

RAPPORT D'ÉTUDE  
N° 75146B

22/12/2006

**Titre : Inflammation par compression  
adiabatique**

# Inflammation par compression adiabatique (compresseurs ...)

DCE/LCMA

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

- Benoît JEANNIN, Samuel MAUGER & Claire PETITFRERE (INERIS)

## **PREAMBULE**

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	Claire PETITFRERE	Bernard PIQUETTE	Christian MICHOT
<b>Qualité</b>	Ingénieur de la DCE	Directeur adjoint DCE	Directeur DCE
<b>Visa</b>			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>2. TECHNOLOGIE DES COMPRESSEURS</b>	<b>4</b>
2.1 Généralités	4
2.2 Compresseurs d'air	5
2.3 Phénomènes liés à la compression d'hydrogene	7
<b>3. ACCIDENTOLOGIE DES COMPRESSEURS</b>	<b>7</b>
3.1 Accidentologie des compresseurs d'air	7
<b>4. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ECHANGES</b>	<b>8</b>
4.1 Synthèse du Bureau of Mines	8
4.2 Informations recueillies auprès des fabricants de compresseurs	10
4.3 Echanges avec le PTB	10
<b>5. ESTIMATIONS THEORIQUES</b>	<b>11</b>
5.1 Estimations des temperatures et des pressions	11
5.2 Estimation de la baisse de la TAI en fonction de la pression	13
<b>6. ESSAIS</b>	<b>15</b>
6.1 évaluation de la température lors de La compression adiabatique	15
6.2 Essai de détermination de l'EMI en fonction de la pression	21
<b>7. DISCUSSION</b>	<b>24</b>
7.1 Pression et caractéristiques des gaz	24
7.2 Echauffement par compression	26
7.3 Risques lors de la compression	26
<b>8. RECOMMANDATIONS POUR LA PRÉVENTION DES RIQUES LIÉS À LA COMPRESSION</b>	<b>28</b>
<b>9. CONCLUSION</b>	<b>29</b>
<b>10. BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>31</b>

## 1. INTRODUCTION

Le phénomène de compression adiabatique est recensé comme une des sources potentielles d'inflammation dans la norme EN 1127-1. Cependant, ce type d'inflammation n'a pas été réellement étudié d'un point de vue pratique et il reste à déterminer dans quelle mesure il doit être pris en compte dans des matériels tels que des compresseurs, surpresseurs ou vérins.

Dans un premier temps, une bibliographie sur le phénomène d'inflammation accidentelle par compression ainsi qu'une analyse de la base d'accidentologie ARIA ont été réalisées. Puis des essais ont été mis en œuvre afin de reproduire le phénomène de compression et estimer son influence sur le risque d'inflammation.

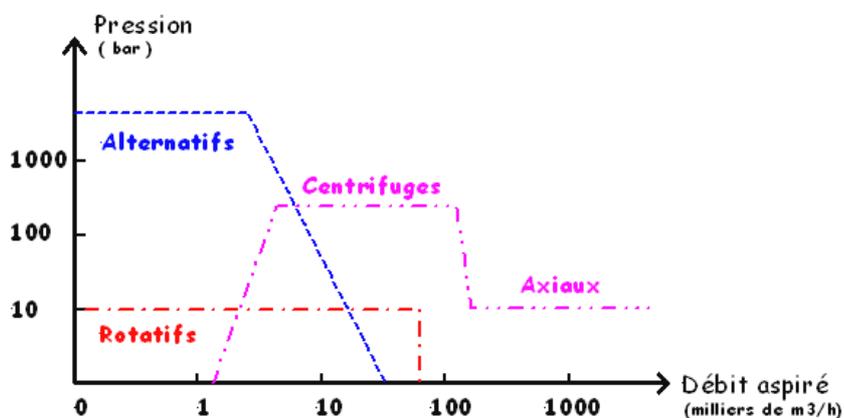
Enfin, des mesures de prévention sont préconisées pour limiter au maximum les risques d'inflammation et d'explosion au niveau des systèmes mettant en œuvre une compression en atmosphère explosible.

## 2. TECHNOLOGIE DES COMPRESSEURS

### 2.1 GÉNÉRALITÉS

Il existe plusieurs technologies de compresseurs et celles-ci sont adaptées à différentes gammes de pression.

L'étude menée concerne l'inflammation par compression adiabatique, et porte exclusivement sur les compresseurs à pistons, qui sont des compresseurs alternatifs et sont les plus rencontrés dans le domaine de la haute pression comme l'indique le graphe ci-dessous.



Source du graphe<sup>2</sup> : [www.cyber.uhp-nancy.fr](http://www.cyber.uhp-nancy.fr)

En effet pour les applications nécessitant des pressions supérieures à 300 bars, seuls les compresseurs à pistons ont un rendement suffisant, d'où l'absence d'autres technologies à ces niveaux de pression.

Les compresseurs à pistons sont entraînés généralement par des moteurs électriques ou thermiques, mais ceux-ci ne font pas partie de notre étude.

Un compresseur à plusieurs étages de compression comporte plusieurs systèmes piston/cylindre en série afin de comprimer en plusieurs étapes le gaz, ce qui permet de limiter son échauffement. Souvent, des refroidisseurs, à air ou à réfrigérant, sont insérés entre deux étages de compression afin de refroidir le gaz qui vient d'être comprimé.

Concernant le risque d'inflammation, nous avons étudié deux cas pratiques industriels :

- D'une part, le compresseur d'air, dans lequel on peut se retrouver avec une atmosphère explosible interne créée par des gouttelettes d'huile en suspension dans l'air.
- D'autre part, le compresseur de gaz (par exemple, d'hydrogène) dans lequel il peut y avoir une atmosphère explosible interne dans le cas d'une entrée d'air.

## **2.2 COMPRESSEURS D'AIR**

### **2.2.1 PHÉNOMÈNES LIES À LA COMPRESSION D'AIR**

Lors de la compression de l'air, la loi des gaz « parfaits » :  $P * V = n * R * T$ , engendre une augmentation de la température lorsque la pression d'un volume de gaz augmente.

Le problème rencontré dans les compresseurs, notamment dans les compresseurs à hautes pressions (supérieures à 90 bars) est que les températures aux différents étages de compression peuvent atteindre rapidement des températures supérieures à 150 - 200 °C. Ces températures pourraient suffire à enflammer des mélanges gazeux ou des brouillards d'huile.

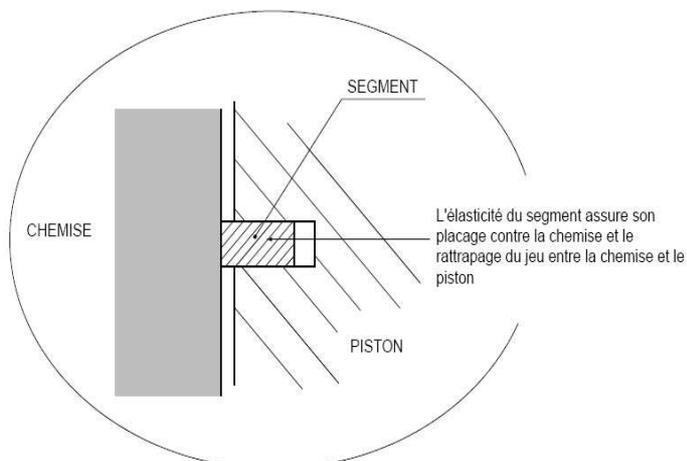
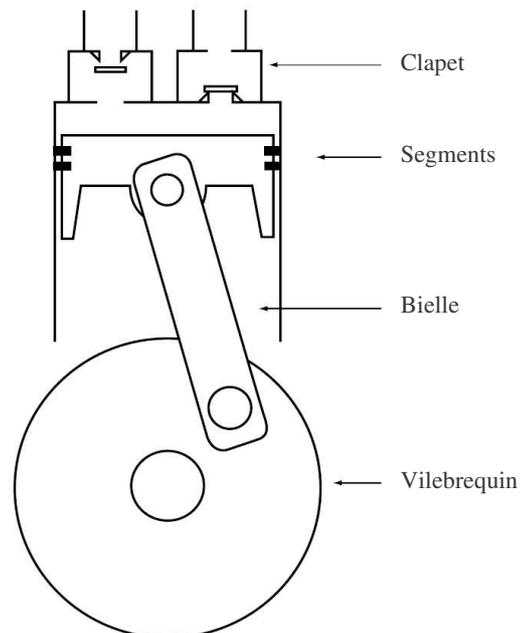
Le fait de comprimer un mélange gazeux entraîne également une modification de ses propriétés en terme d'inflammation et d'explosibilité. En effet, les températures d'auto-inflammation, les énergies minimales d'inflammation des mélanges gazeux comprimés sont influencés par la pression à laquelle ils sont comprimés. Il n'existe cependant pas actuellement de règle générale des comportements des mélanges lors de ces phénomènes mais on peut affirmer qu'il y a en général une révision à la baisse de ces températures et points éclair lorsque la pression augmente.

Il apparaît également que l'huile de lubrification du compresseur, malgré les précautions prises au niveau de la conception arrive à se propager au travers des étages de compression et donc à se retrouver dans le gaz comprimé, créant ainsi un mélange gazeux. Dans le cas particulier des compresseurs d'air, cela rend le mélange air + huile hautement inflammable.

## 2.2.2 CONCEPTION

Le risque lié à la présence d'huile dans l'air comprimé est en partie pris en compte par les concepteurs, et c'est pourquoi ils mettent généralement en place :

- Des filtres à particules solides en amont du compresseur pour empêcher l'accumulation ainsi que l'inflammation des poussières dans les étages de compression.
- Des filtres à huile en aval du compresseur pour stopper la progression de l'huile dans les canalisations.
- Des séparateurs inter-étages pour les condensats d'huile et d'eau.
- Des systèmes de purge automatique des condensats pendant le fonctionnement des compresseurs.
- Des refroidisseurs inter-étages pour limiter la température de l'air comprimé et ne pas atteindre de température trop importante.
- Des segments sur toute la circonférence des pistons afin de parfaire l'étanchéité entre le piston et la chemise lors du fonctionnement du compresseur.(voir schémas ci-dessous) En règle générale, le nombre de segments se situe entre 2 et 12.



Segments

## 2.3 PHÉNOMÈNES LIÉS À LA COMPRESSION D'HYDROGENE

La compression de l'hydrogène implique aussi (par la loi  $P * V = n * R * T$ ) un échauffement du gaz et modifie ses propriétés d'explosibilité. Nous n'avons cependant pas recensé de cas où un mélange air-hydrogène s'est enflammé à cause du seul phénomène de compression adiabatique.

En revanche, de nombreuses études sur des mélanges air + gaz indiquent que lorsque la pression augmente, la TAI (Température d'Auto Inflammation) diminue. Il en est probablement de même pour l'énergie minimale d'inflammation, ce qui favoriserait l'inflammation d'un mélange air-hydrogène dans le cas d'une introduction d'air dans le compresseur.

## 3. ACCIDENTOLOGIE DES COMPRESSEURS

### 3.1 ACCIDENTOLOGIE DES COMPRESSEURS D'AIR

Dans les accidents liés à la compression d'air que nous avons recensés, les origines données sont :

- Les inflammations du brouillard d'huile sous l'effet de la température engendrée par la compression au niveau des étages de compression
- La formation d'un dépôt d'huile de lubrification, puis son échauffement en aval du compresseur
- Les erreurs de maintenance ou dégradation des installations permettant une fuite du mélange air + huile sous pression, donc création d'un aérosol et inflammation en cas de présence d'une source d'ignition (surface chaude, flamme, étincelle,...).
- Les défaillances mécaniques à l'intérieur du compresseur entraînant un retour du mélange comprimé et donc chaud dans la chambre de compression, et dont la chaleur va à nouveau augmenter lors de la compression suivante.
- La surchauffe des compresseurs, donc la création d'une surface chaude entraînant un risque d'inflammation d'un éventuel mélange inflammable présent dans l'environnement du compresseur (environnement ATEX).
- Les ruptures de canalisations dues aux vibrations émises par les compresseurs, entraînant une fuite du mélange air + huile vers le milieu extérieur.
- L'inflammation des résidus carbonés d'huile de lubrification qui se sont déposés dans les canalisations ou au niveau des déshuileurs, vannes de surpression, puis auto-enflammés sous l'effet de la température.
- La propagation de l'incendie due à des fines pellicules d'huile présentes dans les canalisations, autour du compresseur, sur les murs, ...

### **3.1.1 ACCIDENTOLOGIE DES COMPRESSEURS D'HYDROGÈNE**

Dans les accidents liés à la compression d'air que nous avons recensés, les origines données sont :

- Fuites d'hydrogène dues à des différences de températures entre le joint et le corps du compresseur après une intervention de maintenance, à la rupture de pièces mécaniques dans les compresseurs, à des fissures et défauts d'étanchéité de canalisations.
- Pénétration d'air dans les canalisations amont du compresseur, créant une ATEX dans le compresseur, et permettant l'inflammation au niveau des étages de compression.
- Surchauffe des compresseurs, donc création d'une surface chaude qui enflamme un mélange inflammable présent dans l'environnement du compresseur (environnement ATEX).
- Inflammation spontanée d'une fuite d'hydrogène par des points chauds lors d'une striction ou rupture de canalisation.

## **4. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ECHANGES**

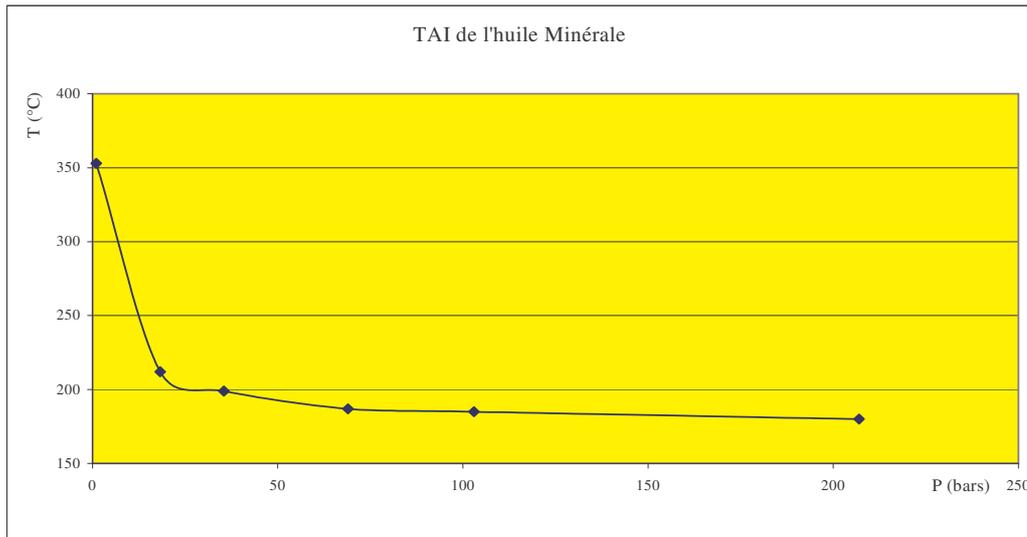
### **4.1 SYNTHÈSE DU BUREAU OF MINES**

Lors de la recherche bibliographique, nous avons identifié une synthèse particulièrement intéressante publiée par le BUREAU OF MINES [1].

Les explosions recensées par le BUREAU OF MINES (ou B.O.M) sont directement ou indirectement liées aux lubrifiants, mais uniquement dans le cas de compression d'air.

Le Bureau Of Mines [2;3] a également réalisé une série d'essais visant à évaluer l'influence de la pression sur la TAI des huiles utilisées pour la lubrification des compresseurs. Leur installation (voir annexe 1) leur a permis d'évaluer selon les mêmes critères plusieurs huiles et de déterminer les huiles dont l'utilisation pourrait être recommandée dans les compresseurs d'air.

Lors de ces essais, plusieurs types d'huiles ont été testés, dont les huiles minérales et synthétiques. Voici les résultats publiés par le B.O.M pour de l'huile minérale (la plus utilisée dans les compresseurs).



D'après les résultats du B.O.M, il est évident que la pression a une influence sur la TAI de l'huile minérale. On peut également s'apercevoir, malgré l'échantillonnage limité de cette courbe, que la TAI diminue fortement de 1 à 20 bars, passant alors de 350 °C à 210 °C, pour tendre vers la valeur de 180 °C à la pression de 200 bars.

Il est donc nécessaire de limiter la température dans les étages de compression et au refoulement du compresseur afin de ne pas atteindre la nouvelle TAI de l'huile, tout en conservant une certaine marge de sécurité.

### **Recommandations de maintenance préconisées par le B.O.M :**

La plus évidente des solutions rapportées par le B.O.M pour remédier aux accidents serait d'éliminer les lubrifiants dans les compresseurs.

Cependant, dans le cas de systèmes de compression d'air lubrifiés, et dans le but de conserver la totalité du système de compression dans le meilleur état de propreté possible, le B.O.M recommande :

- d'utiliser des filtres à huile pour emprisonner le lubrifiant présent dans le mélange comprimé.
- d'utiliser un catalyseur pour oxyder le lubrifiant présent dans le mélange comprimé.
- d'effectuer un nettoyage périodique de toute l'installation afin de prévenir l'accumulation d'huile dans les canalisations à hautes pressions, refroidisseurs inter-étages, éléments de mesures, etc.
- de nettoyer les filtres d'entrée d'air.
- d'inspecter régulièrement et de nettoyer éventuellement les valves, refroidisseurs, récipients, et canalisations, aussi souvent que nécessaire pour prévenir l'accumulation de dépôts carbonés.
- d'examiner les niveaux des fluides de refroidissement et de leurs canalisations.

- de n'utiliser que les huiles de meilleure qualité pour les systèmes de compression.
- de réviser régulièrement le système de compression et de remplacer les pièces d'usure ou usées.
- de mettre en place un enregistrement permanent des températures et pressions du système car c'est le premier indicateur d'un dysfonctionnement.

## 4.2 INFORMATIONS RECUEILLIES AUPRÈS DES FABRICANTS DE COMPRESSEURS

Afin de s'assurer que l'étude corresponde à des cas concrets pouvant être rencontrés dans l'industrie, nous avons contacté l'un des leaders mondiaux de fabrication de compresseurs. D'après cette société, les rapports par étages les plus couramment utilisés ne dépassent pas 4 à 5, que ce soit pour de la compression d'air ou d'hydrogène.

Ils nous ont également informés que sauf cas exceptionnel, la température de refoulement était limitée à 200 – 225°C, afin de ne pas détériorer les segments des pistons.

Enfin, la durée de compression au niveau d'un des étages du compresseur est limitée pour préserver les segments. En effet, la vitesse maximale de translation du piston dans sa chambre est fixée à 4 m/s. Ceci correspond à des vitesses de rotation de 1000 tr/min pour une course de piston de 125 mm ; à 750 tr/min pour une course de 160 mm ; et à 500 tr/min pour une course de 250 mm.

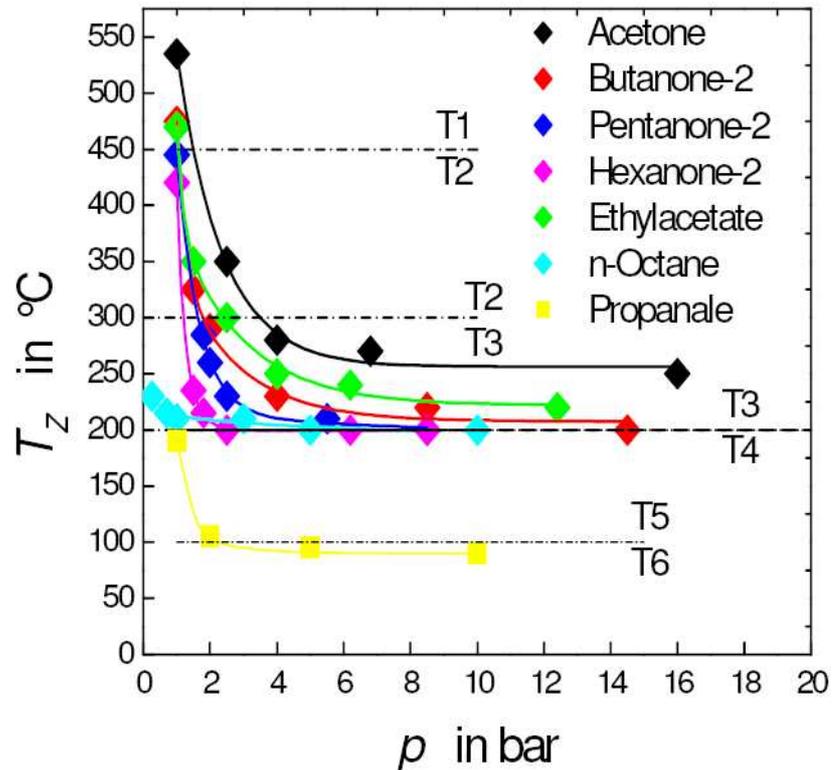
Ces éléments permettent de calculer la vitesse maximale de compression admissible pour préserver les segments, et donc de fonctionnement des compresseurs, elle correspond à une durée d'environ 31 ms pour une rotation de 1000 tr/min.

D'après ces informations, l'échauffement théorique dû à la compression adiabatique est compris entre 165 et 177°C, ce qui donne donc une température maximale atteinte de 205 à 217°C si la température ambiante est de 40°C. Enfin, il est prévu par le constructeur un système de coupure automatique des compresseurs si la température de refoulement dépasse la température de 225°C.

## 4.3 ECHANGES AVEC LE PTB

Le PTB a réalisé en 2004 [4] des essais visant à déterminer la variation de TAI de certains mélanges gazeux sous l'influence de la pression. Les résultats sont donnés sur le graphe ci-dessous. En revanche, ils n'ont jamais réalisé ces mêmes essais pour un mélange air + H<sub>2</sub> ou pour les brouillards d'huile.

Cette étude serait à envisager après l'acquisition par l'INERIS d'une sphère permettant de mesurer les TAI en faisant varier la pression.



## 5. ESTIMATIONS THEORIQUES

### 5.1 ESTIMATIONS DES TEMPERATURES ET DES PRESSIONS

Il existe des lois permettant d'estimer les températures ainsi que les pressions en fonction du rapport de compression ou dans le cas de la compression adiabatique. De nombreux auteurs, tels que MEDARD [5], BABRAUSKAS [6] ou encore LALLEMAND [7], s'appuient sur ces lois pour croiser les élévations de température liées à la compression et les autres phénomènes liés à l'inflammation des gaz, tels la température d'autoinflammation (TAI) des gaz.

Les lois des gaz parfaits nous donnent les deux relations suivantes :

$$P_1 v_1^\gamma = P_2 v_2^\gamma = P v^\gamma = Cte$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1}$$

avec :

- P1 la pression initiale
- V1 le volume initial
- P2 la pression finale
- V2 le volume final
- T1 la température initiale
- T2 la température finale
- $\gamma$  le rapport des chaleurs spécifiques (1,4 pour l'air ; environ 1,385 pour H<sub>2</sub>)

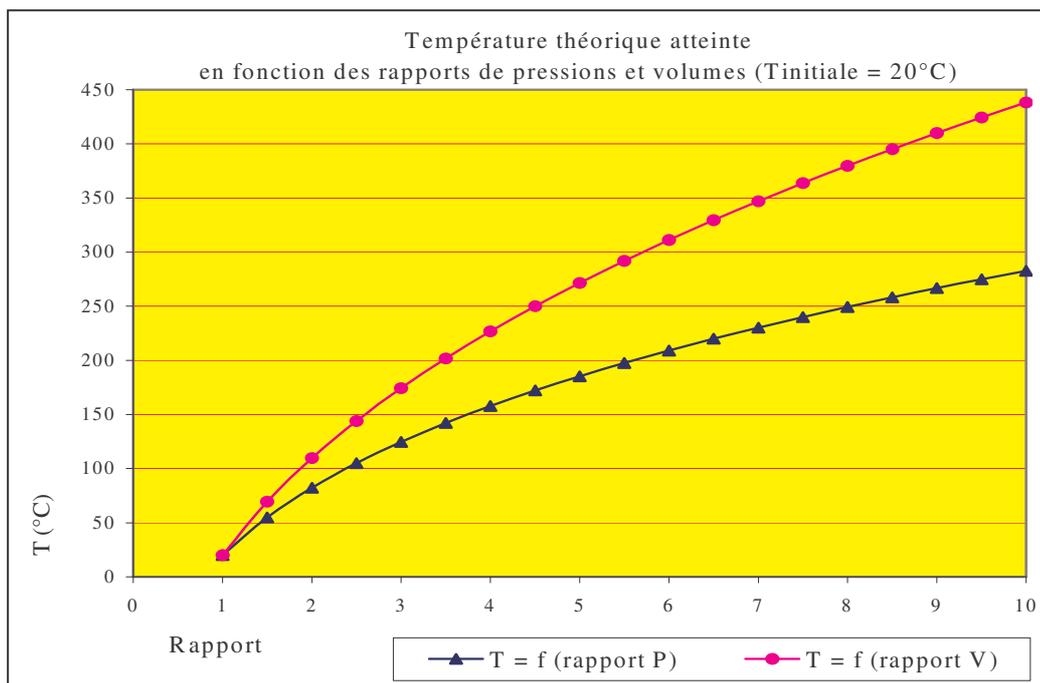
Ces relations permettent d'estimer les températures adiabatiques rencontrées au niveau des différents étages de compression en fonction, soit des pressions avant et après compression, soit des rapports de volumes mis en jeu.

Cela permet de pré-dimensionner les étages de compression afin de ne pas atteindre ou dépasser les températures d'auto-inflammation des mélanges gazeux comprimés, et ainsi éviter tout risque d'inflammation ou d'explosion.

Dans le cas d'une compression d'hydrogène ( $\gamma = 1,3852$  à  $1,416$ ), pour un rapport de pressions ( $P_2 / P_1$ ) souhaité de 7, et pour une température initiale de  $20^\circ\text{C}$ , on obtient une température de  $503^\circ\text{K}$ , soit un échauffement théorique de  $210^\circ\text{C}$  lors de la compression.

Dans le cas où le rapport entre les volumes est de 7, la température en sortie de l'étage de compression à partir d'une température initiale de  $20^\circ\text{C}$  serait de  $620^\circ\text{K}$ , soit un échauffement théorique de  $327^\circ\text{C}$  lors de la compression.

### 5.1.1 REPRÉSENTATION GRAPHIQUE



### 5.1.2 REMARQUES

Les résultats des calculs précédents mettent en évidence l'ordre de grandeur de l'augmentation de la température du gaz lors de sa compression.

On peut également remarquer que dans le deuxième exemple, on atteint une température de sortie de l'étage de compression de 347°C, alors que la TAI de l'hydrogène est de 560°C lorsque celui-ci est à pression atmosphérique.

Cependant, d'après la bibliographie, il apparaît que la TAI d'un gaz diminue lorsque sa pression augmente. En effet, une étude menée par le PTB [4, 4bis] sur l'éthanol a montré que sa TAI à pression atmosphérique est de 400°C, alors que comprimé à 10 bars, sa TAI chute à 250°C.

Ceci illustre donc la nécessité de connaître les variations de la TAI de l'hydrogène et des mélanges air + huile pour éviter tout risque d'auto-inflammation lors de leur compression.

## 5.2 ESTIMATION DE LA BAISSÉ DE LA TAI EN FONCTION DE LA PRESSION

### 5.2.1 ETAT DE L'ART

Les études précédentes, menées par SEMENOV [8] dans les années 30, permettent d'estimer l'évolution de la Température d'Auto-Inflammation d'un mélange gazeux en fonction de sa pression. Le Bureau Of Mines a déjà interprété les équations de SEMENOV pour l'étude de différents lubrifiants, dont les huiles minérales de lubrification de compresseurs. Cependant, le BOM ayant réalisé cette étude dans les années 60, les caractéristiques des huiles ont depuis évoluées et aucune autre étude n'a été menée depuis.

Concernant le second point de l'étude, l'auto-inflammation de l'hydrogène par compression, aucune étude n'a évalué la baisse de la TAI de l'hydrogène en fonction de sa pression. Les équations de SEMENOV nous ont tout de même permis d'estimer cette variation de TAI, mais cela reste purement théorique.

### 5.2.2 ESTIMATION DE LA BAISSÉ DE LA TAI DU MÉLANGE AIR + H<sub>2</sub>

D'après les études de SEMENOV, il est possible de donner une approximation de la diminution de la Température d'Auto-Inflammation d'un mélange si l'on connaît certaines de ses caractéristiques. Les caractéristiques des mélanges nécessaires sont :

- E : énergie d'activation du mélange (en kJ/mol\*K<sup>-1</sup>)
- n : Ordre de la réaction (1 pour l'hydrogène)
- R : Constante des gaz parfaits (8,314 J/mol\*K<sup>-1</sup>)
- Un point connu de TAI à une pression connue

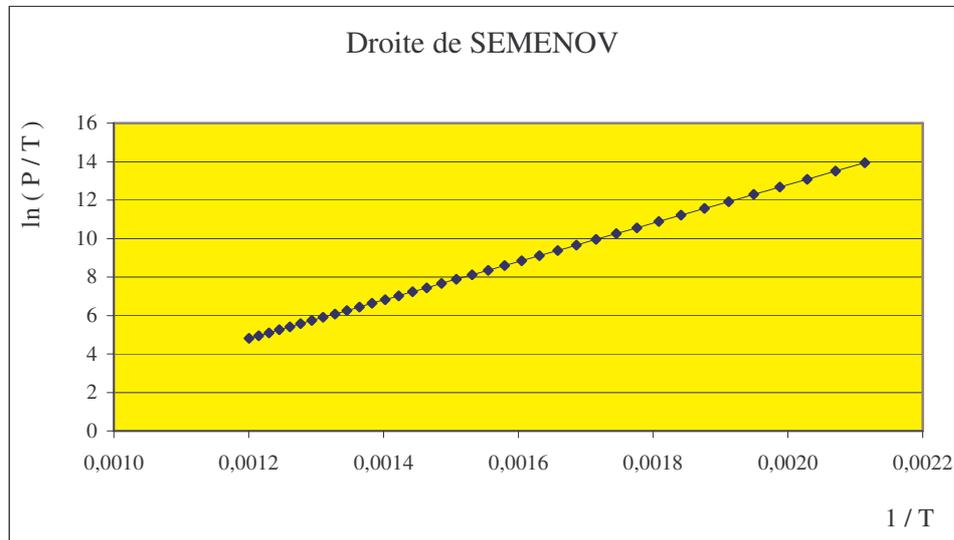
Pour notre étude, nous avons appliqué la théorie de SEMENOV au mélange stœchiométrique air + Hydrogène (29.53% d'hydrogène).

Ici, nous avons utilisé pour l'énergie d'activation, une valeur globalement admise de E = 83,140 kJ/mol\*K<sup>-1</sup>.

Concernant le point connu de TAI en fonction de la pression, nous avons pris le point de 560°C à pression atmosphérique.

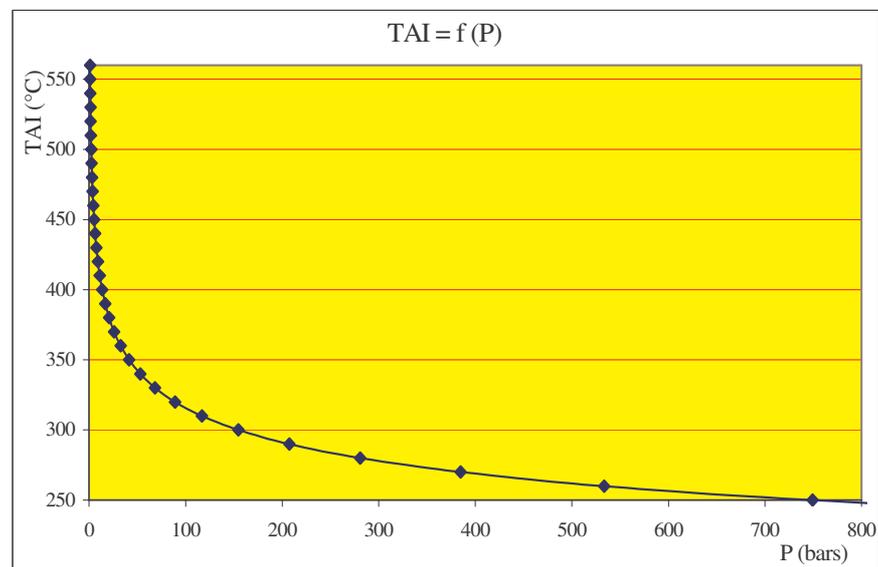
La méthode de SEMENOV consiste à représenter le logarithme népérien du rapport de la pression sur la température en fonction de l'inverse de la température sous forme d'une droite d'équation  $Y = A * X + B$ .

De l'équation, on obtient la droite suivante :



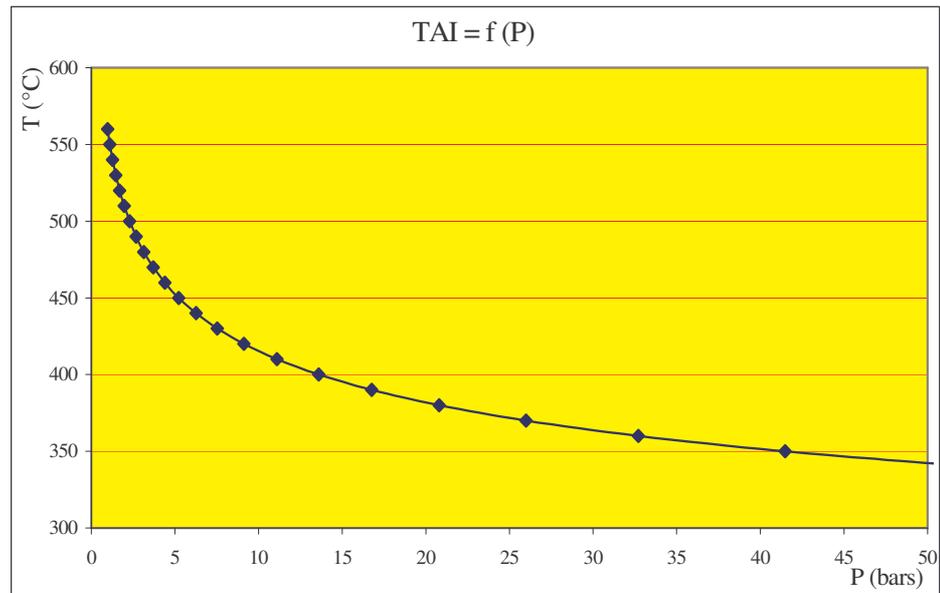
Maintenant, nous pouvons déduire des  $Y_i$  les  $P_i$  correspondantes. Pour cela, il suffit de prendre l'exponentielle de  $Y_i$  et de la multiplier par  $T_i$ .

On peut ainsi tracer la courbe de la variation de la TAI en fonction de la température, ce qui donne :



### 5.2.3 INTERPRÉTATION DES VALEURS THÉORIQUES

D'après les courbes précédentes tracées grâce à la théorie de SEMENOV, on constate une très forte diminution de la TAI dans les premiers multiples de la pression atmosphérique. En effet, l'agrandissement ci-dessous met en avant le fait qu'entre 0 et 20 bars, la TAI chute respectivement de 560°C à 380°C. Les pressions maximales actuellement utilisées sur le marché industriel, dans le cas de l'hydrogène sont d'environ 800 bars, grâce à nos calculs, nous pouvons estimer une TAI à 800 bars de l'ordre de 248°C. Des estimations plus poussées, allant jusqu'à des pressions de l'ordre de 5000 bars, montrent une valeur asymptotique de la TAI aux environs de 200°C.



## 6. ESSAIS

### 6.1 ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE LORS DE LA COMPRESSION ADIABATIQUE

Dans un premier temps, nous avons voulu connaître la température atteinte lors d'une compression « adiabatique » dans un vérin ou un surpresseur. Nous avons effectué l'essai avec de l'air. Le même essai pourra être fait avec du gaz inflammable si des températures suffisantes pour enflammer sont atteintes lors de ces premiers essais.

#### 6.1.1 PREMIER ESSAI

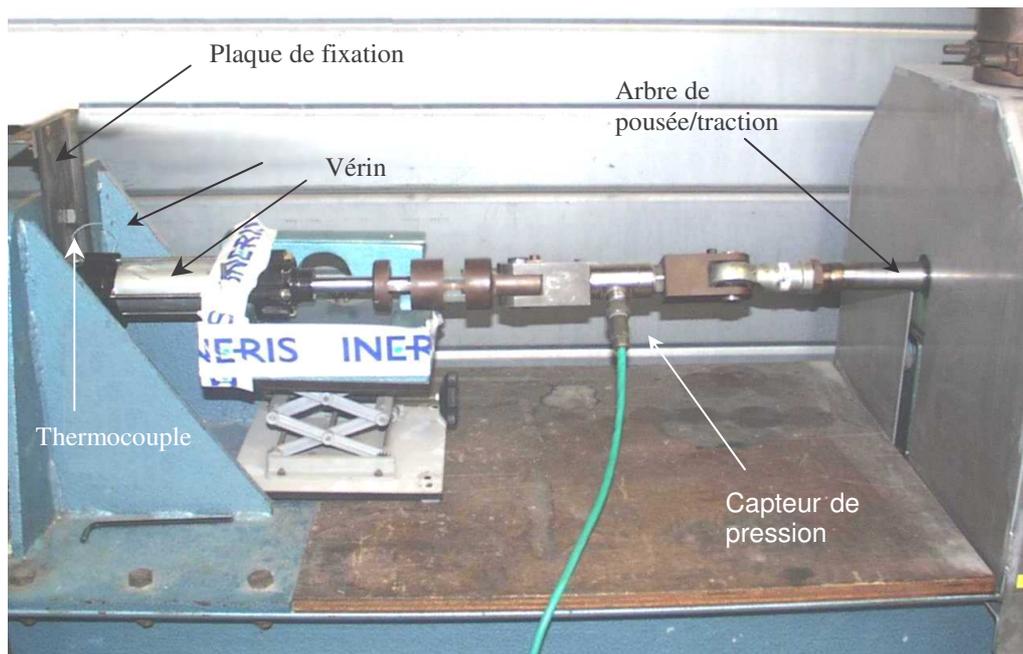
##### 6.1.1.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Lors de cet essai, nous avons comprimé un vérin à double effet d'une pression de service de 10 bars.

La sortie du vérin étant obstruée, la tige du vérin est poussée par un banc de poussée/traction pour comprimer l'air présent à l'intérieur du vérin à 10 bars.

Nous avons utilisé un thermocouple placé à l'intérieur du vérin pour mesurer la température atteinte lors de la compression. La durée de compression étant supérieure à plusieurs centaines de millisecondes, les conditions de l'adiabaticisme ne sont pas tout à fait réalisées. Les résultats obtenus ne seront donc pas applicable directement à l'adiabaticisme mais permettent d'évaluer l'ordre de grandeur de l'augmentation de température lors d'une compression lente ( $t_{\text{compression}} \approx 1\text{s}$ ). D'autre part, cela permet également d'estimer ce qui peut se passer lors de la compression d'un gaz inflammable emprisonné dans un vérin.

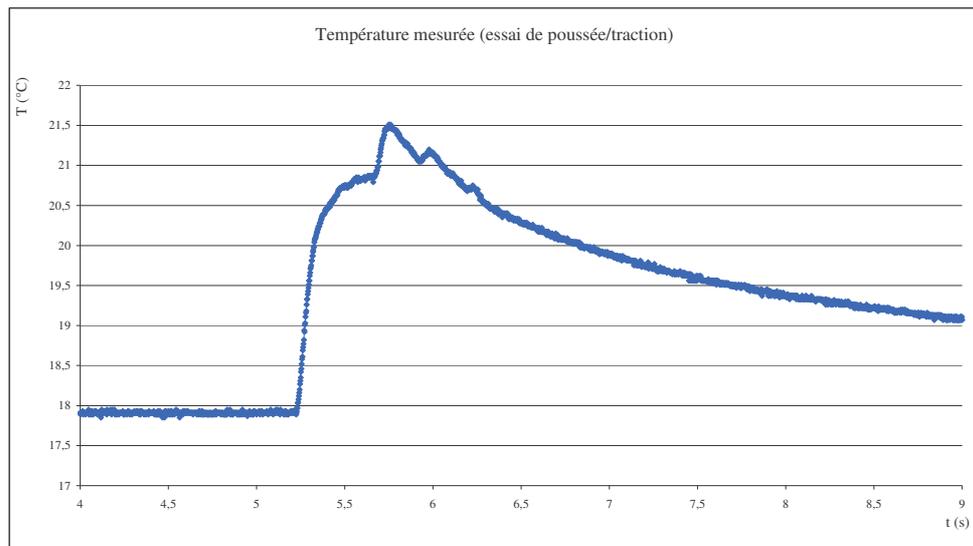
#### 6.1.1.2 SCHÉMATISATION DE L'ESSAI



#### 6.1.1.3 RÉSULTATS DE L'ESSAI

Les premiers essais réalisés ont montré une augmentation de température de  $3,6^{\circ}\text{C}$  lors de la compression par le banc de poussée/traction, ce qui est très éloigné des valeurs théoriques. La durée de compression relevée est d'environ 600 ms, ce qui n'a néanmoins pas permis d'obtenir un échauffement très élevé. En effet, les valeurs théoriques de température pour une compression de 1 à 10 bars, dans des conditions parfaites d'adiabaticisme, sont de l'ordre de  $260^{\circ}\text{C}$ . Cet essai prouve donc la nécessité de comprimer rapidement pour obtenir une élévation plus importante de la température à l'intérieur du vérin.

Remarque : Le vérin utilisé n'était pas neuf.

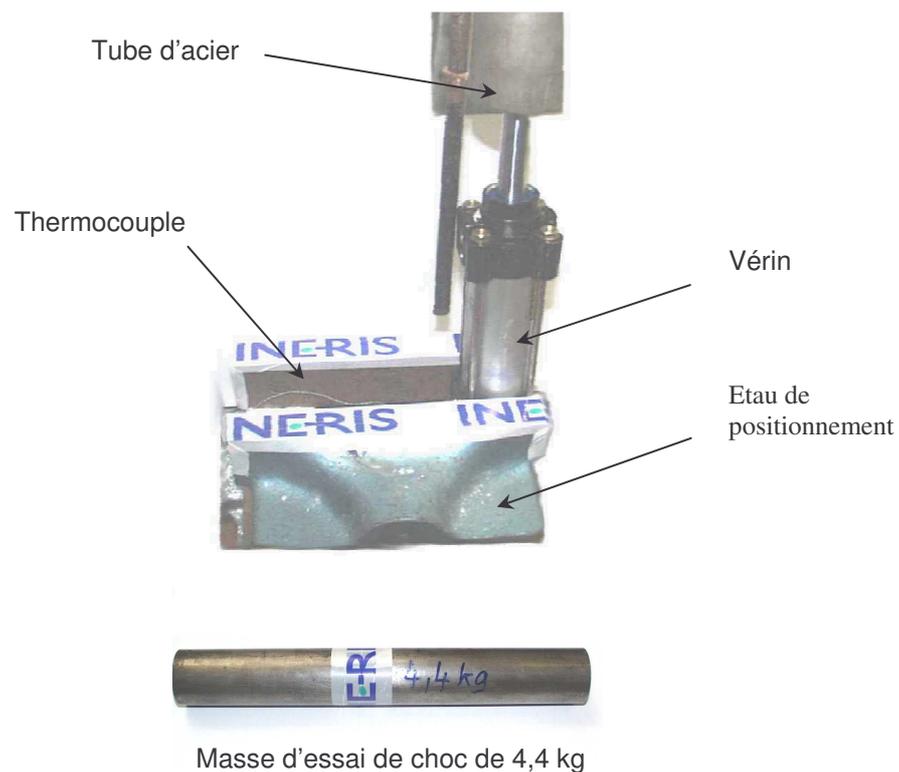


## 6.1.2 DEUXIÈME ESSAI

### 6.1.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

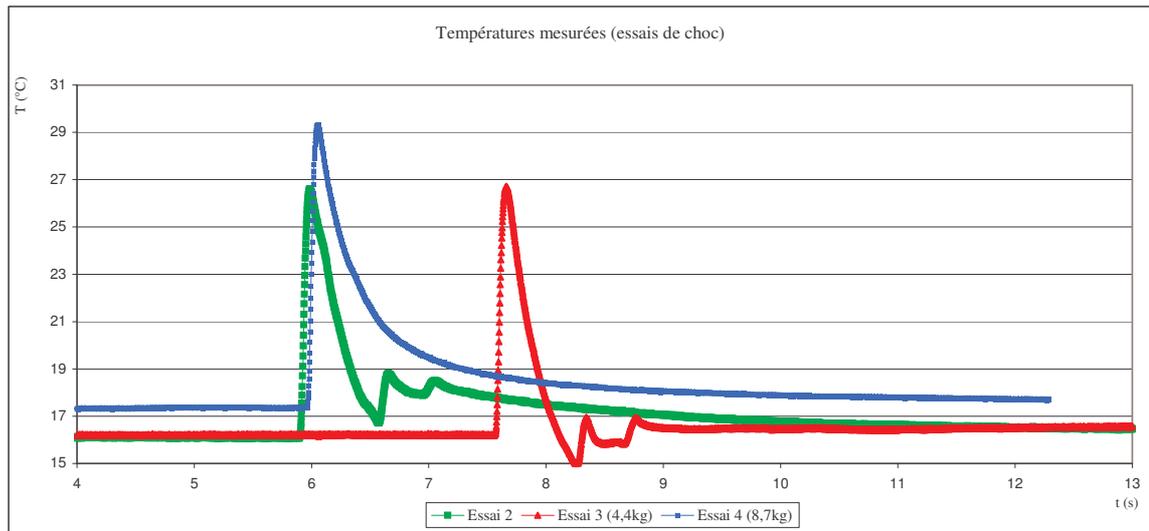
Pour cet essai, nous avons utilisé deux masses, l'une de 4,4kg, et l'autre de 8,2kg, ainsi qu'un tube d'acier d'une longueur de 2m afin de comprimer un vérin par la chute de la masse sur sa tige. En procédant ainsi, la vitesse de compression est beaucoup plus rapide qu'avec l'essai précédent et la compression est réalisée sans à-coups.

### 6.1.2.2 SCHÉMATISATION DE L'ESSAI



### 6.1.2.3 RÉSULTATS DE L'ESSAI

Cet essai a permis de mettre en évidence une légère élévation de température liée à la compression. Les deux premiers essais, réalisés avec la masse de 4,4kg, ont montré une élévation de température d'environ 11 °K lors d'une compression d'une durée moyenne de 80 ms. Le troisième et dernier essai, réalisé avec la charge de 8,2 kg a mené à la destruction du vérin, et a montré un échauffement de 12°C pour une durée de compression de 80 ms également. Pour ces essais, il est bon de préciser que le vérin n'était pas neuf.

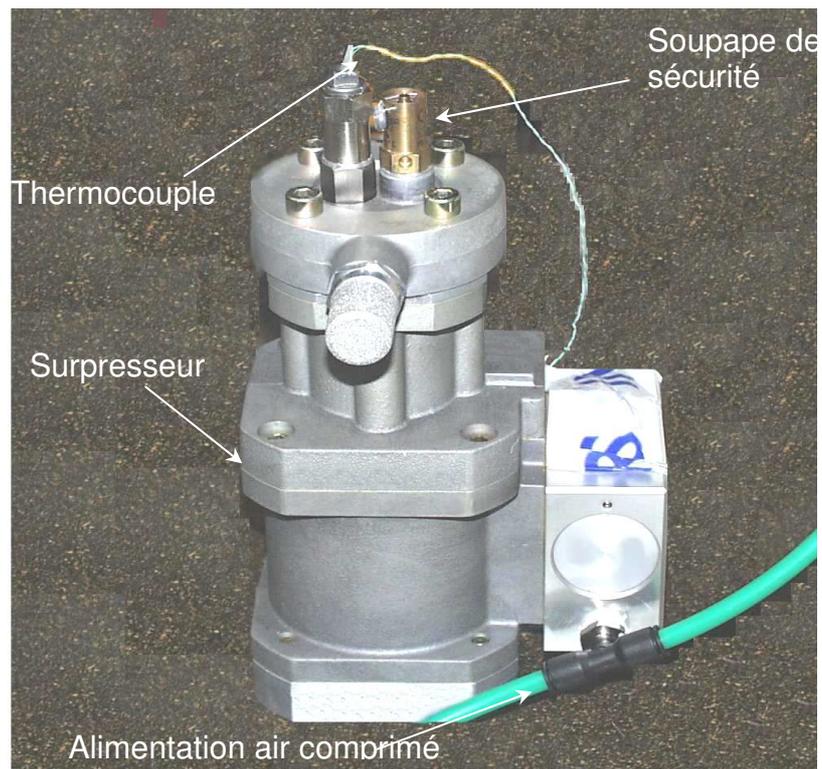


### 6.1.3 TROISIÈME ESSAI D'ÉVALUATION DE LA TEMPÉRATURE ADIABATIQUE

#### 6.1.3.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

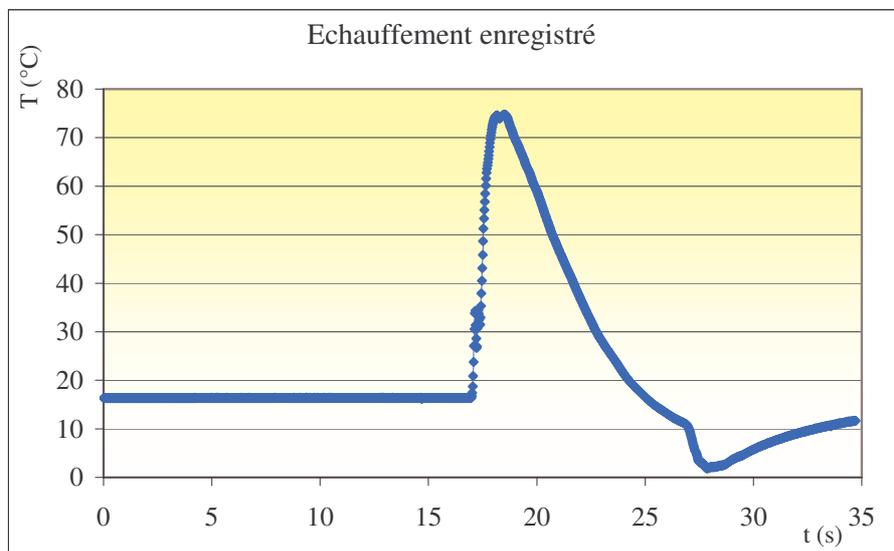
Pour cet essai, nous avons utilisé un surpresseur, permettant de comprimer rapidement de 1 à 23 bars. Ce surpresseur est composé de deux compartiments, l'un basse pression et l'autre haute pression. La partie basse pression est reliée au réseau d'air comprimé de 8 bars. Cela va créer une pression sur un piston à deux diamètres. La pression de 23 bars est obtenue dans la partie haute pression grâce au rapport des diamètres du piston.

### 6.1.3.2 SCHÉMATISATION DE L'ESSAI



### 6.1.3.3 RÉSULTATS DES ESSAIS

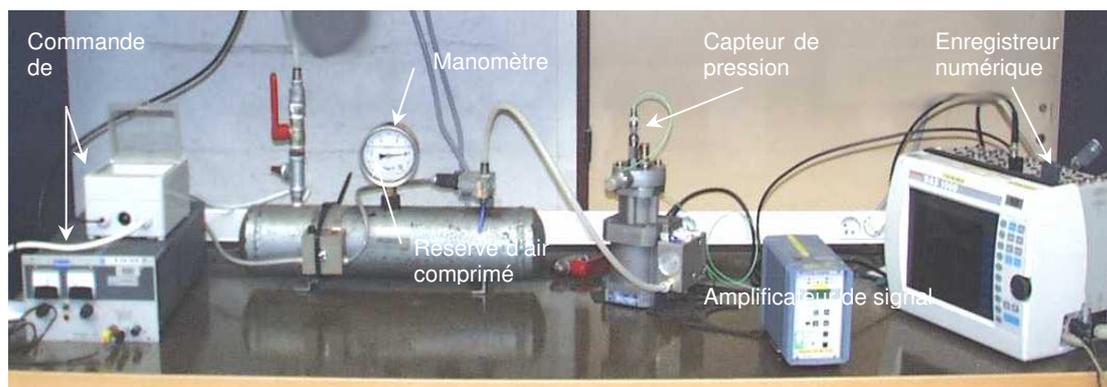
Cet essai a montré un échauffement supérieur aux essais précédents, en effet, l'augmentation de température maximale enregistrée est de  $58^{\circ}\text{K}$ , pour une durée de compression de 1,18 s, ce qui porte la température maximale à l'intérieur de la partie haute du surpresseur à  $75^{\circ}\text{C}$ . La durée de compression lors de ces essais est largement supérieure à la durée lors des essais précédents, ce qui éloigne des conditions de l'adiabaticisme. Cependant, une amélioration de la méthode d'essai pourrait diminuer le temps nécessaire à la compression. Pour cela, des électrovannes remplaceront l'opérateur manœuvrant les vannes d'air comprimé et une réserve d'air comprimé (appelé aussi ballon tampon) sera installée pour limiter le régime transitoire de montée en pression. La courbe suivante illustre l'élévation de température obtenue grâce au surpresseur.



#### 6.1.3.4 AMÉLIORATION DE L'ESSAI

Pour cet essai, nous avons utilisé le même surpresseur que précédemment, auquel nous avons couplé une réserve d'air comprimé de 3 litres et augmenté la section des tuyaux pour augmenter le débit. De plus, nous avons remplacé l'opérateur de manœuvre des vannes par des électrovannes, ainsi, le régime transitoire lié aux manœuvres des différentes vannes est fortement réduit.

#### 6.1.3.5 SCHÉMATISATION DE L'ESSAI



#### 6.1.3.6 RÉSULTATS DE L'ESSAI

L'exploitation des relevés effectués met en avant la diminution du temps de compression, qui passe de 1,18s à environ 800ms. Cependant, les courbes des températures relevées indiquent un échauffement moyen d'environ 50°K, ce qui porte la température maximale à l'intérieur du surpresseur à environ 68°C, soit 7°C de moins que pour l'essai précédent. L'échauffement relevé est inférieur à celui relevé précédemment, ceci est dû à un démontage et remontage du surpresseur pour une mesure de pression, ce qui a diminué son étanchéité.

### 6.1.4 CONCLUSION

Les essais de mesure de température lors de la compression « adiabatique » ont montré que nous pouvions atteindre une élévation de température d'environ 50°K dans le surpresseur. Pour le vérin, nous avons obtenu 12°K au maximum. Ces essais ont montré qu'il était difficile dans les conditions d'utilisations de ces

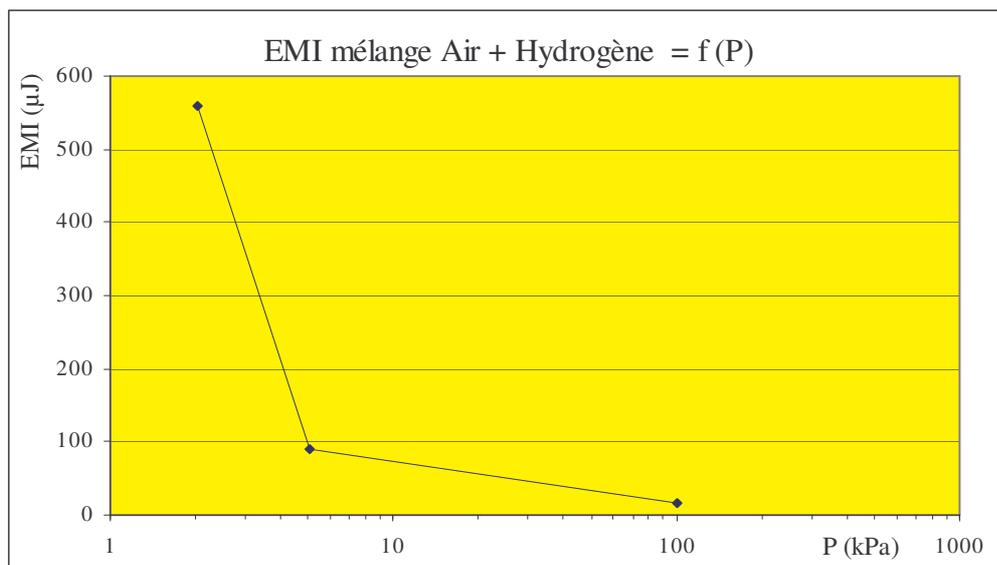
matériels d'être dans une configuration adiabatique. Cependant, les essais sont représentatifs d'une utilisation dans des conditions très défavorables (sorties complètement bouchées de ces matériels) et il semble donc raisonnable de ne pas considérer l'inflammation par compression adiabatique comme un risque pertinent dans ces types de petits matériels.

Cependant, nous avons poursuivi l'étude pour déterminer l'influence de la pression engendrée sur les caractéristiques des gaz inflammables sur les caractéristiques de ces derniers. En ce qui concerne l'hydrogène, le paramètre le plus critique est l'énergie minimale d'inflammation (EMI) et nous avons donc essayé de déterminer la variation de cette EMI en fonction de la pression.

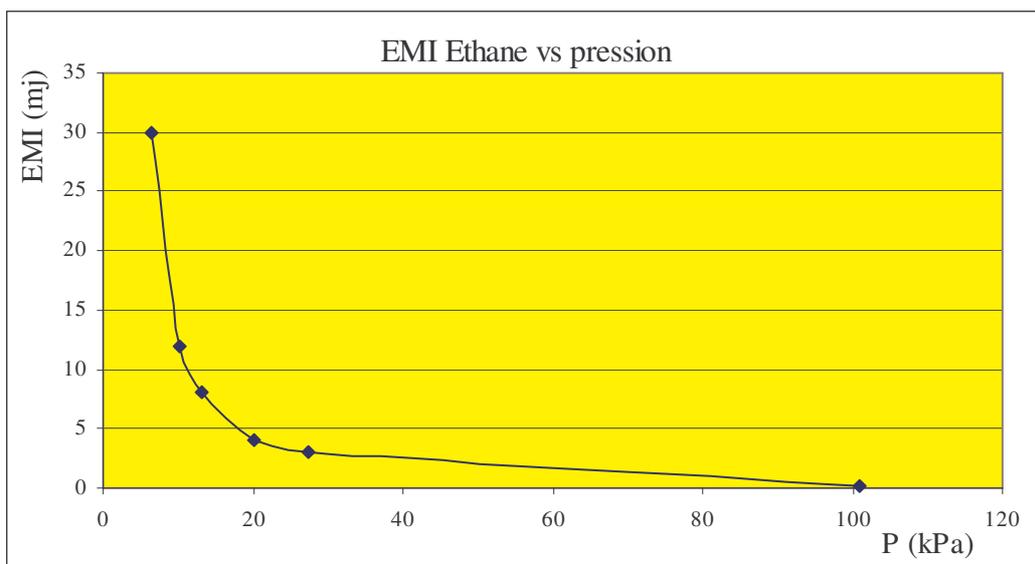
## 6.2 ESSAI DE DÉTERMINATION DE L'EMI EN FONCTION DE LA PRESSION

### 6.2.1 DESCRIPTION DE L'ESSAI

Cet essai consiste à déterminer l'énergie minimale nécessaire à enflammer le mélange d'air + H<sub>2</sub> le plus inflammable (21% H<sub>2</sub>) à différentes pressions et ainsi caractériser l'influence de la pression sur l'EMI de ce mélange. Par le passé, des essais similaires ont déjà été réalisés par la NASA [9] et V.BABRAUSKAS [6], mais pour des pressions inférieures à la pression atmosphérique. Leurs résultats, indiquent une tendance à la diminution de l'EMI lorsque la pression croît.

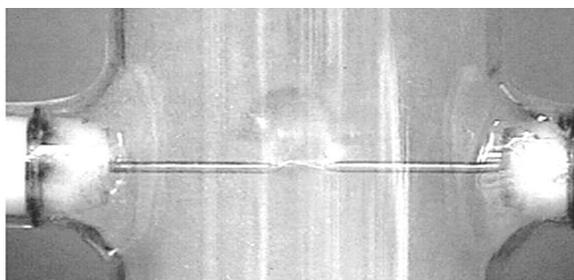


Courbe représentée à partir des données de la NASA [9]



Courbe représentée à partir des données de V.BABRAUSKAS [6]

L'essai de caractérisation de l'EMI est régi par la norme NF EN 13821 [10], dans laquelle il est recommandé d'utiliser un tube d'essai de type HARTMANN pour les caractérisations à pression atmosphérique des gaz et des poussières.

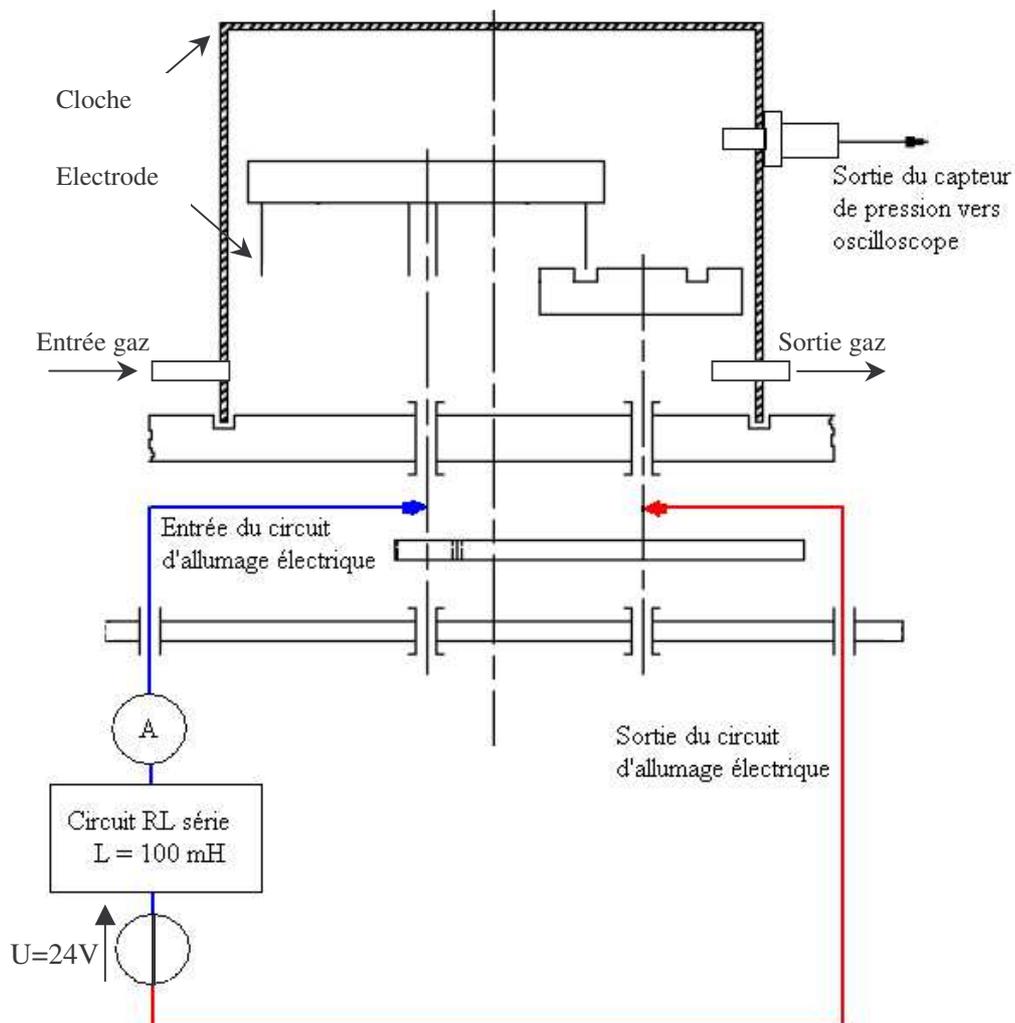


Étincelle produite pour une mesure d'EMI dans un tube type HARTMANN

Toutefois, les conditions d'essai étant différentes de celles décrites dans la norme NF EN 13821, le tube HARTMANN ne peut être utilisé car sa conception impose un fonctionnement à pression atmosphérique. Nous avons donc choisi de conduire les essais dans un éclateur. Cet éclateur va établir, puis interrompre la circulation d'un courant au travers d'un circuit RL série. L'interruption du passage du courant va produire une étincelle d'une énergie quantifiable grâce à la présence d'une inductance et à la connaissance de la loi de l'énergie lui étant relative. En effet, connaissant à tout instant la valeur du courant, il est possible d'en déduire l'énergie :  $W = \frac{1}{2} L \Delta I^2$ , car la totalité de l'énergie emmagasinée par l'inductance n'est pas restituée lors de l'étincelle. D'autre part, un capteur de pression mesurera la pression d'explosion du mélange étudié.

## 6.2.2 SCHÉMATISATION DE L'ESSAI

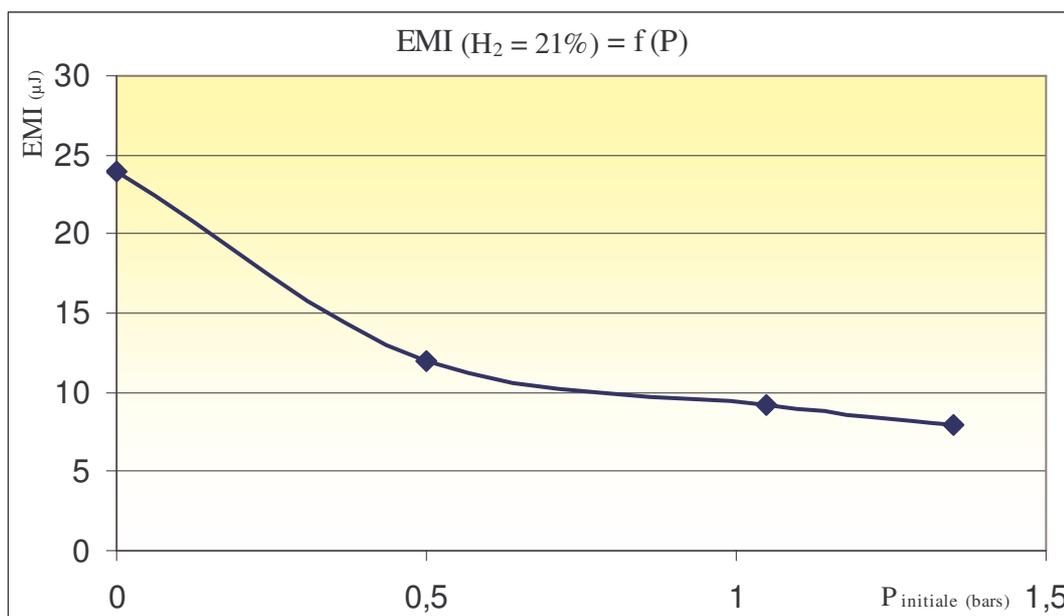
Le schéma suivant est composé dans sa partie supérieure de la représentation simplifiée de l'éclateur utilisé, et dans sa partie basse du circuit d'alimentation électrique des électrodes. L'éclateur se compose de quatre électrodes, de deux disques entraînés par un moteur à courant alternatif, et d'une cloche de plexiglass dans laquelle est crée le mélange à étudier. Les étincelles sont créées lors du frottement des électrodes de tungstène sur un disque de cadmium, ce sont ces étincelles qui libèrent l'énergie d'inflammation.



## 6.2.3 RÉSULTATS DE L'ESSAI

L'éclateur a permis de quantifier la diminution de l'EMI lorsque la pression est supérieure à la pression atmosphérique. Notons que la valeur du courant nécessaire à l'inflammation chute de 28% lorsque la pression passe de 0 à 0,5 bar, ce qui correspond à une diminution de 50% de l'énergie minimale

d'inflammation. Les essais à des pressions supérieures à 0,5 bar ont mis en avant une diminution plus lente de l'EMI, comme l'indique la courbe suivante.



#### 6.2.4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'essai réalisé a permis de démontrer l'importance de l'influence de la pression sur l'Energie Minimale d'Inflammation du mélange air + H<sub>2</sub> à sa concentration la plus inflammable (21% H<sub>2</sub>). En effet, l'EMI, mesurée à 25 µJ à pression atmosphérique, chute à 7,9 µJ à 1,35 bar. Soit une diminution de 68% pour une surpression d'environ 1,4 bar.

Toutefois, le matériel d'essai utilisé a permis d'évaluer l'EMI jusqu'à des valeurs faibles (environ 8 µJ), valeurs minimales d'énergies pouvant être utilisées avec ce matériel. Il n'est donc pas possible de poursuivre l'expérimentation à des pressions supérieures à 1,4 bar car l'énergie devient trop faible pour le bon fonctionnement du matériel.

Remarque : Les étincelles produites par l'éclateur sont à peine visible dans l'obscurité pour des valeurs d'énergie avoisinant 25 µJ, et deviennent imperceptibles à l'œil nu lorsque leur énergie est inférieure à 15 µJ.

## 7. DISCUSSION

### 7.1 PRESSION ET CARACTÉRISTIQUES DES GAZ

#### 7.1.1 INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA TAI

D'après les informations collectées lors de la recherche bibliographique, nous avons constaté que l'ensemble des gaz voient leur TAI diminuer lorsque la pression augmente. Des études indépendantes ont été menées, notamment par le

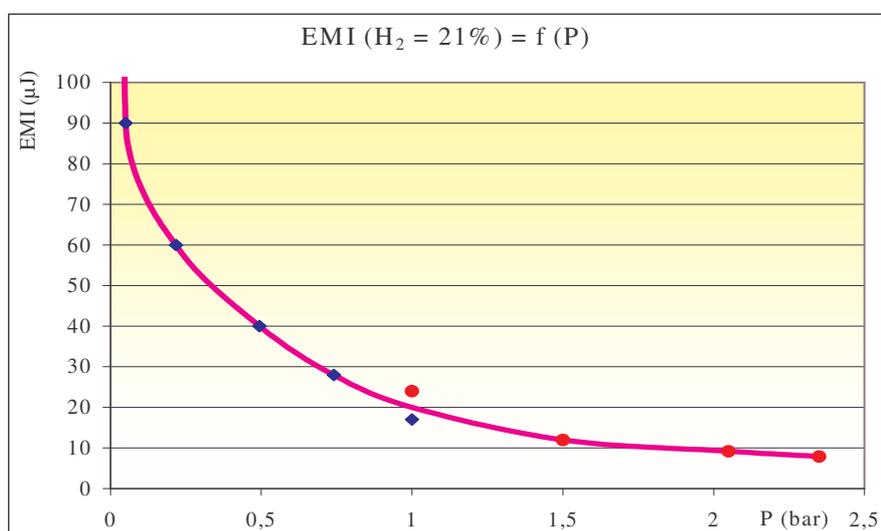
PTB et le Bureau Of Mines, pour caractériser l'évolution de la TAI de certains gaz ou mélanges inflammables.

En l'absence d'expérimentations visant à caractériser la diminution de la TAI de l'hydrogène, il est possible d'appliquer la loi de SEMENOV pour avoir une tendance de cette diminution. En effet, les courbes existantes indiquent une évolution de la TAI de la même forme que celle obtenue par calcul pour l'hydrogène à partir des équations de SEMENOV.

La baisse très significative constatée de la TAI, quel que soit le mélange concerné, suggère des études plus approfondies pour les gaz ou mélanges utilisés dans des environnements pressurisés. En effet, pour les mélanges dont nous possédons les évolutions, une diminution de moitié de la TAI est certaine si l'on tend vers des pressions élevées (>100 bars), et une forte diminution dans les premiers multiples de la pression atmosphérique est constatée.

### 7.1.2 INFLUENCE DE LA PRESSION SUR L'EMI

D'après les expérimentations et les données recueillies lors des recherches bibliographiques, nous pouvons considérer que l'énergie minimale d'inflammation d'un gaz ou mélange gazeux diminue lorsque la pression augmente. Les données fournies par BABRAUSKAS [6] pour l'éthane et la NASA [9] pour le mélange air/H<sub>2</sub> (21%) illustrent cette diminution. Les résultats des expérimentations réalisées à l'INERIS ont confirmé ce phénomène et ont permis de mettre des chiffres sur les EMI pour des pressions avoisinant la pression atmosphérique. La combinaison des résultats des expériences réalisées à l'INERIS et de celles réalisées par la NASA concernant l'hydrogène permet d'obtenir la courbe de variation d'EMI suivante :



Le seul point divergeant entre les données de la NASA (en bleu) et les résultats des essais réalisés à l'INERIS (en rouge) est le point à pression atmosphérique, 17 µJ pour la NASA contre 25 µJ. C'est pourquoi ce point a été moyenné à 20 µJ afin de préserver la tendance de la courbe imposée par les autres points.

Cette courbe permet de mieux apprécier la valeur de l'EMI en fonction de la pression à laquelle se trouve l'hydrogène. La prolongation de cette courbe à partir des points disponibles permet d'arriver par approximation à une asymptote horizontale qui tend vers 5 µJ à partir de 4 bars.

## 7.2 ECHAUFFEMENT PAR COMPRESSION

### 7.2.1 CROISEMENT DES DONNÉES

Nos essais de caractérisation de la température adiabatique n'ont pas permis de vérifier les résultats théoriques calculés précédemment. Cependant, ils ont mis en avant l'échauffement non négligeable (environ 60°C) lors d'une compression relativement lente (800 ms).

Par le passé, TAYLOR [11], puis COMBE et al pour l'Institut Français du Pétrole (IFP) [12], et enfin I. GLASSMAN [13], ont vérifié les températures atteintes lors de compressions adiabatiques, en prenant de l'air à température initiale de 0°C. Pour ces essais, ils utilisèrent des machines dites à compression rapide (Cf : Annexe 3), permettant de comprimer un volume entre 1 et 5 ms. Voici les résultats, publiés par GLASSMAN pour de l'air et que nous comparons avec nos calculs théoriques :

Rapport de compression	Température atteinte (°C)	Température théorique (°C)
2	57	58
5	153	154
10	242	254
50	521	537

La théorie est donc très proche de la pratique, surtout pour les rapports faibles, on constate cependant que l'erreur grandit lorsque les rapports de pressions augmentent.

### 7.2.2 PERTINENCE DES DONNÉES

D'après ces résultats, il apparaît évident que le phénomène de l'échauffement par compression adiabatique est réel et que les formules permettant de l'estimer sont correctes. Cependant, les valeurs ci-dessus ont été obtenues au moyen de machines à compression rapide, elles-mêmes beaucoup plus rapide que les compresseurs industriels. En effet, le retour d'expérience des fabricants de compresseurs nous a permis de fixer la durée minimale de compression à environ 31 ms, soit une compression plus de 30 fois plus lente qu'avec les machines à compression rapide.

Il est vraisemblable que les températures atteintes dans les compresseurs industriels ne soient pas seulement dues à l'échauffement lors de la compression, mais aussi en grande partie aux échauffements mécaniques.

## 7.3 RISQUES LORS DE LA COMPRESSION

### 7.3.1 RISQUES LORS D'UNE COMPRESSION D'AIR

Le risque lié à la compression d'air est la création, puis l'inflammation par la température d'un brouillard d'huile. La température minimale d'inflammation d'un

brouillard d'huile minérale est d'environ 170°C. D'après les informations recueillies auprès des constructeurs de compresseurs, la température au refoulement et donc à l'intérieur du système de compression peut facilement atteindre 200°C, et serait donc susceptible d'enflammer le brouillard d'huile.

Il est donc nécessaire de limiter les températures au refoulement des compresseurs en fonction de la pression à laquelle ils fonctionnent afin d'empêcher toute inflammation. La limitation peut être réalisée par classes de pression, permettant ainsi de ne pas imposer une température en incohérence avec la TAI du brouillard d'huile à la pression considérée.

Classe de pression (bars)	Classe de pression (psi)	TAI brouillard. d'huile correspondante	Exemple de T° limite au refoulement
0 – 1.5	0 – 21.7 psi	320°C	260°C
1.5 – 5	21.7 – 72.5 psi	250°C	200°C
5 – 15	72.5 – 217.5 psi	220°C	180°C
15 – 40	217.5 – 580 psi	200°C	160°C
40 – 280	580 – 4061 psi	180°C	140°C
> 280	> 4061 psi	170°C	130°C

Remarque : Le tableau précédent indique une température tolérable maximale de 130°C pour des pressions supérieures à 280 bars. Parmi les résultats de la recherche bibliographique, on retrouve un Allemand (Thoenes [14]), qui par retour d'expérience a introduit en Allemagne une limitation de la température maximale au refoulement des compresseurs d'air à 160°C. Par la suite, les autorités allemandes ont constaté de nombreux accidents, et ce même en limitant la température au refoulement à 160°C. Ils décidèrent alors en 1963 d'abaisser cette température à 140°C pour les compresseurs haute pression, température qui est très proche de notre proposition pour une pression élevée (130°C).

### 7.3.2 RISQUES LORS D'UNE COMPRESSION D'HYDROGÈNE

Seul, l'hydrogène ne représente aucun danger car il ne peut pas être enflammé. Cependant, si un mélange d'air et d'hydrogène est formé, il devient extrêmement inflammable.

Le risque lié à la compression d'hydrogène pur est donc nul, quelles que soient les températures atteintes à l'intérieur du compresseur. Mais, si un mélange air + hydrogène apparaît dans le compresseur, il est alors nécessaire d'avoir pris des mesures pour éviter l'inflammation du mélange. En effet, si le mélange se situe dans les limites d'explosivité, l'inflammation peut alors être provoquée par une température excessive, une étincelle, une flamme...

Dans le cas d'un mélange stœchiométrique air/H<sub>2</sub> (29.53% H<sub>2</sub>), la variation de TAI théorique varie en fonction de la pression selon la courbe de notre étude. La température minimale d'inflammation du mélange stœchiométrique air/H<sub>2</sub> serait

alors d'environ 250 °C pour les plus hautes pressions actuellement rencontrées dans l'industrie (800 bars).

D'après les informations recueillies chez les constructeurs, la température au refoulement et donc à l'intérieur du système de compression peut facilement atteindre 200 °C. De plus, et d'après nos essais, il semble difficile d'atteindre un échauffement de 250 °C par le seul phénomène de compression adiabatique car la durée du cycle des pistons dans les compresseurs est trop longue. Cependant, une limitation de la température au refoulement à 220 °C, pour les compresseurs fonctionnant avec des pressions comprises entre 400 et 800 bars permettrait de conserver une marge de sécurité suffisante. Concernant les compresseurs fonctionnant avec des pressions moins élevées, la limite en température peut être fixée à 240 – 250 °C.

Il faut toutefois noter que si la température dans le compresseur peut difficilement enflammer le mélange, une étincelle le pourrait. En effet, l'EMI du mélange air/H<sub>2</sub> est très faible à pression atmosphérique, et l'est encore plus lorsque la pression augmente. Nos essais montrent que l'EMI du mélange air/H<sub>2</sub> est de 17 µJ (valeur normalisée) à pression atmosphérique, et chute à 8 µJ à 1,4 bars. Cette diminution d'EMI est à prendre en compte car les mesures de protection efficaces à pression atmosphérique ne le sont pas forcément lorsque la pression croît. Il est donc important de soigner les liaisons piston+segments/chemise afin d'assurer que les frottements ne produisent pas d'étincelles d'énergie suffisante pour enflammer un éventuel mélange inflammable. De même, il faut s'assurer que l'installation en aval du compresseur est bien reliée à la terre afin de ne pas se charger en électricité statique, ce qui pourrait enflammer le mélange inflammable précédemment comprimé si une décharge électrostatique intervenait.

## **8. RECOMMANDATIONS POUR LA PRÉVENTION DES RQUES LIÉS À LA COMPRESSION**

Nous avons vu que pour des matériels de type vérin ou petits surpresseurs, le risque lié à l'inflammation par compression adiabatique n'a pas été mis en évidence, d'une part parce qu'il est très difficile de reproduire des conditions réellement adiabatique et d'autre part parce que l'échauffement généré atteint difficilement les températures d'autoinflammation.

Pour des compresseurs industriels, il faut prendre en compte le fait que les caractéristiques (TAI et EMI) des mélanges inflammables diminuent assez vite avec l'augmentation de la pression. Il faut ainsi limiter les risques liés aux étincelles et aux échauffements en conséquence, même si ce ne sont pas des risques uniquement liés à la compression adiabatique.

D'autre part, les mesures préventives suivantes visent à contrôler la création d'une atmosphère explosible dans le compresseur ou les facteurs favorisant l'inflammation :

- Nécessité d'effectuer un classement en zones à risques des installations de compression ;
- Isoler les systèmes de compression du reste de l'entreprise et limiter le personnel y ayant accès ;

- Veiller à la bonne ventilation du bâtiment abritant les compresseurs de gaz inflammable. Mettre en place des dispositifs de détection d'incendie, fumées et fuite de gaz ;
- Eliminer toute source potentielle d'inflammation à l'intérieur du compresseur étincelles, chocs entre deux pièces métalliques, surfaces chaudes, électricité statique, équipement électrique, en tenant compte de la baisse des température d'autoinflammation et d'énergie minimale d'inflammation des mélanges en fonction de la pression ;
- Relier à la terre les canalisations et réservoirs pour empêcher l'accumulation d'électricité statique ;
- Dans le cas de système de compression de gaz inflammable, maintenir en permanence une pression supérieure à la pression atmosphérique dans les canalisations, et ce même lorsque le compresseur est à l'arrêt (sauf maintenance) pour éviter les infiltrations d'air et la création d'une ATEX. Purger les installations avec un gaz inerte avant et après chaque intervention ;
- Dans le cas de compression d'air, utiliser de préférence des systèmes de compression dits « secs », c'est à dire sans huile de lubrification ;
- Dans le cas de compresseurs lubrifiés, privilégier les huiles haut de gamme à température d'inflammation élevée (Cf : Annexe 2), et utiliser des systèmes de filtration de l'huile adaptés en sortie de compresseur. Ex : Filtres, décanteurs, vannes de purge, ... Limiter au maximum les régimes transitoires des compresseurs de manière à éviter le passage de l'huile vers les étages de compression. En effet, à froid, le jeu entre piston et chemise est plus important qu'à chaud car il doit permettre une fois le système chaud et dilaté, un jeu fonctionnel pour la translation du piston.
- Réaliser un système de surveillance des températures, des vibrations, du courant absorbé, et des débits du système afin de détecter au plus vite une anomalie dans le système.
- Inspecter régulièrement et nettoyer minutieusement au moins une fois l'an l'ensemble de l'installation de compression, de transport, et de stockage du/des gaz (filtre, valves, niveaux d'huile et réfrigérant, canalisations, compresseur, clapets, segments, joints, pistons, serrage des vis,...).
- Faire remplacer ou réparer les pièces usagées dès les premiers signes de fatigue et en respectant les préconisations constructeur.

## **9. CONCLUSION**

Dans l'accidentologie, nous avons retrouvé plusieurs cas d'explosions dans des installations de compression, majoritairement soit dans des installations de compression d'hydrogène, soit dans des installations de compressions d'air, l'inflammation étant alors causée par un brouillard d'huile interne.

Nous nous sommes intéressés dans cette étude au phénomène d'inflammation à l'intérieur des compresseurs, notamment à une source d'inflammation peu étudiée qu'est l'inflammation par compression adiabatique.

Lors des essais menés, nous avons tout d'abord pu éliminer cette source d'inflammation dans les petits matériels, de type vérin, dans lesquels les conditions de compression adiabatique semblent peu atteignables même en cas de dysfonctionnement et pour lesquels l'élévation de température constatée lors de la compression est trop faible pour atteindre la température d'autoinflammation des mélanges.

En revanche, même si nous n'avons pas pu réaliser d'essais sur de gros compresseurs, nous avons pu comparé les températures théoriques qui pourraient être atteintes lors d'une compression adiabatique avec la température d'autoinflammation du mélange, cette température d'autoinflammation diminuant avec l'élévation de pression. Cette comparaison nous a permis de conseiller des températures d'échauffement limites au niveau des étages de compression, afin de ne pas atteindre ces températures d'autoinflammation.

D'autre part, nous attirons l'attention sur le fait que l'énergie minimale d'inflammation diminue rapidement avec l'augmentation de la pression, ce qui est une caractéristique critique notamment pour l'hydrogène, dont l'énergie minimale d'inflammation est déjà très faible à pression atmosphérique. Cela induit une attention particulière vis à vis du risque d'étincelle électrique et électrostatique.

Enfin, nous avons également rappelé quelques recommandations pratiques, tant pour éviter la formation d'atmosphères explosibles que pour éviter leur inflammation au niveau des installations de compression.

## 10. BIBLIOGRAPHIE

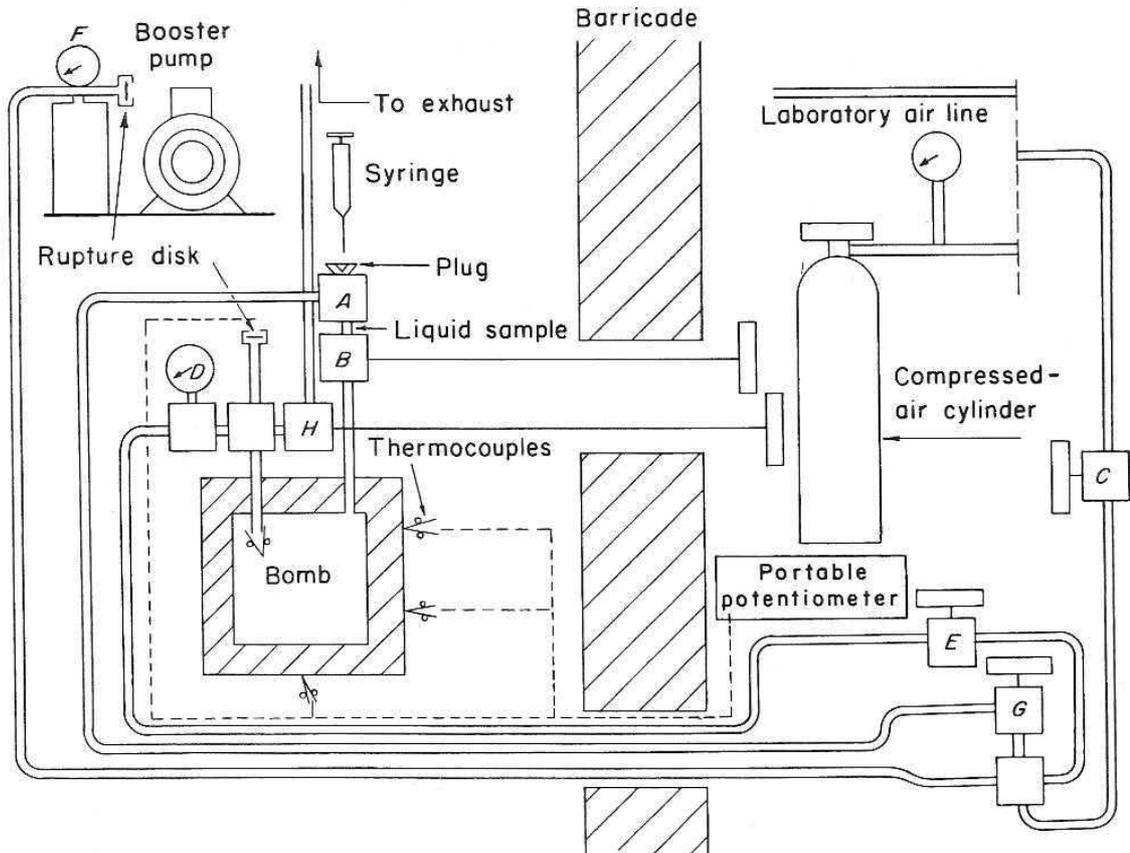
- [1] Compressor and related explosions.  
Michael G. ZABETAKIS – Henry E. PERLEE. *BUREAU OF MINES – US DEP. OF THE INTERIOR 1963*
- [2] Autoignition of lubricants at elevated pressures.  
Michael G. ZABETAKIS, George S. SCOTT, Robert E. KENNEDY  
*BUREAU OF MINES – US DEP. OF THE INTERIOR 1962*
- [3] Flammability characteristics of combustibles gases and vapors.  
Michael G.ZABETAKIS. *BUREAU OF MINES – US DEP. OF THE INTERIOR 1965*
- [4] Effect of pressure on autoignition temperatures of organic compounds.  
*PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT (PTB) 2004*
- [4bis] Safety characteristics at non atmospheric conditions.  
*E.BRANDES. PTB 2004*
- [5] Les explosifs occasionnels.  
Louis MEDARD. *VOLUME 1&2, TECHNIQUE & DOCUMENTATION 1987*
- [6] Ignition handbook.  
Vytenis BABRAUSKAS, *PH.D 2001*
- [7] Compression et détente des gaz et des vapeurs.  
A.LALLEMAND. *TECHNIQUES DE L'INGENIEUR*
- [8] Chemical Kinetics and Chain Reactions.  
Nikolai Nikolaevic SEMENOV. *PRINCETON UNIVERSITY PRESS 1935*
- [9] Safety standards for hydrogen and hydrogen systems.  
*NASA 1997*
- [10] Norme NF EN 13821 Atmosphères explosibles Prévention et protection contre l'explosion. AFNOR 2003
- [11] Ignition of fuels by rapid compression.  
*TAYLOR et al. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY 1950*
- [12] Les machines à compression rapide.  
A.COMBE – H.GUENOCHÉ – C.MEYER. *REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE VOL 12 , 1957*
- [13] Combustion third edition.  
Irvin GLASSMAN. *ACADEMIC PRESS 1996*

- **[14]** Brand und explosionsgefahren durch verdichter mit ölgeschmierten druckräumen.

H.W.THOENES. *TECHN. ÜBERWACH* 1964

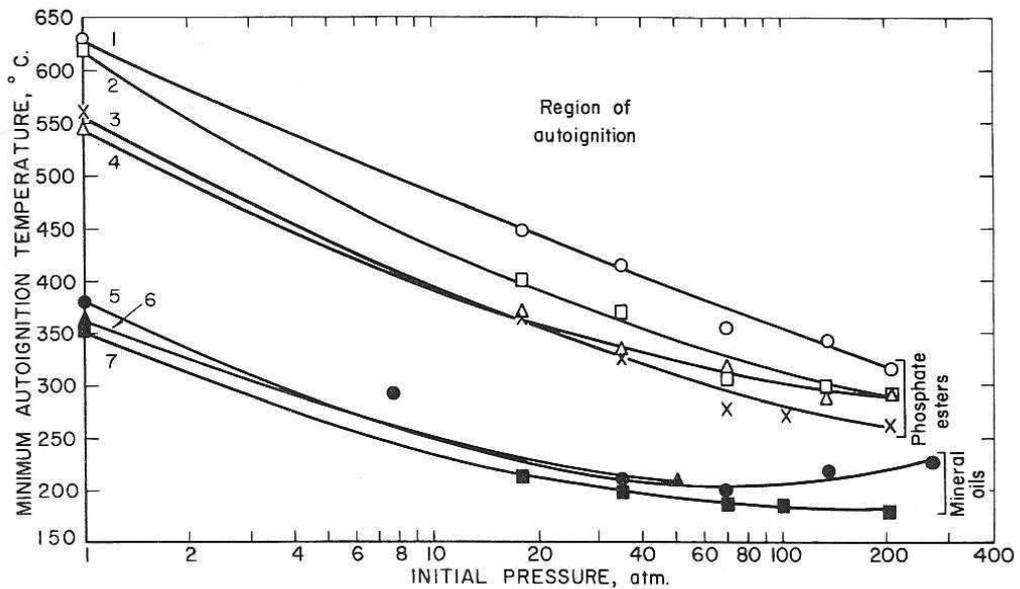
# ANNEXE 1 : ESSAIS DU BUREAU OF MINES

Installation :



Schematic Diagram of Apparatus Used to Determine the Autoignition Temperature of Liquids at Elevated Pressures.

Baisse de la TAI brouillard huile en fonction de la pression selon B.O.M :



## ANNEXE 2 : PROPRIÉTÉS DE QUELQUES HUILES POUR COMPRESSEUR D'AIR

### Huiles Mobil

							Flash point temperature °C	
Mobil Rarus 827	100	107	10,1	66	0,945	-36	270	
Mobil Rarus 829	150	158	13,2	77	0,976	-39	270	
Mobil Rarus 424	32	32	5,4	106	0,866	-33	236	
Mobil Rarus 425	46	46	6,9	105	0,873	-30	238	
Mobil Rarus 426	68	68	8,9	103	0,877	-36	266	
Mobil Rarus 427	100	106	11,6	98	0,879	-21	264	
Mobil Rarus 429	150	147	14,7	99	0,886	-27	278	

### Huiles Castrol

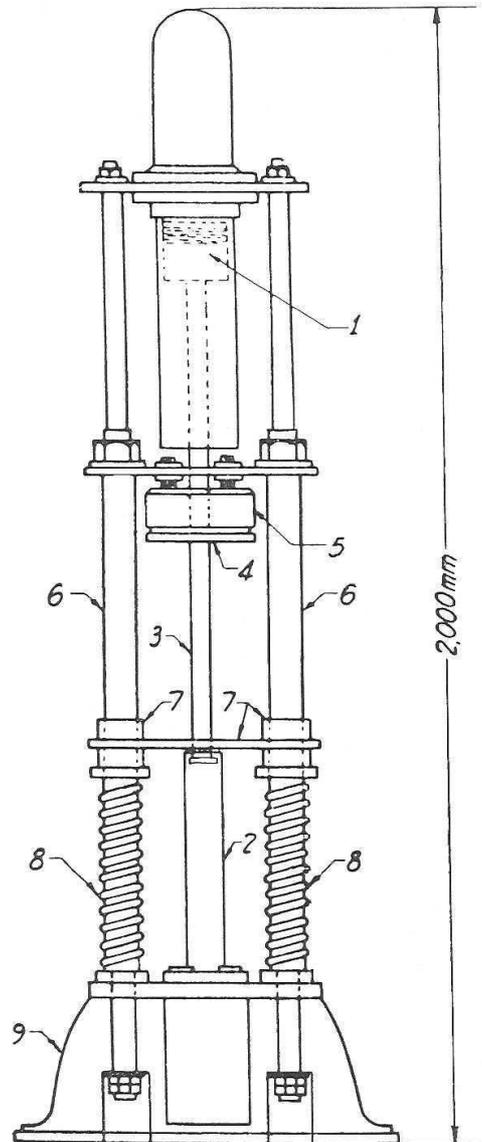


#### Product Data

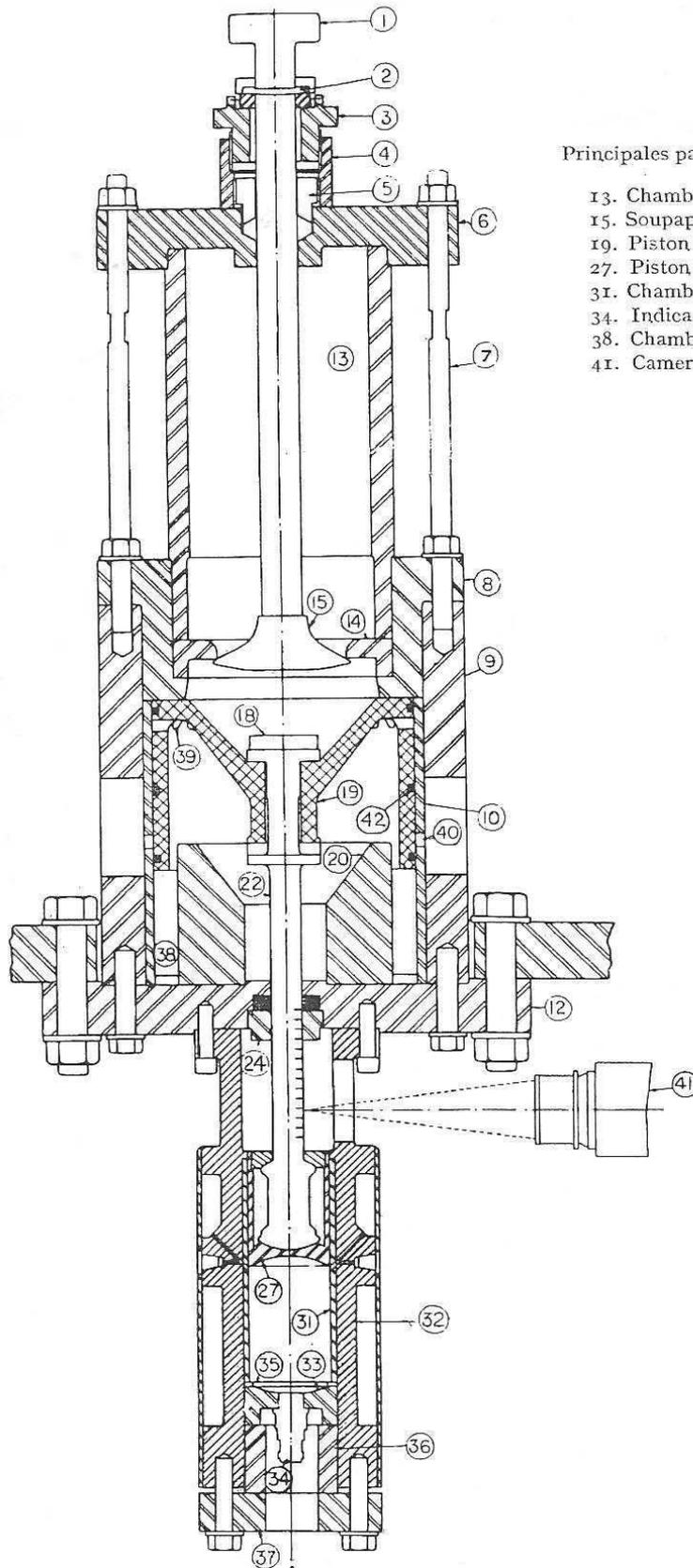
#### TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

TEST	AWS 10	AWS 15	AWS 22	AWS 32	AWS 46	AWS 68	AWS 100	AWS 150
Kinematic Viscosity @ 40°C, cSt	10	15	22	32	46	68	100	150
@ 100°, cSt	2.55	3.2	4.25	5.3	6.65	8.6	11.1	14.5
Viscosity Index	75	75	102	102	102	102	97	97
Relative Density @ 20°C	0.875	0.880	0.865	0.870	0.875	0.880	0.880	0.885
Acidity, mgKOH/g	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Air Release Value @ 50°C, min	4	4	4	4	8	8	12	18
Pour Point, °C	-39	-39	-30	-30	-21	-21	-21	-21
Closed Flash Point, °C	160	160	170	200	220	220	220	220

### ANNEXE 3 : LES MACHINES À COMPRESSION RAPIDE



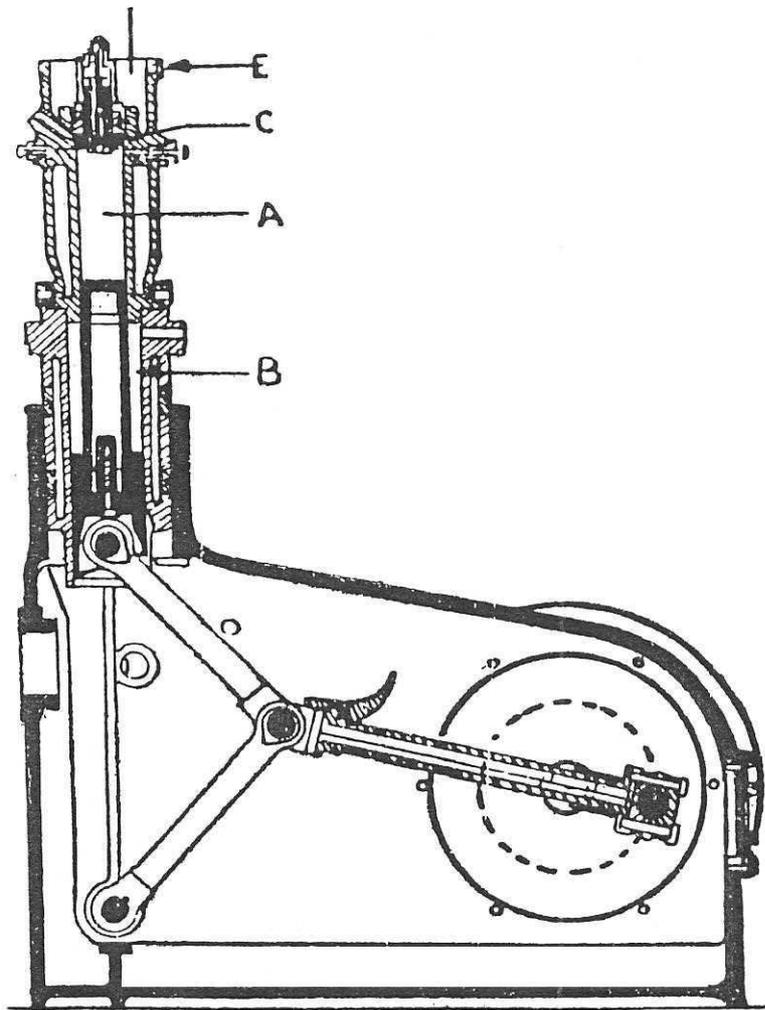
Machine à compression rapide utilisée par ROEGNER pour ses recherches à l'Institut Français du Pétrole [12]



Principales parties de l'installation :

- 13. Chambre de pression.
- 15. Soupape d'admission.
- 19. Piston auxiliaire.
- 27. Piston compresseur.
- 31. Chambre de combustion.
- 34. Indicateur de pression.
- 38. Chambre de contrepression.
- 41. Camera.

Machine à compression rapide utilisée par TAYLOR pour le MIT [11]



Machine à compression rapide utilisée par TIZAR et PYE pour l'IFP [12]