

## Chapitre 1 : Technologie du vide

---

### 1. Un peu d'histoire

Le concept du vide est admis par les philosophes grecs fondateurs de l'atomisme.

Leucippe (vers **440 av. J.-C.**) et Démocrite (**420 av. J.-C.**) postulent que « toutes les choses sont composées d'atomes en incessant mouvement dans le vide ». Hélas, cette approche mécanistique ne trouve pas sa place dans la perfection aristotélicienne.

En **1644**, Torricelli établit l'existence de la pression atmosphérique avec pour conséquence immédiate la notion du vide. Naturellement, c'est la pression atmosphérique qui constitue le sujet d'intérêt.

Vers **1650**, O. V. Guericke montre, par les effets produits, la force que l'on peut en attendre.

Une application est tentée par D. Papin en **1690** et réussie par T. Newcomen en **1712** : en utilisant le vide partiel créé par la condensation de la vapeur d'eau dans un cylindre, un piston mobile déplace des charges. Le rendement n'est pas bon, mais ces inventions contribueront à la naissance de la thermodynamique (Revoir Cours de la thermodynamique des 1<sup>ère</sup> & 2<sup>ème</sup> années TC\_ST).

**Au XVII<sup>e</sup> siècle**, R. Boyle et E. Mariotte établissent la loi de la compressibilité des gaz.

**Au XIX<sup>e</sup> siècle**, J. Dalton justifie l'hypothèse atomique, tandis que les lois de l'électromagnétisme et la théorie cinétique des gaz seront l'œuvre de J. C. Maxwell.

Un tube à électrodes est construit par H. Geissler en **1855**. Les décharges électriques dans les gaz seront un sujet d'études réclamant des moyens de pompage.

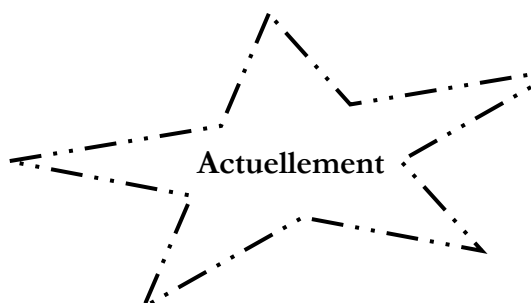
A. Toepler invente la pompe à chute de mercure en **1862**.

.

.

.

Après Aristote, l'Homme a, pendant près de vingt siècles, voulu croire que la nature avait horreur du vide. Au XVII<sup>e</sup> siècle quelques esprits éclairés, dont B. Pascal, qui joua un rôle déterminant avec entre autres sa fameuse expérience du Puy de Dôme, réussirent à ébranler cette croyance en mettant en évidence le rôle de la pression atmosphérique.



- Le vide n'est pas l'exception mais, bien au contraire, c'est l'atmosphère qui est l'exception.
- Que l'on se tourne vers l'infiniment grand, le cosmos dans lequel le vide est la règle, ou vers l'infiniment petit, l'atome dans lequel les distances entre noyau et électrons sont très grandes devant la taille de ces particules, c'est le vide qui prédomine.

## 2. Le vide c'est quoi au juste ?

De quoi parlons-nous quand on évoque Le **Vide** ? Pour y voir plus clair, il est essentiel de se référer à notre milieu normal : l'atmosphère. L'atmosphère qui nous entoure est constituée d'un nombre considérable de molécules de gaz puisqu'il y a, au niveau de la mer, environ  $2.7 \times 10^{19}$  de molécules dans chaque  $\text{cm}^3$  de l'air que nous respirons.

Si l'on pouvait juxtaposer toutes les molécules sans espace entre elles, elles n'occuperaient qu'un peu plus du millième du volume qui leur est offert. On conçoit, dans ces conditions, qu'il leur reste de l'espace pour se mouvoir ; et c'est ce qu'elles font ! Elles se déplacent sans cesse dans toutes les directions à des vitesses importantes ( $\approx 470$  m/s pour l'azote, 1700 m/s pour l'Hydrogène à la température ambiante).

Si ce milieu dans lequel nous sommes immergés ne nous est pas habituellement perceptible et ne contrarie pas nos mouvements, il n'en est pas de même pour un certain nombre de processus mis en œuvre dans la recherche et l'industrie. C'est pour cette raison que, pour le fonctionnement de ces processus, il va falloir faire le vide, c'est-à-dire réduire le nombre de molécules présentes.

Réduire le nombre de molécules, c'est aussi réduire la pression qu'elles exercent. On va donc quantifier le niveau de vide obtenu, soit en termes de densité moléculaire, soit en termes de pression. Cette dernière est la grandeur la plus fréquemment utilisée, elle s'exprime en Pascals ou, plus fréquemment dans la pratique, en mbar ou hPa (1 mbar = 100 Pa). La pression atmosphérique normale qui correspond à la densité moléculaire de  $2.7 \times 10^{19}$  molécules par  $\text{cm}^3$  = 101325 Pa (1013 mbar).

Faire le vide dans un volume, c'est donc partir de la pression atmosphérique et en évacuer les molécules, ce qui fait baisser la pression. Le niveau de vide recherché dépend de l'application : de quelques mbar pour la manutention sous vide à moins de  $10^{-11}$  mbar ( $10^{-9}$  Pa) pour les accélérateurs de particules ou les analyses de surfaces. Notons au passage que le vide parfait n'existe pas et qu'à une pression de  $10^{-10}$  Pa qui n'est pas si facile à obtenir, il reste encore 27000 molécules par  $\text{cm}^3$ .



Vide = absence de toute matière.

Vide absolu = milieu sans particules élémentaires.

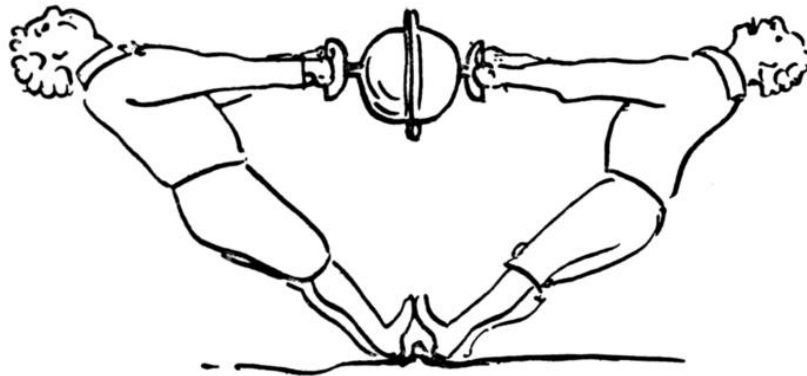
Un espace dans lequel les molécules sont fortement raréfiées peut donc être retenu comme une première définition du vide approximatif.

Ainsi, il suffit d'utiliser une pompe à vide pour extraire l'air d'une enceinte étanche pour y faire le vide.

La qualité du vide est alors définie par la pression d'air résiduelle, généralement exprimée en pascal, en millibar ou en torr. Seul un vide partiel peut être atteint avec un tel processus, quelle que soit la température.



Le vide correspond à une diminution de la quantité de gaz dans un volume donné. Cette donnée est impossible à mesurer directement et, en réalité, on la mesure indirectement par la pression, c'est à dire la force exercée par les molécules sur les parois du récipient.



TRYING TO SEPARATE THE TWO  
"MAGDEBURG HEMISPHERES"

Expérience des hémisphères de Magdebourg\* revisitée,  
Herbert Hall Turner, Voyage in Space, 1913.

Par Herbert Hall Turner — A Voyage in Space, Domaine public,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45743296>

### But/Objectif du vide

Le but de la technique du vide est d'obtenir des pressions inférieures à la pression atmosphérique en diminuant la quantité de matière présente sous la forme de gaz ou de vapeur. On utilise à cet effet différents modèles de pompes selon la pression que l'on souhaite obtenir.

Les procédés mis en œuvre sont fondés pour l'essentiel sur la connaissance de l'état gazeux. C'est avec l'apparition de l'ère industrielle, quand la compréhension de la chaleur puis celle de la nature atomistique de l'énergie devinrent des questions pertinentes, que l'étude de l'état gazeux prit toute son importance. Conduite au moyen de l'outil mathématique et conceptuel de l'époque, cette étude aboutit, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, à la théorie cinétique des gaz qui permet de prédire les rapports entre les propriétés microscopiques d'un gaz et son comportement moyen. Disposant désormais de règles formalisées suffisantes, l'emploi des basses pressions devint possible à toute échelle, du laboratoire à l'industrie.

---

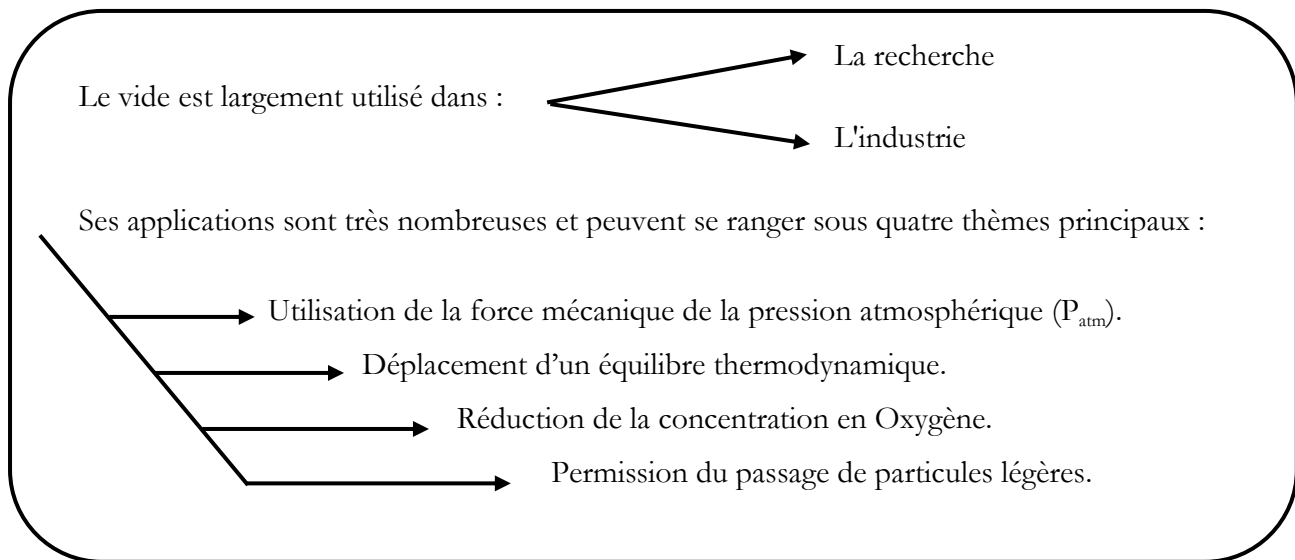
\* Les hémisphères de Magdebourg = dispositif expérimental d'Otto von Guericke, bourgmestre de Magdebourg, ayant servi à démontrer l'existence du vide et la notion de pression de l'air.

Avec le développement des inventions liées à l'électricité, il a fallu simultanément approfondir les connaissances et perfectionner les techniques.

La technique du vide présente des imbrications particulières avec la physique de l'état solide, la caractérisation des interfaces, les technologies des couches minces. De ce fait, c'est très souvent dans les mêmes lieux et par les mêmes personnes que les objectifs d'amélioration ont été poursuivis.

Malgré la spécialisation croissante du travail, il est vraisemblable que le domaine des hautes énergies, la détection des ondes gravitationnelles, les nanotechnologies et la conquête de l'espace sont autant de défis qui perpétueront les caractères spécifiques de la technique du vide.

### Applications du vide



Quand on parle de vide, il faudrait plutôt parler d'atmosphère raréfiée. En effet, le vide absolu n'existe pas, même au plus profond de l'espace intergalactique où l'on rencontre encore entre 1 et 10 particules par  $m^3$ .

Dans notre environnement où nous utilisons le vide de manière quotidienne, du paquet de café emballé sous vide au tube de notre téléviseur, l'écart peut être considérable, de 0.1 atm dans le premier cas à  $10^{-9}$  atm dans le second (ce qui représente encore de l'ordre de 27 milliards de molécules par  $cm^3$ ).

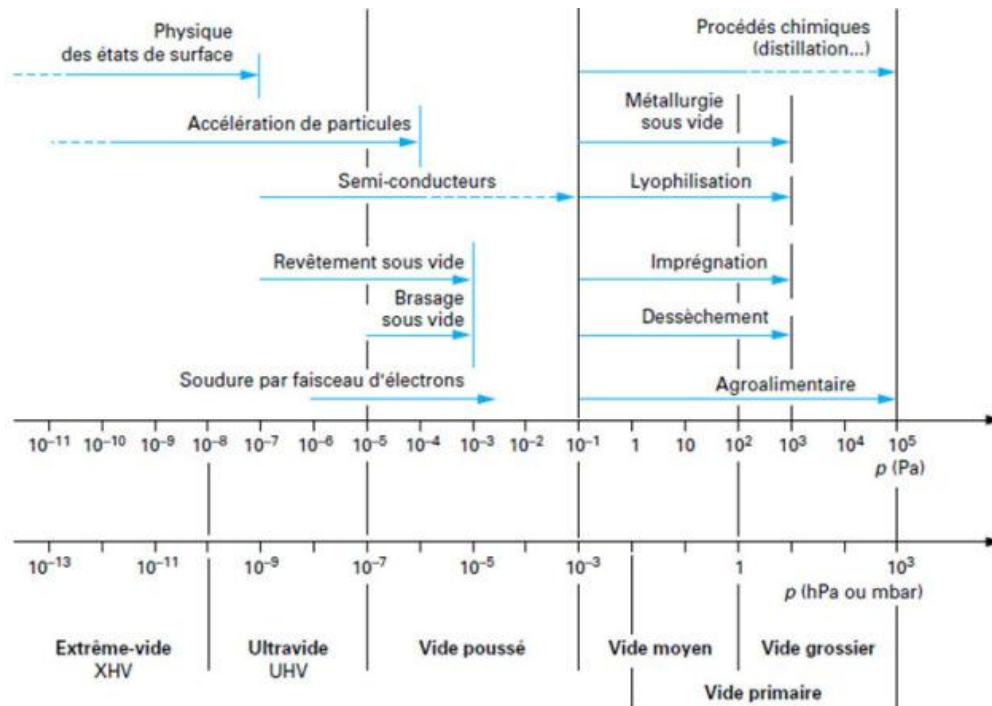
Le meilleur ultravide obtenu sur terre ( $10^{-14}$  mbar, soit  $10^{-17}$  atmosphère ou 270 molécules/ $cm^3$ ) est encore très supérieur au vide interstellaire (de l'ordre de  $10^{-16}$  mbar, soit environ 10 molécules/ $cm^3$ ) et au vide intergalactique (environ  $10^{-22}$  mbar ou  $10^{-25}$  atm).

En microscopie électronique, on retrouve cet écart, de la chambre objet d'un microscope à chambre environnementale (ou à pression contrôlée) au canon à émission de champ.

Classification des domaines de vide

## Les différents domaines du vide.

Source : Techniques de l'ingénieur

[http://gpip.cnam.fr/ressources-pedagogiques-ouvertes/hydraulique/co/3grain\\_vide.html](http://gpip.cnam.fr/ressources-pedagogiques-ouvertes/hydraulique/co/3grain_vide.html)**Vide grossier ou vide industriel** ( $10^5$  Pa à  $10^2$  Pa) :Débits volumiques de pompage très grands (plusieurs centaines de  $m^3$  par heure).

Applications : grosses installations, distillation sous vide, métallurgie, procédés chimiques.

**Vide primaire** (jusqu'à 1 Pa) :

Obtenu par la première pompe du système de pompage (pompe volumétrique).

Permet d'évacuer 99 % des gaz en volume voire plus.

**Vide moyen** ( $10^2$  Pa à  $10^{-2}$  Pa) :

Obtenu par pompe de type roots.

But : favoriser le fonctionnement de la pompe secondaire.

**Vide poussé** ( $10^{-1}$  Pa à  $10^{-5}$  Pa) ou vide secondaire :

Obtenu par pompe secondaire (pompe à diffusion ou turbomoléculaires).

L'état du gaz est raréfié (vide moléculaire).

**Ultravide** ( $10^{-5}$  Pa à  $10^{-8}$  Pa) :

Applications : fabrications de tubes électroniques, simulation spatiale, satellites.

**Extrême vide** (au-delà de  $10^{-8}$  Pa) :

Les problèmes de mesures et de validité commencent.

Applications : étude de la structure de la matière (accélérateurs de particules, etc.).

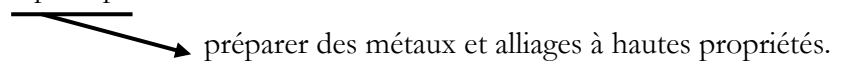
**Propriétés particulières du vide**

Les propriétés particulières du vide, ou plutôt des basses pressions, sont mises à profit dans des domaines très variés. Un grand nombre d'objets manufacturés, de matières premières dont ils émanent, font appel aux techniques du vide, que ce soit au cours des études de mise au point ou de leur élaboration.

La diminution de la pression permet de (d') :

- exercer des contraintes isostatiques
- diminuer les agressions chimiques
- modifier des propriétés superficielles
- accroître la vitesse d'élimination de certaines espèces
- transporter de la matière ou du rayonnement sans diffusion
- réaliser des isolations thermiques ou phoniques

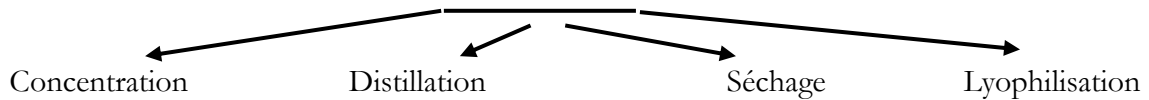
**L'industrie métallurgique** l'emploie pour :



**L'industrie mécanique** pour :



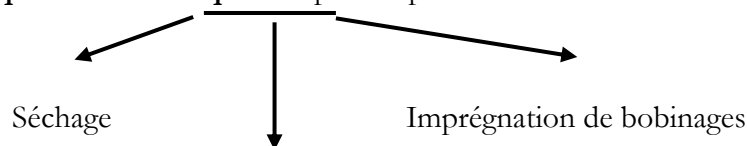
**En chimie et chimie fine**, on utilise la technique du vide pour les opérations de :



**En agroalimentaire**, pour la :



**Les industries électrique et électronique** l'emploient pour :



Fabrication des lampes d'éclairage, des tubes de télévision,  
de presque tous les composants électroniques.

### 3. Notions utiles

#### Les unités de pression utilisées

La pression est donc une force par unité de surface et s'exprime, dans le système légal, en pascal (Pa) et qui correspond à  $1 \text{ N.m}^{-2}$ . Cette unité, quoique légale, reste encore assez peu usitée (encore que son multiple, l'hectopascal ou hPa, soit devenu courant en météorologie) et on rencontre encore fréquemment d'autres unités dont les principales sont :

- le bar (et son sous multiple le millibar)
- le torr
- le millimètre de mercure (mmHg)
- l'atmosphère (atm)

Le mbar, le torr ou le mmHg sont du même ordre de grandeur, de même que le bar et l'atmosphère. Les conversions exactes entre ces unités sont données comme suit :

#### Unités de mesure de pression

Unité	Symbole unité	Correspond à	Pays/région
Pascal	Pa	1 bar = 100 000 Pa	-
Bar	bar	1 bar = 1 bar	Europe de l'ouest
Kilopascal	kPa	1 bar = 100 kPa	Australie
Megapascal	MPa	1 bar = 0,1 MPa	Chine
Pound per square inch (livre par pouce au carré)	psi	1 bar = 14,5 psi	Amérique du nord
Kilogramme par cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup> ou Kg(f)/cm <sup>2</sup>	1 bar = 1,02 kg/cm <sup>2</sup>	Inde, Corée
Inch of mercury column (pouce de colonne de mercure)	inHg	1 bar = 29,53 inHg	Amérique du nord

Auteur : Pierre Forestier, 28/08/2015

Source : <https://blog.wika.fr/savoir-faire/unites-mesure-de-pression/>

#### Conversion des unités de Pression

	Pascal ou [N/m <sup>2</sup> ]	Bar	mm Hg	Atm
Pascal ou [N/m <sup>2</sup> ]	1	$10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$9,87 \cdot 10^{-6}$
Bar	$10^5$	1	$7,5 \cdot 10^2$	$9,87 \cdot 10^{-1}$
mmHg = torr	$1,33 \cdot 10^2$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	1	$1,32 \cdot 10^{-3}$
Atm	$1,01 \cdot 10^5$	1,01	$7,6 \cdot 10^2$	1

Source :

<https://slideplayer.fr/slide/7545982/>

#### A retenir :

1 millibar = 1 hPa (= 100 Pa)

1 atm = 1013 millibars = 760 mmHg

1 torr = 1 mmHg





On parle de **cryogénie** pour désigner les procédés de réfrigération à très basse température et les distinguer des cycles de réfrigération ordinaires. Bon nombre de ces procédés concernent la liquéfaction des gaz dits permanents, comme l'air, le gaz naturel, l'hydrogène ou l'hélium. (Voir chapitre 2)

La **cryogénie** est donc le domaine de l'ingénierie qui s'intéresse aux systèmes fonctionnant à très basse température, ce qui pose des problèmes particuliers, notamment en termes de fluides et de matériaux. (Source : <https://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/cryogenie.html>)

La **cryogénie** tient d'ores et déjà une place prépondérante dans la recherche et l'industrie (aérospatiale, santé, informatique, agroalimentaire...).

Une sensibilisation aux techniques du vide les plus courantes devient donc nécessaire.

(E. Chappel & A. Böhm. Techniques du vide. Université Joseph Fourier 1999)

La **cryogénie industrielle** fait référence aux applications dans lesquelles des gaz liquides (comme l'azote, le dioxyde de carbone, l'hélium et l'hydrogène) sont utilisés comme réfrigérants pour :

- modifier les propriétés physiques des matériaux,
- maintenir une température donnée durant les différentes étapes d'un procédé.

Ces gaz liquides peuvent également être utilisés comme sources d'énergie pour alimenter diverses applications, telles que les véhicules à hydrogène (pile à combustible) ou la microélectronique.

(Source : <https://www.airliquide.com/fr/industrie/cryogenie-industrielle>)

## 4.2. Vide en cryogénie

### ➤ Super isolés sous vide

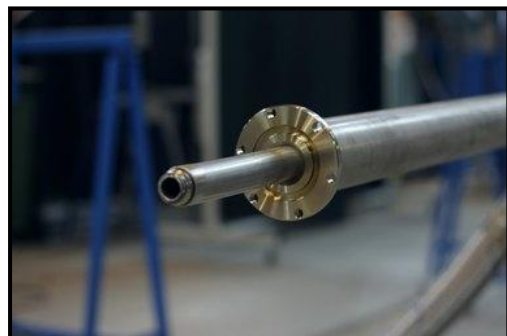
On entend souvent parler du vide en cryogénie. Il y est utilisé comme isolant thermique. En effet, l'utilisation de la cryogénie dans le secteur alimentaire, qui a pour but la congélation rapide de nombreux produits alimentaires, est couramment réalisée au moyen de tunnels de congélation dans lesquels circule un fort flux d'azote liquide et d'air. L'azote liquide stocké à l'extérieur des bâtiments alimentaires dans des réservoirs appelés super isolés sous vide est acheminé vers ces tunnels de congélation par des tuyauteries également super isolées sous vide.

### ➤ Lignes sous vide (Systèmes de canalisations pour fluides cryogéniques)

Afin d'optimiser le processus de transfert des fluides cryogéniques (Voir Chapitre 2), des lignes isolées sous vide sont proposées sur mesure. Elles sont rigides ou flexibles, pour l'azote, l'oxygène, l'argon et le CO<sub>2</sub> liquides.

Il s'agit de produits en acier inoxydable avec une isolation sous vide de haute qualité grâce à l'expertise des technologies du vide pour la cryogénie.

Parmi les champs d'application, il y a la cryobiologie (discipline scientifique qui étudie le comportement des êtres vivants à de basses températures).



**Lignes de vide super isolées**

(Source: <https://www.cryopal.com/lignes-vide-0>)

Les techniques du **vide** sont intimement liées au développement de la **cryogénie**.

La **cryogénie** :

- rassemble l'ensemble des techniques liées à la production, au stockage ou à l'utilisation des fluides cryogéniques (Voir chapitre 2). Un bon isolement de ces fluides va nécessiter un **vide très poussé**.
- va apporter un complément à la **technique du vide** : l'utilisation de cryopompes comme pompes primaires associées à des pompes ioniques ou l'utilisation de cryopompes à hélium liquide est de plus en plus fréquente.

(E. Chappel & A. Böhm. Techniques du vide. Université Joseph Fourier 1999)

## 5. Systèmes de production du vide

Trois exemples de systèmes de production du vide sont cités et étudiés ci-dessous.

Le premier exemple parle d'un système de vide dans le procédé de fabrication du savon, le deuxième présente un système de vide pour aider le processus de fabrication de batterie et il s'agit, dans le dernier exemple, d'une centrale de production de vide (CPV).

En examinant les trois exemples, on conclut rapidement que la pièce maîtresse d'un système de production du vide est la **pompe à vide**.

### Exemple 1: Un système de vide dans le procédé de fabrication du savon

La figure ci-dessous montre le processus de fabrication du savon. Le processus commence tout d'abord par l'envoi du savon du malaxeur à l'atomiseur par le biais d'une pompe volumétrique.

Une fois dans l'atomiseur le savon est séché par un **système de vide** composé d'une **pompe à vide** et d'un **thermo compresseur** qui en envoyant la vapeur par sa buse à haute pression crée une dépression dans la chambre de l'atomiseur.

Le savon ainsi séché passe par une boudineuse ou il sort sous forme de boudons par une filière ensuite le savon est découpé en morceau, moulé, emballé et enfin encartonné.

(Source : [https://www.memoireonline.com/01/17/9548/m\\_Activite-zero-panne-sur-ligne-de-production7.html](https://www.memoireonline.com/01/17/9548/m_Activite-zero-panne-sur-ligne-de-production7.html))

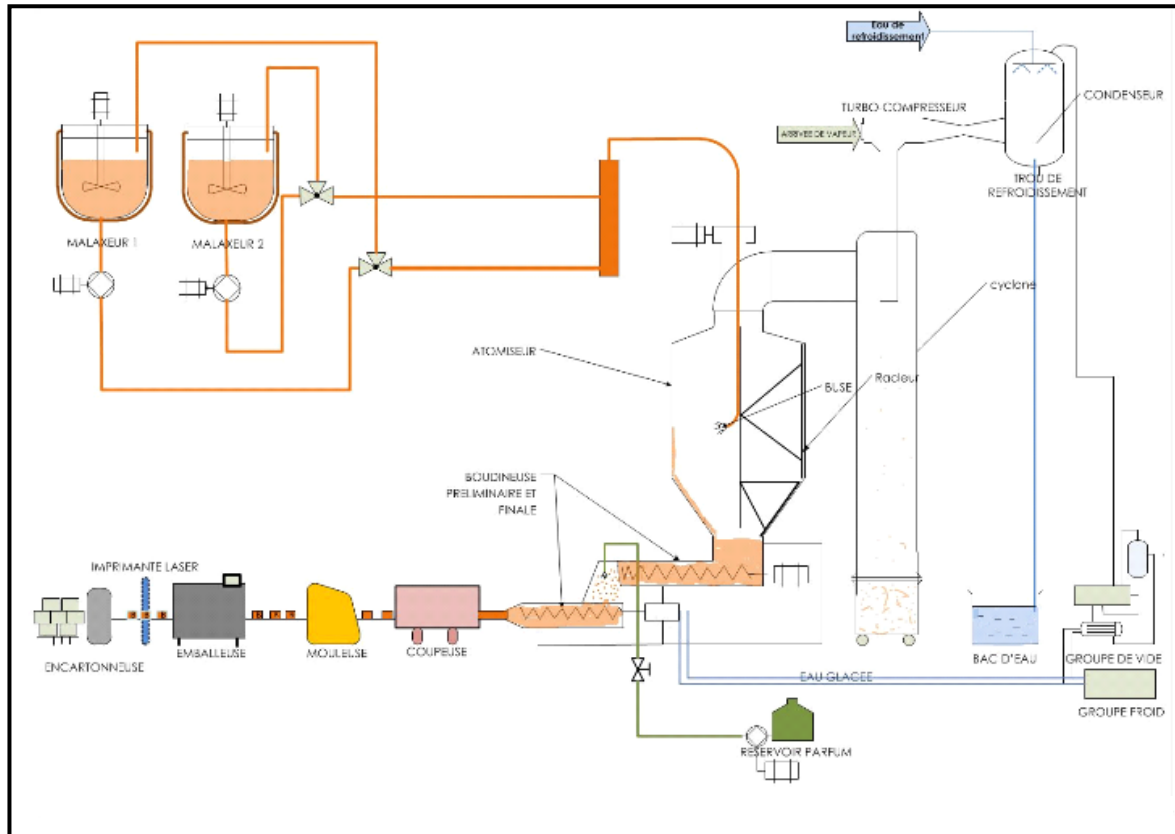


Schéma du processus de fabrication du savon

(Source : [https://www.memoireonline.com/01/17/9548/m\\_Activite-zero-panne-sur-ligne-de-production7.html](https://www.memoireonline.com/01/17/9548/m_Activite-zero-panne-sur-ligne-de-production7.html))

### Exemple 2 : Un système de vide pour aider le processus de fabrication de batterie

Afin d'améliorer la productivité et la qualité dans la fabrication de batteries de lithium-ion, plusieurs lignes de production sont équipées de **systèmes de vide**. Ces systèmes sont employés pour le séchage d'électrode. (Figure ci-dessous)

Chaque système combine une **pompe à vide à vis** avec un **ventilateur à piston rotatif**.

Dans la fabrication de cellules de batterie, la **technologie du vide** peut jouer un rôle dans plusieurs processus de fabrication.

Les systèmes peuvent :

- fournir l'environnement de production sec requis pour le séchage d'électrode.
- aider à l'assemblage des cellules et aux tests de détection des fuites.

Les exigences du vide pour la production de Li-batterie incluent :

- la production d'anodes,
- l'élimination des solvants et de l'humidité lors du remplissage,
- dégazage sous vide et étanchéité des unités,
- chargement de la batterie.



(Dr. Martin Füllenbach. Irex Way, Burgettstown, PA 15021, USA  
<https://trends.directindustry.fr/project-111203.html>)

**Exemple 3 : Centrale de production de vide (CPV)**

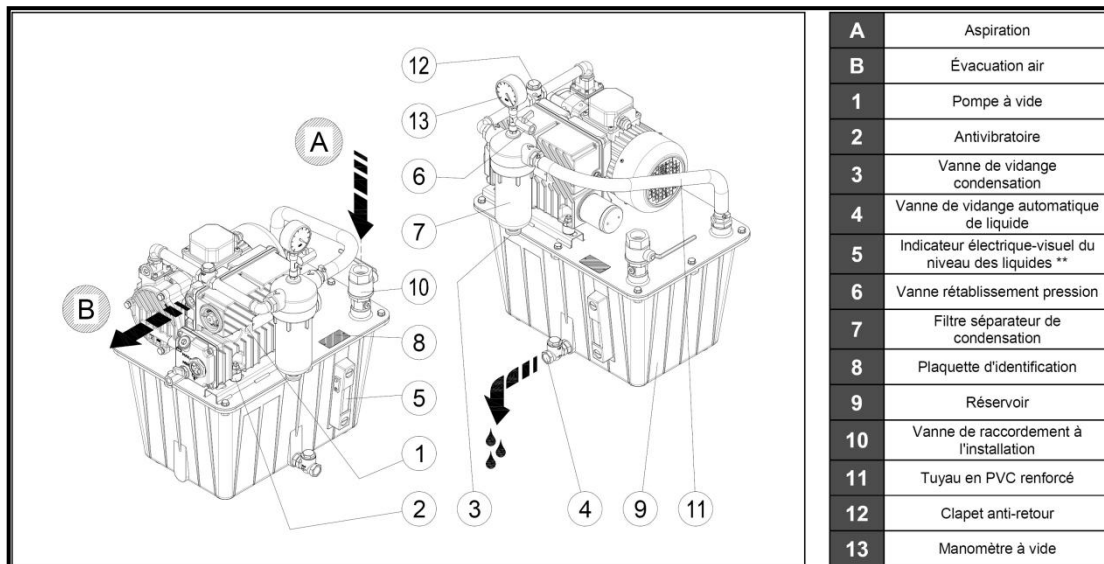
La figure ci-contre est une centrale de production du vide (CPV).

La CPV est constituée par une **pompe à vide à palettes à recirculation d'huile** située sur un **réservoir**, réalisé en aluminium, muni d'une structure spéciale de protection de la pompe. Sur le réservoir sont montés une **vanne** à boisseau sphérique reliée à un **vacuomètre** à glycérine, qui indique le niveau de pression à l'intérieur du réservoir, et un **filtre** pour protéger la pompe contre l'aspiration de toutes les impuretés présentes dans l'installation. La pompe est déjà pourvue d'un **clapet anti-retour**, elle est reliée au réservoir par un **tuyau flexible**.



(Source: <https://www.allforvacuum.com/219-centrale-de-production-de-vide>)

La figure ci-dessous décrivant la CPV\_Débit 25 m<sup>3</sup>/h - Vide 5 mbar (abs) est suivie par le tableau des caractéristiques techniques :



(Source : <https://www.allforvacuum.com/img/cms/plan%20descriptif%20cpv25-25%281%29.jpg>)

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES		CPV 25/25	
		50 Hz	60 Hz
Débit	m <sup>3</sup> /h	25	29
Pression finale (Abs.)	mbar - hPa	5	
Puissance moteur	kW (1~ / 3~)	0,75 / 0,75	0,90 / 0,90
Nombre de tours nominaux	n/min	1400	1700
Niveau de pression sonore (UNI EN ISO 2151) (K 3dB)	dB(A)	56	58
Capacité du réservoir	dm <sup>3</sup>	25	
Poids	kg (1~ / 3~)	56 / 55	
Type huile	cod. DVP	SW60	
Ø Raccord conduite	"G	1	
Vidange pompe	"G	1/2	
Température de fonctionnement (temp. ambiante 20°C)	°C	80 ÷ 85	85 ÷ 90
Température ambiante de travail exigée	°C	12 ÷ 40	
Température de stockage/transport	°C	-20 ÷ 50	
Humidité / altitude MAX		80% / 1000m au-dessus du niveau de la mer *	

(\*) En cas de conditions ambiantes différentes de celles prescrites, contacter le Constructeur.

(Source: <https://www.allforvacuum.com/img/cms/descriptif%20cpv25-25.jpg>)

La **centrale de production de vide** avec **séparateur air-liquide** CPV25/25 est constituée d'une **pompe à vide** à palettes à recirculation d'huile (type LC 25 WR) de 25 m<sup>3</sup>/h située sur un **réservoir** de 25 L.

Une **vanne à boisseau** sphérique à l'entrée du réservoir permet d'isoler ce dernier de l'installation.

A l'intérieur du **réservoir de récupération des liquides**, réalisé en aluminium, se produit la première séparation air / liquide par l'intermédiaire d'un **dispositif interne à cyclone**. Ce réservoir est équipé d'un **indicateur de niveau à flotteur** (contrôle visuel de la quantité de liquide contenu), muni d'un **capteur électrique** indiquant que le réservoir est plein et d'une **vanne automatique d'évacuation du liquide récupéré**.

Ensuite, l'air présent dans le réservoir, sans gouttes de liquide mais encore humide, passe à travers le **filtre séparateur de condensation** sur lequel sont montés un **indicateur de vide** et une **vanne pour le rétablissement de la pression atmosphérique** à l'intérieur du filtre et du réservoir (nécessaire pour l'évacuation de l'eau récupérée).

Le filtre séparateur est raccordé à la pompe par l'intermédiaire d'une conduite rigide à laquelle est intégré un **clapet anti-retour**.