sera accepté, après révision, dès le 18 mars. Un tel papier, où même le nom de l'étudiant Marvin Hawkins travaillant sur cette fusion froide a été oublié, peut-il être considéré comme une publication avant la conférence de presse? Un errata de deux pages, soit 25 % de l'article original paraîtra d'ailleurs six semaines après la parution de ce dernier!

Le 21 mars, la date précise de la conférence de presse est fixée. Ce même jour, Pons appelle Jones pour lui reconfirmer la soumission commune de leur article fixée au 24 mars. Cependant, il ne lui parle ni de la conférence de presse, ni de l'article qu'il a soumis le 11 mars. Enfin, Fleischmann apprend de Harwell qu'aucun neutron n'est observé.

Il faudrait donc tout arrêter mais l'événement n'est plus sous le contrôle des scientifiques. Fleischmann et Pons permettent de plus la parution d'un article dans le *Financial Time* qui sortira à Londres, le matin du 23 mars. Vu le décalage horaire, l'Europe sera donc la première à être informée de cette poule aux oeufs d'or, ce qui explique la présence d'une véritable armée de journalistes à la conférence de presse.

Entretemps, le 22 mars, le Département de l'Energie reçoit l'avis de la conférence de presse qui notifie que la fusion nucléaire a été réalisée dans un tube à essai avec une production nette d'énergie à l'Université de l'Utah et que ce résultat a été confirmé par un referee du projet déposé au Département. Jones est immédiatement prévenu et on peut imaginer sans grande difficulté sa réaction. Lorsqu'il apprend, ensuite, qu'un papier a déjà été soumis, il considère que l'accord a été rompu et envoie dès le soir du 23 mars son propre article à *Nature*. Le 24 mars cependant, un membre de l'équipe Pons-Fleischmann viendra au dit rendez-vous pour soumettre simultanément les résultats des deux équipes, comme initialement prévu. Quand cette équipe apprend que Jones a déjà envoyé son article, elle estime que Jones les a reniés! Elle soumettra son article le 27 mars qui d'ailleurs ne sera pas publié alors que celui de Jones paraîtra le 27 avril.

E. Futur de la fusion froide

Vu les enjeux économiques et politiques que représentait cette fusion froide, la communauté scientifique s'est évidemment penchée sur la reproductibilité des expériences de Pons et Fleischmann. Des subventions phénoménales sont dégagées. Des laboratoires des universités les plus prestigieuses (MIT, Caltech...) se tournent vers cette recherche. A Caltech, ils ne voient ni neutrons, ni rayons γ . Au MIT, les mesures des rayons γ paraissent suspectes. A la conférence de l'Americian Physical Society qui a lieu du 1^{er} au 4 mai où une session spéciale consacrée à la fusion froide est organisée, S.E. Koonin et N. Lewis démolissent les travaux des chimistes: la théorie ne permet pas la fusion nucléaire à froid et expérimentalement, personne n'a pu reproduire ni la chaleur ni le rayonnement!

Néanmoins, le débat ne sera pas clos. La faisabilité de la fusion froide reste un problème non résolu qui soulève encore de nombreux débats parmi les scientifiques. Dix années de travail ont produit quelque 2500 publications. Le domaine, initialement appelé "fusion froide", s'est étendu et est actuellement appelé "Réactions nucléaires

assistées chimiquement” ou “Réactions nucléaires de basse énergie”. La plupart des recherches dans ce domaine se font actuellement au Japon. Toyota, notamment, sponsorise le IMRA qui a deux laboratoires, l’un à Sapporo et l’autre à Nice où Pons dirige les recherches. Plusieurs universités et industries japonaises développent également les recherches en fusion froide.

Lors de la 6^{ème} Conférence Internationale sur la fusion froide, à Hokkaido en 1996, D. Morrison, qui fut physicien au CERN pendant 38 ans, rapporte les travaux extrêmement précis des 2 laboratoires de IMRA et de l’Université de Tohoku. Toutes les expériences se révèlent négatives. Seul Pons de IMRA France, décèle un fort excès de chaleur sur deux des sept expériences qu’il a menées, avec de nouvelles cellules à haute température.

On aurait donc pu croire que ces résultats peu prometteurs auraient fortement freiné les recherches mais les deux orateurs chargés de la conclusion de la conférence furent extrêmement optimistes, ignorant totalement ces travaux.

Les recherches ne ralentissent pas. D’autres résultats voient le jour. La compagnie CETI (Clean Energy Technology, Inc) qui a énormément investi dans les recherches portant sur la fusion froide est la première à commercialiser un appareil appelé “Patterson Power Cell”. Cet appareil fournirait mille fois plus d’énergie qu’il n’en consomme! Néanmoins les gens de chez CETI sont convaincus que cet appareil ne repose pas sur la fusion froide et qualifient leur innovation technologique d’un travail relié à la découverte d’une nouvelle source d’énergie hydrogène.

Il semble en tout cas que les résultats actuels sur la fusion froide ne sont pas reproductibles. Pour certains c’est le signe que l’on ne peut pas croire dans la fusion froide. D’autres y voient par contre un intérêt tout particulier. Les critiques et contre-critiques ne cessent de s’accumuler au fil des années.

V. INCESSANTE QUÊTE DE PUISSANCE

Si l’équipe Jones-Palmer s’est conformée à l’image traditionnelle de la science (logique, reproduction des résultats, contrôle des pairs, objectivité), l’équipe Pons-Fleischmann l’a fortement retouchée. Quand un scientifique a une idée que l’on peut véritablement qualifier de saugrenue, dans le sens où elle est contraire aux connaissances scientifiques traditionnelles, la première des choses à faire est certainement de la tester auprès de ses pairs. En petit comité d’abord pour mettre en évidence les éventuelles erreurs ou incohérences, pour profiter de leurs suggestions et de leurs critiques. Ensuite, les résultats doivent être soumis au processus de contrôle par des referees, avant d’être divulgués au grand public.

Mais peut-on réellement parler de fraude? Manquement aux règles d’usage dans le

monde scientifique et mauvaise foi, certainement. Désir de gloire de tout scientifique, désir de subventions de toute université, désir de puissance de tout Etat, avidités qui firent indubitablement couler beaucoup d'encre.

Bibliographie

Fusion froide

Too hot to handle, the race for cold fusion, Frank Close, WH ALLEN , 1990

The Short Life and Weird Times of Cold Fusion, Gary Taubes, Random House, New York, 1993

Cold Fusion, The scientific fiasco of the century, John R. Huizenga, Oxford University Press, 1993

Fusion muonique

<http://www.triumf.ca/muh/muh.html>

<http://www.riken.go.jp/>

<http://www.kek.jp/>

<http://riken.nd.rl.ac.uk/rikenral/>

Fusion thermonucléaire

<http://fusedweb.pppl.gov/CPEP/Chart.html>

<http://www.ofe.er.doe.gov/>

<http://www.zitadelle.juel.nw.schule.de/fusion/>

http://www.fusion-eur.org/fusion/fusion_cd/jet.htm

<http://www.itereu.de/>

http://www.fusion-eur.org/fusion/fusion_cd/

http://www.fusion-eur.org/fusion/fusion_cd/world.htm

<http://lasers.llnl.gov/education/talk.html>

<http://llnl.gov/nif/nif.htm>

R.Kodama et al, *Nature* 412 (2001) 798