



# La compression

### RÉDUIRE LE VOLUME

La compression au sens premier du terme est le fait de réduire le volume occupé par un liquide, un gaz ou un solide. Cette réduction de volume va avoir des conséquences sur les autres grandeurs physiques qui caractérisent le fluide ou le solide, notamment sur sa pression et sur sa température.

L'homme a vite appris à exploiter cette relation entre volume, pression et température des fluides pour créer toutes sortes de machines, allant du réfrigérateur au moteur turbo.

### EXEMPLES INTRODUCTIFS

Dans la vie de tous les jours, nous pouvons constater le lien qu'il existe pour les fluides entre pression et température. Prenons quelques exemples.

#### LE PNEU DE VÉLO



Lorsque l'on gonfle un pneu de vélo avec une pompe manuelle, le corps de la pompe s'échauffe progressivement. Cet échauffement provient du transfert de chaleur entre l'air contenu dans la pompe et le plastique composant le corps de la pompe. L'air s'échauffe car lorsque l'on pousse sur la pompe, il n'est pas transféré immédiatement dans le pneu à cause de la limite de débit imposée par la valve du pneu. Alors, entre le moment où il est pressé et le moment où il entre dans le pneu, l'air est comprimé. Comme la compression est rapide, sa température augmente, nous verrons par la suite cela dans l'analyse physique du phénomène.

#### LA BOUTEILLE D'AIR COMPRIMÉ

On peut constater le phénomène opposé lorsque l'on sent l'air qui sort d'une bouteille d'air comprimé, par exemple d'une bouteille de plongée. L'air qui sort de ces bouteilles va être plus froid que l'air ambiant pendant un certain laps de temps car il passe d'un état où sa



pression est très supérieure à la pression atmosphérique à un état dans lequel sa pression est égale à la pression atmosphérique. Cette diminution brusque de pression va faire chuter sa température. Ce phénomène est l'exact opposé du phénomène précédent de compression rapide.

### EXPLICATION PHYSIQUE

Voyons maintenant quelle est l'origine physique de ces variations de température et de pression lors de la variation du volume. Avant tout il est important de comprendre ce que représentent physiquement volume, pression et température. Lorsque l'on veut parler en physique d'un fluide, il faut dire de quel fluide on parle. Pour cela, on considère ce qu'on appelle un système fermé, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une partie du fluide qui sera toujours la même, qui aura toujours le même nombre d'atomes ou molécules à l'intérieur, et ces molécules devront toujours être les mêmes. Une façon de penser à un système fermé est de l'imaginer



comme un ballon de baudruche. Son volume peut varier, sa température peut varier, mais aucune molécule n'entre, aucune ne sort du système. C'est pour cela qu'on le qualifie de fermé. Une fois que l'on a un système fermé, on va pouvoir parler de son volume. Il s'agit simplement de la place qu'il occupe à un certain instant. Il représente le volume total occupé par le ballon de baudruche contenant le système.

Ensuite, on peut parler de pression. Dans les cas de la vie courante, pour des phénomènes peu rapides, qui durent une seconde ou plus, la pression au sein d'un système fermé est uniforme, c'est-à-dire qu'elle est identique partout dans le fluide. La pression représente la force qu'exercent les particules qui constituent le fluide sur leur enveloppe. Cette force dépend de la vitesse des particules : plus les particules se déplacent vite, plus leur pression est importante. Par exemple, si l'on considère un piston, plus la pression est élevée dans celui-ci, plus il devient dur

d'appuyer sur le piston pour le déplacer. Cette force qui repousse la paroi du piston est due à la multitude de particules qui viennent se cogner à sa surface. Comme les collisions surviennent extrêmement souvent, on a l'impression qu'il y a une seule force qui pousse le piston et que son intensité est toujours la même au cours du temps, alors qu'il s'agit en fait d'une succession extrêmement rapide de très faibles chocs. On peut expliquer le fait que la force augmente avec la vitesse car plus la vitesse des particules est importante, plus les chocs sont violents.

La troisième grandeur importante qui caractérise un fluide est sa température. La température mesure le niveau d'agitation des particules du fluide, la vitesse à laquelle elles se cognent entre elles. Plus elles se cognent vite, plus la température sera élevée.

#### FORMULE DES GAZ PARFAITS

Maintenant considérant un fluide constitué d'un nombre  $N$  de particules, alors dans un modèle simple appelé le modèle des gaz parfaits, on pourra lier les trois grandeurs pression ( $P$ ), température ( $T$ ) et volume ( $V$ ) qui le caractérisent par la formule suivante :

$P \times V = T \times \text{Constante}$   
Voyons ce que signifie cette formule. Si le volume diminue et que la pression reste la même, alors la température augmente. Cela semble logique, car les particules ont de moins en moins d'espace pour bouger, elles vont donc se cogner plus souvent et la température est plus élevée. On peut imaginer les particules comme des gens courant dans tous les sens dans une pièce : si les gens continuent à courir à la même vitesse alors que la pièce rapetisse, ils vont se cogner plus fréquemment.

Si la pression diminue et que le volume reste le même, la température diminue. En effet, si les gens courent moins vite dans une pièce de même taille, ils se cogneront moins souvent. Si la température augmente et que le volume est fixé, alors la pression va augmenter. En effet, augmenter la température consiste à donner plus d'énergie aux particules qui constituent le fluide et donner de l'énergie à une particule va la faire accélérer. Or, si elle accélère et qu'elle reste dans le même volume, les chocs qu'elle aura avec les parois qui l'entourent seront plus violents, ce qui correspond à une pression plus élevée. Par contre, si l'on augmente le volume du système en même temps que l'on augmente la température, les chocs avec la paroi seront plus violents,

mais ils arriveront moins souvent puisqu'il y aura toujours autant de particules mais une plus grande surface de paroi, donc à un endroit donné de la paroi, les chocs surviendront moins souvent. Ceci explique qu'il est possible d'augmenter la température et de garder une pression identique en augmentant le volume.

On voit avec cette formule qu'il est possible de faire varier plusieurs paramètres en même temps, et que le résultat pour le fluide est différent selon les paramètres que l'on fait varier en même temps. Ce qu'on appelle une compression est une diminution du volume. Il existe deux types principaux de compression qui sont exploités physiquement, une compression dans laquelle on veille à garder la température constante et l'autre dans laquelle on garde la pression constante.

#### COMPRESSION ISOTHERME

Isotherme vient du grec et signifie « même température », une compression isotherme est une compression dans laquelle la température du système est stationnaire, c'est-à-dire qu'elle n'évolue pas au cours du temps. Pour réussir à avoir une compression isotherme, il faut que les parois qui entourent le fluide permettent le transfert de chaleur entre l'extérieur et le système. La température du système va être en permanence celle de ses parois. En fait, lorsque l'on dit que la compression est isotherme cela signifie qu'à chaque instant, la température du système va augmenter ou diminuer un tout petit peu, puis va revenir à sa valeur normale qui est la valeur de la température des parois. C'est comme si le système extérieur volait en permanence de la chaleur au système comprimé, l'obligeant à rester tout le temps à la même température.

En regardant l'équation  $P \times V = T \times \text{Constante}$ , on voit que si la température est constante et que le volume diminue, alors la pression augmente. Cela signifie que dans le cas où le fluide est dans un piston, il faut appuyer de plus en plus fort pour le compresser. L'intérêt d'une telle compression est qu'elle permet de convertir de la force mécanique en chaleur : en effet, comme le système extérieur « vole » la chaleur issue de la compression, il va se réchauffer petit à petit.

Mais l'équation fonctionne aussi dans l'autre sens, et c'est là qu'elle est la plus utile. En augmentant le volume, la pression diminue jusqu'au moment où elle atteint une valeur inférieure à celle de

l'atmosphère. À partir de ce moment-là, il faut tirer de plus en plus fort pour augmenter le volume. Mais dans ce cas, pour pouvoir maintenir la même température, le système devient le voleur de chaleur et c'est alors le système extérieur qui doit donner de la chaleur au fluide dans le piston. Le système extérieur se refroidit donc petit à petit. C'est ce principe qui permet de fabriquer des réfrigérateurs, nous expliquerons par la suite les détails du fonctionnement, mais l'idée principale est là.

#### COMPRESSION ISOBARE

Isobare signifie « même pression » : dans ce type de compression, on garde la pression constante.

On voit dans l'équation  $P \times V = T \times \text{Constante}$  que dans le cas où  $P$  est constante et que l'on augmente  $T$ ,  $V$  augmente aussi. Dans le cas d'un piston, augmenter  $V$  va permettre de déplacer la partie coulissante du piston et donc de générer une force mécanique. Tout l'intérêt de la compression isobare est là : elle permet de transformer la chaleur en force mécanique. C'est elle qui sert dans les moteurs thermiques, que ce soit les moteurs à vapeur ou les moteurs à explosion. En pratique, il est difficile de maintenir  $P$  constante pour un système fermé. On a deux alternatives qui définissent les deux principaux types de moteurs thermiques.

- On n'utilise pas un système fermé, mais un système ouvert (une partie du système est évacuée au fur et à mesure pour faire diminuer la pression). On évacue la partie qui aura poussé le piston, c'est le



principe des **moteurs à vapeur** dans les locomotives.

- On fait en sorte que  $P$  augmente plus lentement que  $T$  afin de forcer  $V$  à augmenter. C'est ce phénomène qui est exploité dans les **moteurs à explosion** : la température



augmente très vite après l'explosion mais pas la pression, donc le volume augmente.

### Comprimé d'informations

3  
Nombre de grandeurs qui caractérisent un fluide :  
- le volume ( $V$ )  
- la pression ( $P$ )  
- la température ( $T$ ).

### Compression isotherme

Se dit d'une compression qui se fait à température stationnaire.

### Compression isobare

Se dit d'une compression qui se fait à pression constante.

25 %  
Efficacité maximale des systèmes de propulsion à vapeur.

40 %  
Efficacité d'un moteur à explosion (sans turbo).

20 %  
L'utilisation d'un turbo augmente de 20 % l'efficacité d'un moteur.

En 1690



par Denis Papin

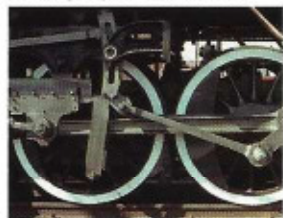
## EXPLOITATION DE LA COMPRESSION AU POINT DE VUE TECHNOLOGIQUE

Le comportement décrit précédemment est un modèle théorique pour les gaz, et les idées générales exprimées ci-dessus sont valables avec toutes sortes de gaz et liquides. Il existe principalement deux champs technologiques utilisant la compression. D'un côté, il y a les dispositifs technologiques qui reposent sur la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique. C'est le champ des moteurs, nous verrons les moteurs à vapeur et les moteurs à explosion. D'un autre côté, se trouve le domaine des machines qui utilisent la conversion de l'énergie mécanique en énergie thermique avec les climatiseurs et les réfrigérateurs.

Lorsque l'on étudie ces conversions d'énergie, il est intéressant de considérer leur efficacité. Celle-ci est définie par l'énergie fournie / énergie obtenue. Par exemple, l'énergie fournie est de l'énergie thermique pour les moteurs et l'énergie reçue est de l'énergie mécanique. Ce rapport quantifie les pertes dues à la conversion d'énergie et est exprimé en pourcentage.

### LES MACHINES À VAPEUR

Le principe de la machine à vapeur est simple : de l'eau est chauffée, elle se transforme en vapeur et la vapeur ainsi produite continue de chauffer, causant une augmentation de pression. La vapeur sous pression est ensuite utilisée pour actionner un **dispositif mécanique** qui va donc fournir de



l'énergie mécanique. On distingue principalement deux types de machines à vapeur : les machines à vapeur fondées sur le déplacement de pistons dans des cylindres – ce sont celles qui équipaient les trains et les usines au <sup>XX</sup> siècle – et d'un autre côté les machines fondées sur des turbines qui sont avant tout utilisées pour la génération d'énergie électrique – les centrales nucléaires reposent par exemple sur ce principe.

Les machines à vapeur s'articulent en trois parties principales :

- une chaudière dans laquelle l'eau est vaporisée, c'est-à-dire transformée en vapeur ;
- un dispositif mécanique qui va convertir la vapeur sous pression en énergie mécanique. Il peut s'agir d'un piston ou d'une turbine ;
- un régulateur qui gère la quantité de vapeur entrant dans le système de conversion de l'énergie, pour pouvoir réguler la puissance de l'énergie mécanique fournie par la machine.

### La chaudière

Il existe divers moyens pour faire

chauffer l'eau. Pendant longtemps, on a utilisé un combustible fossile, comme le **charbon** ou le pétrole, qui en brûlant faisait chauffer les parois de la



chaudière puis l'eau à l'intérieur. Dans une centrale nucléaire, c'est un mécanisme de fission nucléaire qui provoque un dégagement de chaleur très important dans le cœur du réacteur. Ce cœur est entouré d'eau qui va absorber la chaleur dégagée. La vapeur sous pression est ensuite envoyée vers la partie suivante.

### Système de piston

Il peut s'agir d'un cylindre dans lequel se trouve un piston mobile. On conçoit le système de sorte que la vapeur entre alternativement d'un côté puis de l'autre du piston, causant un mouvement de va et vient qui est ensuite utilisé avec une bielle, ce qui permet de transformer ce mouvement selon une droite en un mouvement de rotation. Lorsque le piston va dans un sens, la vapeur de l'autre côté est évacuée via un dispositif adéquat. La vapeur évacuée peut être à nouveau utilisée pour pousser un nouveau piston, on parle de moteurs à double expansion.

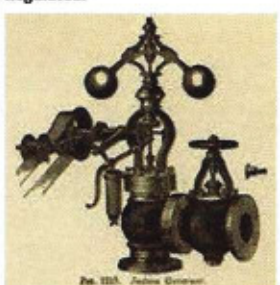
### Turbine

Dans ce cas, la vapeur sous pression correspond à un déplacement d'un gaz,



analogue au vent. Une **turbine** est un système de pales montées sur un axe pouvant tourner sur lui-même. Cet axe, en tournant, peut servir à générer de l'électricité ou bien il peut entraîner une hélice, comme par exemple dans les bateaux à vapeurs propulsés par hélice.

### Régulateur



Le **régulateur** va gérer la quantité de vapeur entrant dans le système de piston ou poussant la turbine. Le moyen le plus simple est d'ajuster l'ouverture par laquelle passe la vapeur, ce qui permet d'ajuster simplement le débit.

Aujourd'hui, les machines à vapeur sont peu utilisées pour la propulsion

car leur efficacité n'est pas très bonne (il existe des moyens de tirer plus d'énergie mécanique d'un litre de pétrole qu'en le faisant brûler pour chauffer de l'eau). On retiendra que les systèmes de propulsion à vapeur les plus performants ne dépassent pas une efficacité supérieure à 25 %.

Cependant, les systèmes de turbines restent d'actualité et sont utilisés dans les centrales nucléaires et les navires à propulsion nucléaire, l'efficacité pour la production d'énergie électrique pure étant de l'ordre de 40 % et la vapeur résiduelle peut être utilisée pour du chauffage, permettant d'atteindre une efficacité d'environ 90 %.

### LES MOTEURS À EXPLOSION

Le principe du moteur à explosion est le suivant. On enferme un gaz combustible, c'est-à-dire qui peut s'enflammer, dans un faible volume. Il va être comprimé rapidement, ce qui va causer l'élévation de sa température jusqu'à ce qu'il s'enflamme, donnant lieu à une explosion, cette explosion fait augmenter brusquement sa température et sa pression. Comme la pression va être très supérieure à la pression atmosphérique, le piston va se déplacer dans le sens de l'augmentation du volume du système. Une fois le gaz consommé, il est évacué et un nouveau volume de gaz est emprisonné donnant lieu à un nouveau cycle. Là encore, on utilise un système de cylindres et de pistons, mais ici le gaz entrant ne pousse pas le piston, au contraire il est aspiré par le mouvement du piston.

La compression est aussi assurée par le mouvement du piston jusqu'à l'explosion, durant laquelle le gaz donne suffisamment d'élan au piston pour qu'il aspire puis comprime un autre volume de gaz. Dans le cas d'un moteur à plusieurs cylindres, ce sont les autres cylindres qui peuvent assurer le mouvement du cylindre. Les moteurs à explosion permettent d'atteindre un niveau d'efficacité élevé de l'ordre de 40 % sans turbo.

### Le turbocompresseur ou turbo

Le principe du turbocompresseur est de forcer plus d'air à entrer dans un cylindre du moteur afin de permettre d'utiliser plus de combustible dans le moteur et d'augmenter la puissance du moteur. Il faut faire attention à bien contrôler le turbo pour éviter une explosion trop forte qui détruirait le moteur. Le turbocompresseur tire son énergie d'une turbine animée par les gaz d'échappements du moteur qui ont encore suffisamment de pression pour la faire tourner, énergie qui serait perdue sinon. L'utilisation d'un turbo permet d'obtenir une amélioration de l'efficacité du moteur d'environ 20 % et aujourd'hui quasiment toutes les



voitures diesel possèdent un **turbocompresseur**.

### LES CLIMATISEURS ET RÉFRIGÉRATEURS

Un réfrigérateur repose sur le principe de la pompe à chaleur. On dispose de deux sources de chaleur, une source chaude et une source froide (dans un système de réfrigération, on veut refroidir la source froide). On dispose aussi d'un fluide que l'on appelle fluide caloporteur, c'est-à-dire qui porte la chaleur, et qui va servir d'intermédiaire entre les sources de chaleurs, portant la chaleur de l'une vers l'autre. Il est également indispensable de disposer d'un compresseur qui va permettre de faire varier la pression et donc la température du fluide caloporteur. Ce que l'on cherche à réaliser est le transfert de chaleur de la source froide vers la source chaude. Le sens naturel du transfert de chaleur est le sens contraire, du chaud vers le froid, c'est pourquoi on va utiliser un compresseur pour forcer le sens du phénomène via le fluide caloporteur. Le cycle se déroule en quatre temps et s'appelle cycle de Carnot. On comprime le fluide caloporteur qui sort pour le faire passer de l'état gazeux à l'état liquide, ce qui augmente sa température au-delà de la température de la source chaude.



On le met ensuite au contact de la source chaude via un tube long situé à l'arrière du réfrigérateur qui s'appelle un **radiateur**. Comme le fluide est plus chaud que la source chaude, il se refroidit jusqu'à atteindre une température égale à celle de la source chaude. Le fluide sous pression qui a une température égale à celle de la source chaude est détendu, c'est-à-dire qu'on lui permet de repasser de l'état liquide à l'état gazeux. Cette détente le refroidit. Mais c'est surtout l'énergie nécessaire au changement d'état qui va refroidir la source froide, c'est-à-dire l'enceinte que l'on veut réfrigérer. On appelle cette énergie la chaleur latente de vaporisation. Cette quantité de chaleur est extraite de la source froide pour porter le fluide calorifique à l'état de vapeur.

Le fluide calorifique est condensé puis comprimé et un nouveau cycle peut commencer.

À chaque cycle, la source froide se refroidit et la source chaude se réchauffe, le prix de cet échange contre nature est l'énergie consommée par le compresseur.

La pompe à chaleur peut aussi être utilisée comme système de chauffage car si la source froide est refroidie, la source chaude, elle, est réchauffée. Dans le cas d'un réfrigérateur, la source froide est l'intérieur du réfrigérateur et la source chaude est l'atmosphère. Mais on peut aussi faire en sorte que la source froide soit située à l'extérieur d'une habitation, elle peut être par exemple une mare ou une rivière, alors on fixe comme source chaude l'intérieur de l'habitation et le système

fonctionne comme chauffage, refroidissant l'extérieur et réchauffant l'intérieur. L'efficacité de ce système de chauffage ou de refroidissement, c'est-à-dire la chaleur qu'il est capable de transférer d'une source à l'autre pour une certaine consommation d'énergie (le plus souvent électrique) est bonne et c'est pourquoi il peut être préféré à un chauffage par combustion lorsqu'il est disponible.

### POMPES ET COMPRESSEURS

Les compresseurs sont indispensables pour faire varier la pression d'un fluide



et sont utilisés dans les **systèmes de climatisation** aussi bien que dans les turbo-compresseurs. Voyons comment ils sont construits. Notons que

dans le cas d'un liquide, on préfère utiliser le terme de pompe à celui de compresseur. Il existe plusieurs types de technologies, mais elles peuvent être séparées en deux grandes catégories : les compresseurs qui fournissent une compression en continu, ils sont appelés compresseurs dynamiques (par exemple les turbo-compresseurs) et ceux qui fonctionnent par intermittence en compressant un certain volume, ils sont appelés compresseurs à déplacement positif.

### Compresseurs dynamiques

Les compresseurs dynamiques doivent en permanence compresser le fluide, pour cela ils utilisent des tubes dont la section est de plus en plus étroite. Dans ces tubes se trouvent des hélices qui forcent le fluide à circuler à une certaine vitesse. Le fluide est alors entraîné rapidement à travers un tube dont la section diminue rapidement, provoquant sa compression. On peut voir les ouvertures de ces tubes de compression à l'avant des voitures dotées de turbocompresseurs.

### Compresseur à déplacement positif

Ces compresseurs sont souvent fondés sur un système de pistons et cylindres. Le fluide est enfermé dans un volume puis comprimé mécaniquement et ensuite enfermé dans un récipient qui va le garder à haute pression. Les bouteilles d'air comprimé peuvent être remplies ainsi. Le piston qui produit la compression mécanique est alimenté lui-même par un moteur électrique ou à explosion.

Les pompes sont séparées selon les mêmes catégories, mais les liquides étant peu compressibles d'une manière générale, l'augmentation de la pression d'un liquide est souvent liée à son déplacement. Par exemple, une pompe est nécessaire pour faire monter de l'eau dans une colonne verticale. En effet, la pression de l'eau augmente d'environ une fois la pression de l'atmosphère par mètre de hauteur, en augmentant la pression de l'eau au sommet de la colonne, l'eau est aspirée vers le haut afin de rétablir l'équilibre de la pression.