

Principes

La méthode de dimensionnement d'un accumulateur se base sur le changement d'état du gaz à l'intérieur de l'accumulateur. Les mêmes changements s'opèrent pour l'huile.

Lors du dimensionnement d'accumulateurs hydrauliques, il faut tenir compte des deux éléments suivants:

- Le principe veut que le gaz de remplissage de l'accumulateur (azote) se comporte comme un gaz idéal, ce qui, en pratique, n'est pas le cas à haute pression et à basse température.
- Sur la base de processus d'échange de chaleur inconnus, des changements d'état isothermiques ou adiabatiques sont présumés.

Le gaz idéal et réel

Gaz idéal: N'existe pas

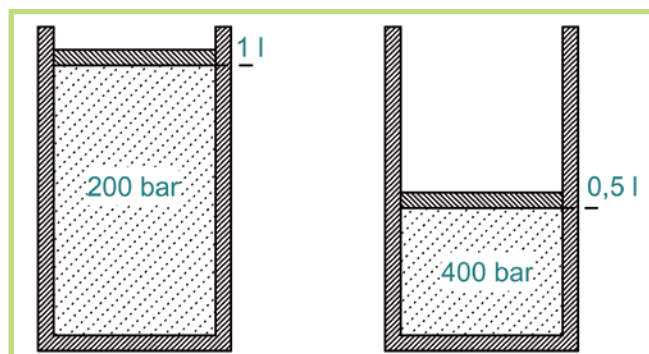
Gaz réel: Tous les gaz que nous connaissons sont des gaz réels. Plus ils s'éloignent de leur point de condensation (pas sage de l'état gazeux à l'état liquide), plus leurs caractéristiques s'approchent de celles d'un gaz idéal.

Point de condensation de l'azote: -196 °C

En supposant avoir affaire à un gaz idéal, le gaz de remplissage de l'accumulateur se comporte de la manière décrite plus avant.

Equation d'état d'un gaz idéal

A température constante et changement d'état isothermique:



La Loi de Boyle-Mariotte

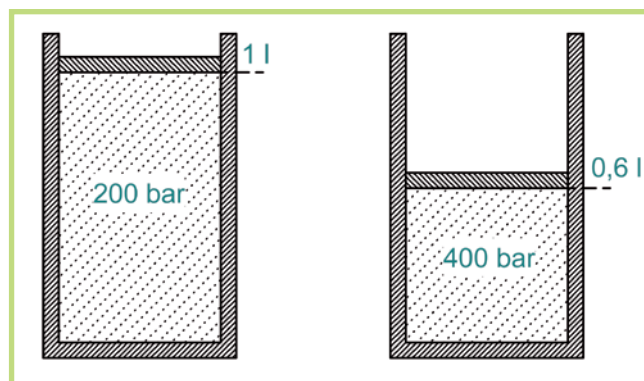
A température constante, le produit de la pression et du volume d'un gaz enfermé est toujours constant.

$$p \cdot V = \text{constant}$$

Cependant, étant donné qu'aucun gaz idéal n'est disponible, il est nécessaire de prendre en considération le comportement du gaz réel.

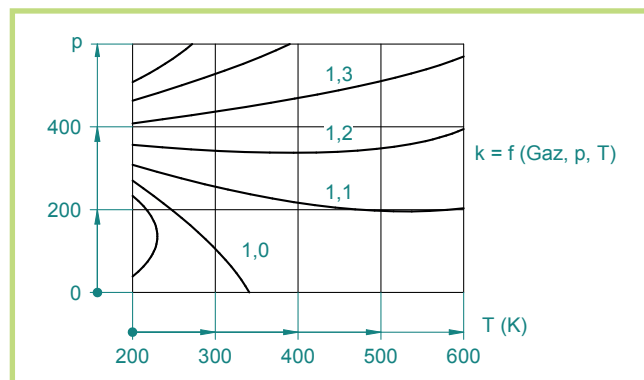
Equation d'état d'un gaz réel

A température constante et changement d'état isothermique:

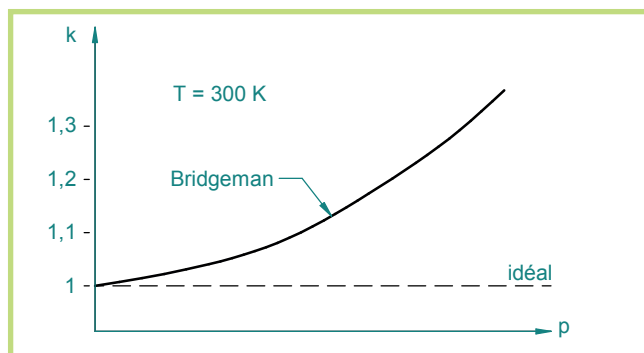


Il faut se faire à l'évidence que l'équation d'état $p \cdot V = \text{constant}$ ne décrit plus assez précisément le comportement réel d'un gaz, tout spécialement à haute pression et à basse température. Le facteur de compressibilité "k" permet de prendre en compte et de décrire les écarts de comportement survenant entre le gaz réel et le gaz idéal.

Diagramme p - T pour des valeurs constantes "k" dans le cas de l'azote



L'équation de Beattie Bridgeman, intégrée dans notre programme pour ordinateur, permet de tenir compte de cet écart.



Les changements d'état des gaz idéaux

L'état d'un gaz est défini par trois éléments qui sont la **pression**, le **volume** et la **température**, également appelés variables d'état. Un changement d'état désigne le changement de deux ou de toutes les variables d'état.

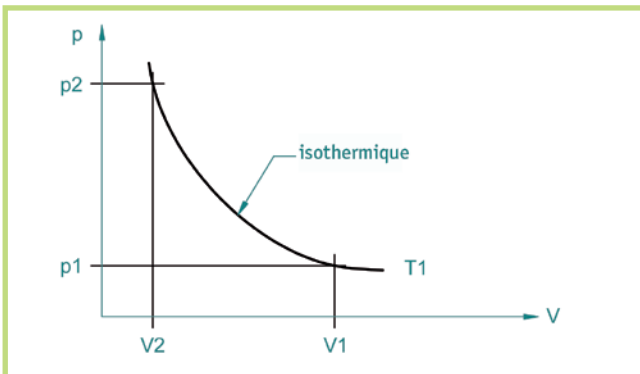
Lorsque l'accumulateur hydraulique se remplit ou se vide, un échange de travail est réalisé au niveau du gaz de l'accumulateur. Si la température de ce gaz diffère de la température ambiante, un échange thermique a lieu. Les processus qui touchent au gaz de l'accumulateur et qui sont liés aux échanges thermiques et de travail peuvent être décrits à l'aide d'un changement d'état isobare (à pression constante), isothermique (à température constante), isochore (à volume constant), adiabatique (sans échange de chaleur) ou polytropique (entre isothermique et adiabatique).

Les processus suivants s'opèrent avec variation du volume:

Le changement d'état isothermique

On parle d'un changement d'état isothermique pour un accumulateur hydraulique lorsque ses charge ou décharge s'opèrent sur une longue période qui permet un échange thermique complet avec l'environnement.

Lors d'un tel changement d'état, le gaz échange du travail et de la chaleur avec l'environnement.



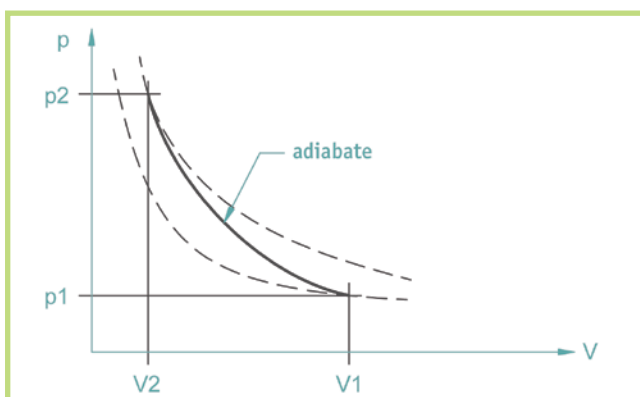
Relation entre p, V et T

La loi de Boyle-Mariotte régit cette relation:

$$p \cdot V = \text{konstant} \quad T = \text{constant}$$

Le changement d'état adiabatique

On parle de changement d'état adiabatique pour un accumulateur hydraulique lorsque ses charge ou décharge s'opèrent dans un délai si bref qu'aucun échange de chaleur ne peut s'effectuer avec l'environnement. Seul un échange de travail a lieu.



Relation entre p, V et T

La loi suivante régit cette relation:

$$p \cdot V^\chi = \text{constant} \quad \text{avec } \chi = \text{exposant adiabatique}$$

$$\chi = f(p, T, \text{gaz})$$

$$\chi = \frac{c_p}{c_v}$$

c_p = capacité thermique spécifique à pression constante
 c_v = capacité thermique spécifique à volume constant

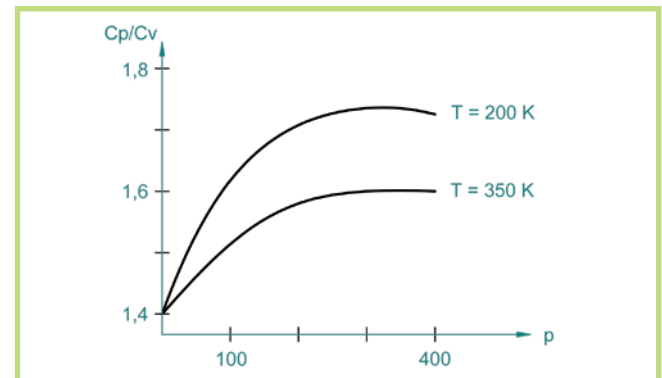
En se basant sur un gaz idéal, l'exposant adiabatique dépend du nombre d'atomes du gaz.

$$\left. \begin{array}{l} \chi = 1,67 \quad \text{gaz à 1 atome} \\ \chi = 1,4 \quad \text{gaz à 2 atomes} \\ \chi = 1,3 \quad \text{gaz à 3 atomes} \end{array} \right\} \text{ à } 0^\circ\text{C et 1 bar}$$

Plus le nombre d'atomes est important, plus χ se rapproche de 1. L'exposant adiabatique χ de l'azote est de 1,4.

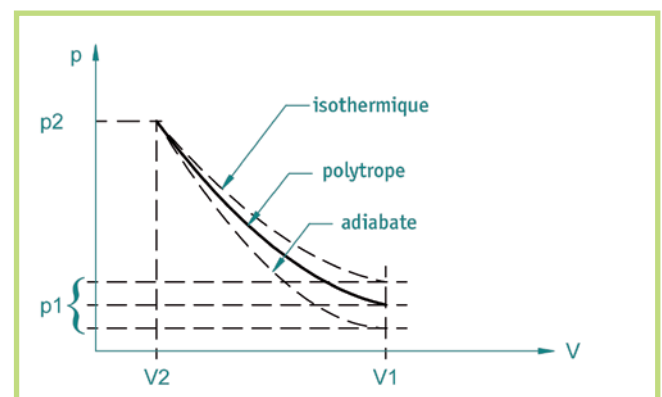
Comme mentionné précédemment, l'exposant adiabatique dépend non seulement du gaz, mais également de la pression et de la température.

Cet exposant adiabatique peut donc aussi dépasser la valeur de 1,4.



Le changement d'état polytropique

Lors de la charge ou de la décharge de l'accumulateur, le changement d'état ne s'opère que rarement de manière entièrement isothermique ou adiabatique. Le gaz de l'accumulateur échange ainsi une partie de la chaleur. Ce changement d'état appelé polytropique se caractérise donc par les deux échanges de travail et, dans une mesure plus ou moins grande, thermique.



Relation entre p, V et T

La loi suivante régit cette relation:

$$p \cdot V^n = \text{constant}$$

n = exposant polytropique

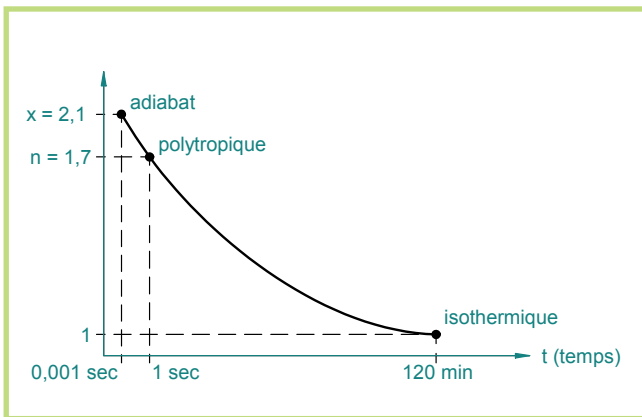
$n = f(p_1, p_2, p_{0r}, V_{0r}, T_{\text{huile}}, T_{\text{gaz}}, t, \text{forme d'accumulateur})$

En se rapprochant du cas isothermique "n" tend vers 1 et du cas adiabatique vers l'exposant adiabatique " χ ".

$$1 < n < \chi$$

Relation entre l'exposant adiabatique " χ " et polytropique "n"

Exemple d'un accumulateur hydraulique de type EHV 50-330, à une pression de service de 300 bar et une température de service de 10 °C:



χ représente la valeur la plus haute sur la courbe. L'exposant polytropique "n" se trouve entre l'adiabatique et l'isothermique et dépend de $t, p_1, p_2, p_{0r}, V_{0r}, T_{\text{huile}}, T_{\text{gaz}}$ et de la forme de l'accumulateur.

Toutes ces formules et ces explications montrent clairement qu'il n'est pas possible de dimensionner précisément un accumulateur hydraulique à l'aide de diagrammes et de formules simples.


Seul un programme exécuté par un ordinateur puissant permet un dimensionnement qui tient compte de tous les facteurs précités.

ORELL possède ce programme!

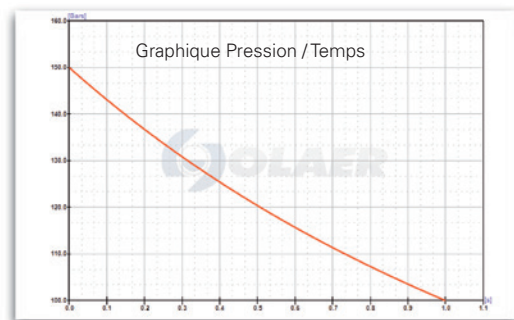
Mettez-nous à l'épreuve.

Les exemples suivants illustrent les informations contenues dans les copies papier des calculs imprimées par l'ordinateur.

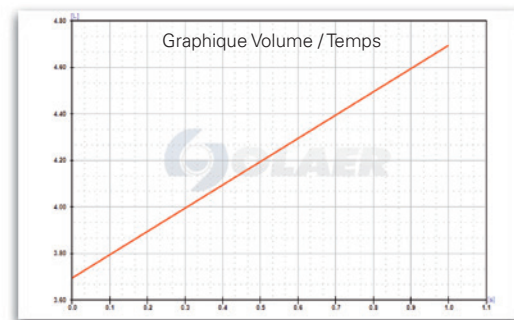
Copie papier 1 - Caractéristiques techniques à 20 °C

 OLAER Accu 2.1 Simulation en réserve d'énergie	
Informations Client	
Nom: (P.16.201)	Etat-Projet: Projet
Statut: Normal	
Contact: Contact	
Editeur:	
Commentaires:	
Données	
Type d'accumulateur: à l'huile	
Pression initiale: 150 bar	Volume d'échange: 1 L
Pression finale: 100 bar	Temps d'échange: 1 s
Temp. initiale: 20 °C	Volume de l'accumulateur: 4 L
Temp. finale: 20 °C	Pression de gonflage à 20 °C: 200 bar
Statut	
Coefficient polytropique: 1,4	
Volume gaz initial: 3,7 L	Pression finale: 150 bar
Volume gaz final: 4,1 L	Pression finale: 100 bar
Volume d'échange: 0,4 L	Temp. initiale: 20 °C
Etat: 19,88 Litres	Etat final: 11,8 °C

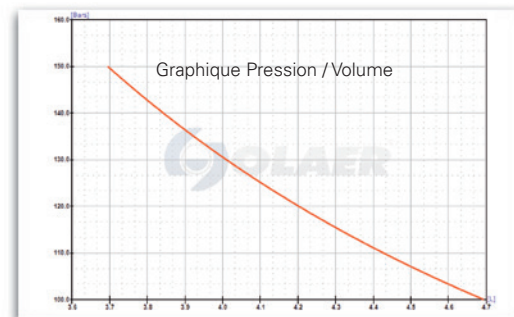
Copie papier 2 - Diagramme p - t



Copie papier 3 - Diagramme V - t



Copie papier 4 - Diagramme p - V



Calcul approximatif d'accumulateurs

Paramètres et abréviations

p_0 = Pression de prégonflage (bar)	normalement à 20 °C
p_1 = Pression de service minimale (bar)	surpression de service minimale admissible
p_2 = Pression de service maximale (bar)	surpression de service maximale admissible
ΔV = Volume restitué (l) ($V_1 - V_2$)	volume de liquide pris en charge ou restitué
T_1 = Température de service minimale (°C)	température ambiante ou du liquide minimale
T_2 = Température de service maximale (°C)	température ambiante ou du liquide maximale
t = Temps de charge / décharge (sec)	temps nécessaire à l'accumulateur pour accumuler ou restituer
V_0 = Volume effectif de l'accumulateur (l)	correspond à l'indication "Capacité" dans les fiches techniques
V_1 = Capacité à la pression p_1 (l)	volume de gaz accumulé à la pression p_1
V_2 = Capacité à la pression p_2 (l)	volume de gaz accumulé à la pression p_2
n = Exposant polytropique	coefficient qui tient compte de l'échange thermique
p_m = Pression de service moyenne (bar)	utilisée pour dimensionner des accumulateurs amortisseurs de pulsation

$$\frac{p_2 + p_1}{2} = p_m$$

Pour tous les calculs de dimensionnement d'accumulateurs, on utilisera les pressions absolues (pression relative + 1 bar).

Dimensionnement des réserves d'énergies:

Formule de calcul de la capacité V_0 :

$$V_0 = \frac{\Delta V \cdot \frac{p_1}{p_0}}{1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}}$$

Formule de calcul du volume restitué ΔV :

$$\Delta V = V_0 \cdot p_0 \frac{1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}}{p_1}$$

Influence de la température

Les formules présentées ci-dessus ne sont utilisables qu'à des températures approximativement stables. Lorsqu'un système est soumis à de fortes variations de températures, une correction doit être apportée, également lors d'un calcul approximatif.

On se servira alors de la loi de Gay-Lussac:

$$V'_0 = V_0 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

Pression de gonflage

En règle générale, les pressions p_1 et p_2 sont définies par le système hydraulique. La pression de gonflage doit être choisie en fonction du cas spécifique et de la forme de l'accumulateur.

La pression de gonflage est toujours définie pour la température maximale de service (T_2). Le remplissage de gaz et son contrôle s'opèrent dans la plupart des cas à une température de 20 °C. Toutes les indications publiées par ORELL concernant la pression de gonflage sont valables pour une température de 20 °C.

En général, les formules suivantes sont utilisées:

Lors d'accumulation d'énergie / réserve de sécurité

$$p_0 = 0,9 \cdot p_1$$

à la température de T_2

Limites : $p_0 \text{ min.} \geq 0,2 \times p_2$
 $p_0 \text{ max.} = p_1$
(voir avec ORELL; dépend des conditions d'utilisation)

Lors d'équilibrage de poids

$$p_0 = 0,9 \cdot p_1$$

à la température de T_2

Lors d'amortissement de pulsation

$$p_0 = 0,6 \cdot p_m$$

à la température de T_2

Pour des accumulateurs avec bouteilles additionnelles

Accumulateur à vessie

$$p_0 = (0,95 \div 0,97) \cdot p_1 \quad \text{à la température de } T_2$$

Accumulateur à piston

$$p_0 = p_1 - (2 \div 5 \text{ bar}) \quad \text{à la température de } T_2$$

Calcul de la pression de gonflage p_0 à 20 °C

$$p_0 \text{ à } 20 \text{ °C} = p_0 \text{ à } T_2 \cdot \frac{273 + 20}{T_2}$$

Exemple de dimensionnement:

Valeurs connues:

Pression de service p_2 max. 190 bar
Pression de service p_1 min. 100 bar
Volume restitué ΔV 2 l
Temps de décharge 1 sec
Température de service T_1 min. 25 °C
Température de service T_2 min. 45 °C
Exposant polytropique n à 25 °C = 1,638
(selon notre programme PC) à 45 °C = 1,617

Valeur recherchée:

Capacité V_0 de l'accumulateur hydraulique.

Solution:

a) Calcul de la pression de gonflage p_0 à la température de service maximale

$$p_0 = 0,9 \cdot 101 = 91 \text{ bar} = 90 \text{ bar relatif}$$

b) Calcul de la capacité V_0

$$V_0 = \frac{\Delta V \cdot \frac{p_1}{p_0}}{1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}} = \frac{2 \cdot \frac{101}{91}}{1 - \left(\frac{101}{191}\right)^{\frac{1}{1,6}}} = 6,8 \text{ litre}$$

c) Calcul de la capacité V'_0

$$V'_0 = V_0 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 6,8 \cdot \frac{318}{298}$$

d) Calcul de la pression de gonflage p_0 à 20 °C

$$p_0 \text{ à } 20 \text{ °C} = 0,9 \cdot p_1 \cdot \frac{273 + 20}{T_2} =$$

$$0,9 \cdot 101 \cdot \frac{273 + 20}{318} =$$

$$84 \text{ bar} = 83 \text{ bar relatifs}$$

Les fiches techniques permettent de sélectionner un accumulateur de la série désirée dans la gamme de pression requise et une capacité $V_0 > 7,3$ l.

Dans notre exemple, l'accumulateur du type **EHV 10 - 210 - K** ou **EHV 10 - 210 - L** fait l'affaire (selon la forme d'accumulateur désirée).

Un calcul effectué par notre ordinateur donne un ΔV de 2,06 l à 25 °C et 2,26 l à 45 °C.

Attention!

Nous avons mentionné dans la partie théorique de ce document la forte influence de la température sur le dimensionnement des accumulateurs. A -10 °C, le même accumulateur de 10 l de capacité ne restitue plus que 1,71 l d'huile, par exemple.