

# JOURNÉE ÉNERGIE 2018

## PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

Patrice Van der Linden

20 Novembre 2018

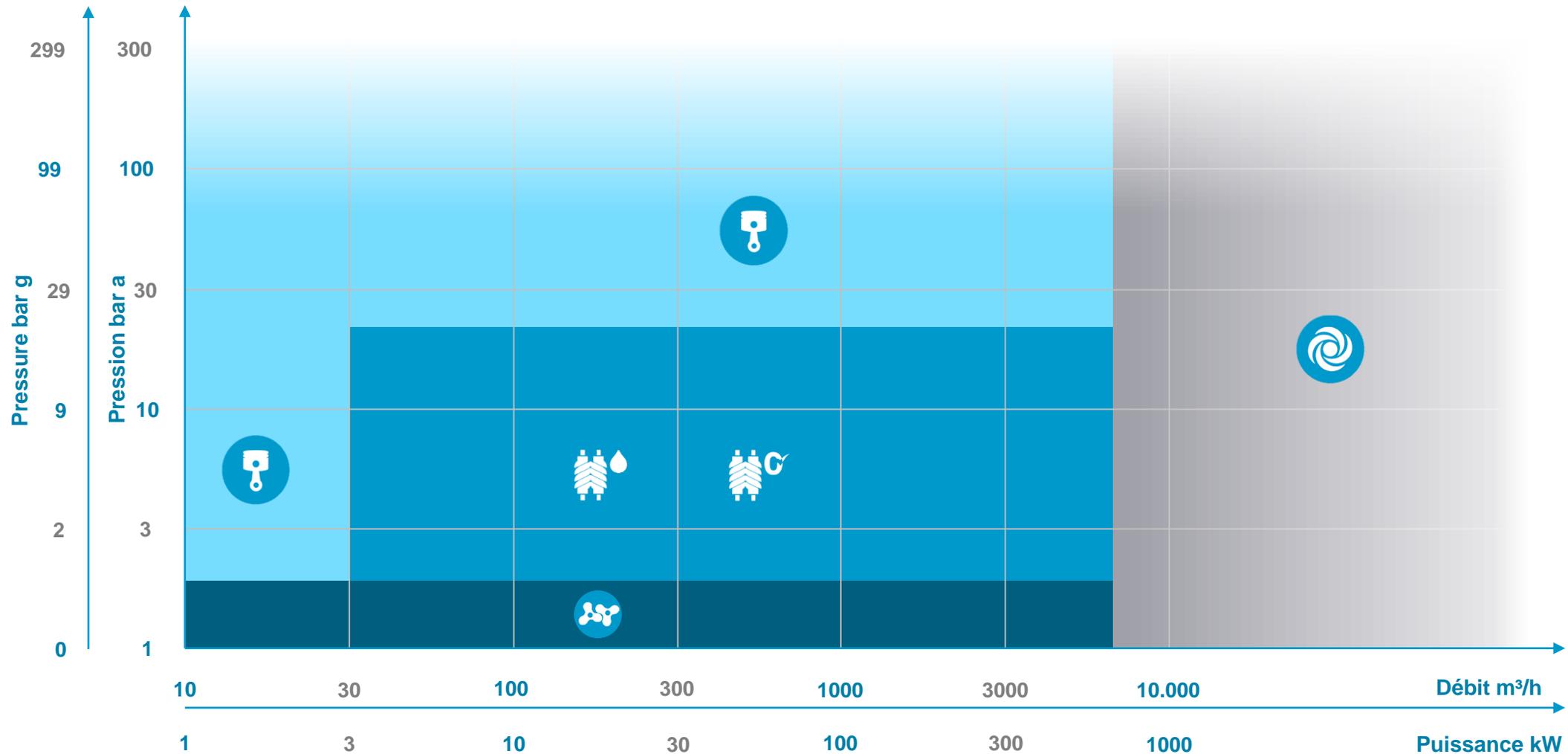


# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

- **Compresseurs à vis dans l'industrie**
- **3 types d'éléments de compression à vis**
- **2 mots de thermodynamique**
  - Loi des gaz parfaits
  - Diagramme PV et transformations
- **Améliorer l'efficacité de l'éléments de compression à vis**
  - Compression à injection liquide
  - Compression multi-étagée

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## COMPRESSEURS À VIS DANS L'INDUSTRIE



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## 3 TYPES DE COMPRESSEURS À VIS

Injection d'huile



Injection d'eau



Oil Free

Exempt d'huile

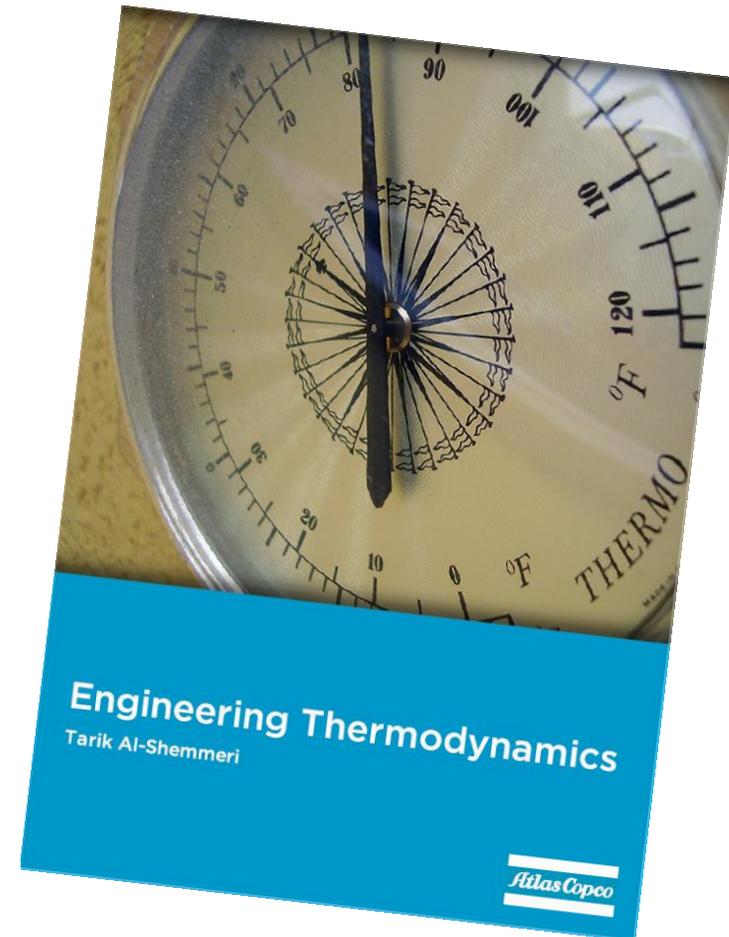


Oil Free

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## 2 MOTS DE THERMODYNAMIQUE

- Loi des gaz parfaits
- Diagramme PV et transformations des gaz parfaits



# AIR COMPRIMÉ – TECHNOLOGIE

## 2 MOTS DE THERMODYNAMIQUE

- Loi des gaz parfaits

$$p V = n R T$$

- $p$  : pression (Pa ou  $N/m^2$ )
- $V$  : volume ( $m^3$ )
- $R$  : constante des gaz parfaits ( $J / mol K$ )
- $T$  : température (K)
- $n$  : nombre de moles de gaz

$$N/m^2 \times m^3 = mol \times J / mol K \times K$$

$$N \times m = J$$

$$J = J \checkmark$$

*Equivalence énergétique*

***Pression  $\neq$  Energie !***

Analogie

$$L = I . \Omega$$

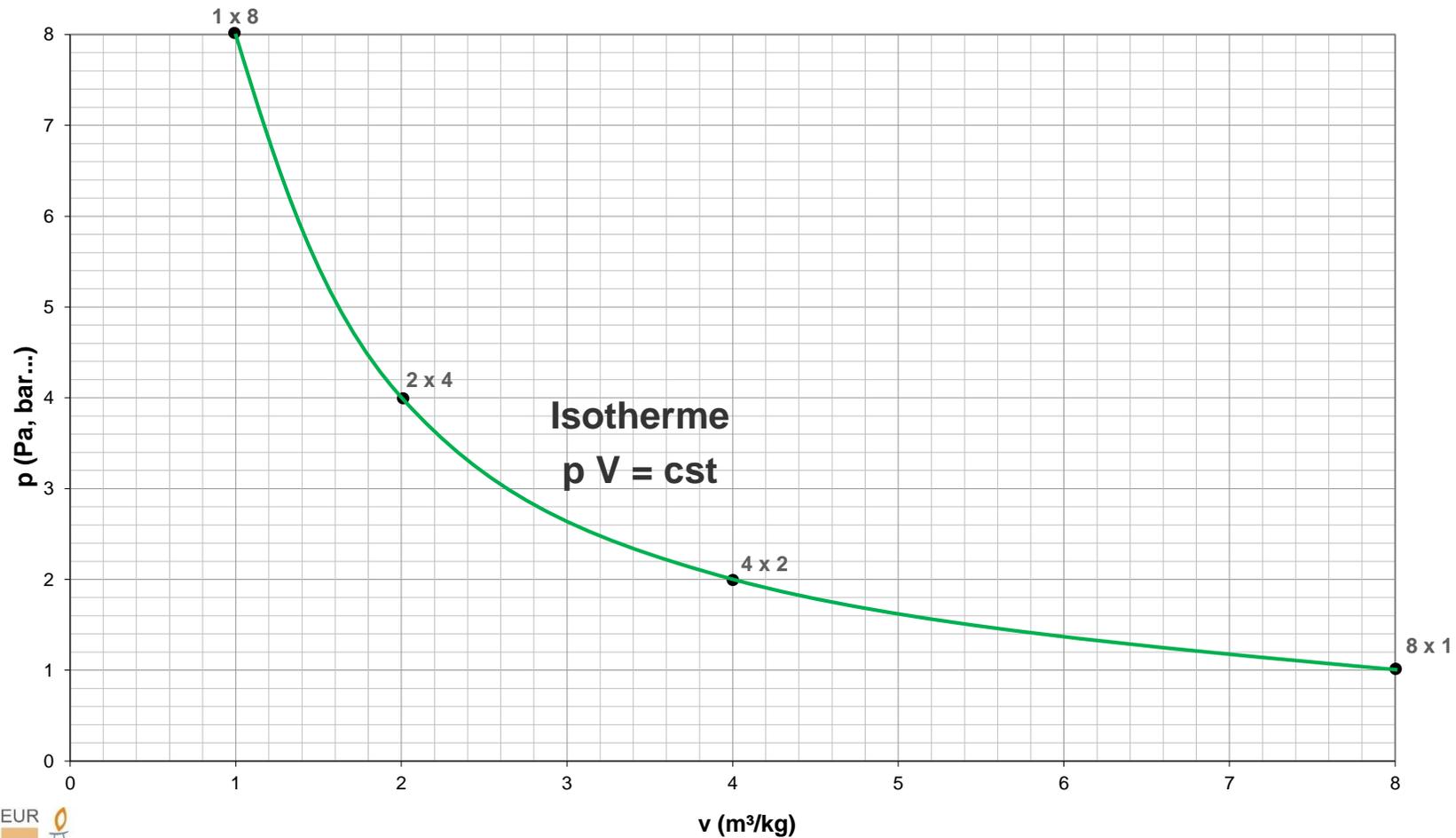
- $L$  : Moment cinétique
- $I$  : Moment d'inertie
- $\Omega$  : Vitesse angulaire



# AIR COMPRIMÉ – TECHNOLOGIE

## 2 MOTS DE THERMODYNAMIQUE

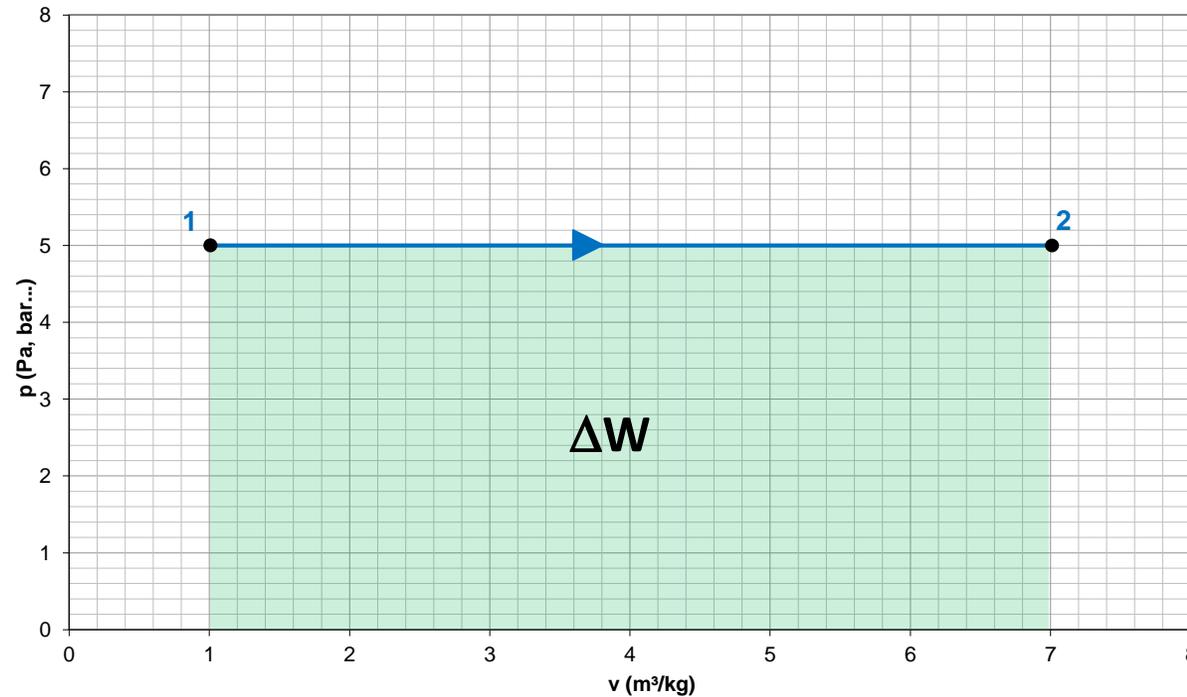
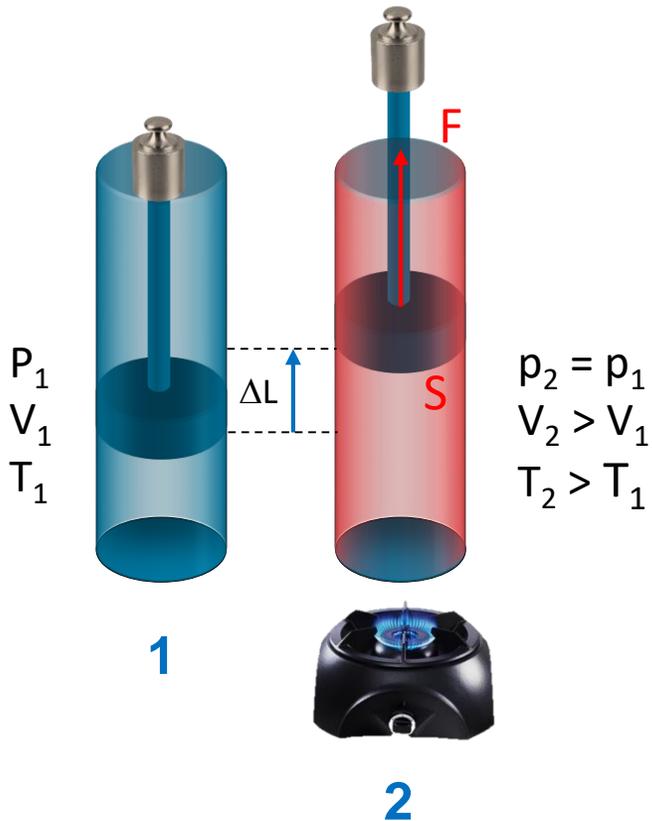
- Diagramme PV



# AIR COMPRIMÉ – TECHNOLOGIE

## 2 MOTS DE THERMODYNAMIQUE

- Transformations des gaz parfaits - Transformation **ISOBARE**

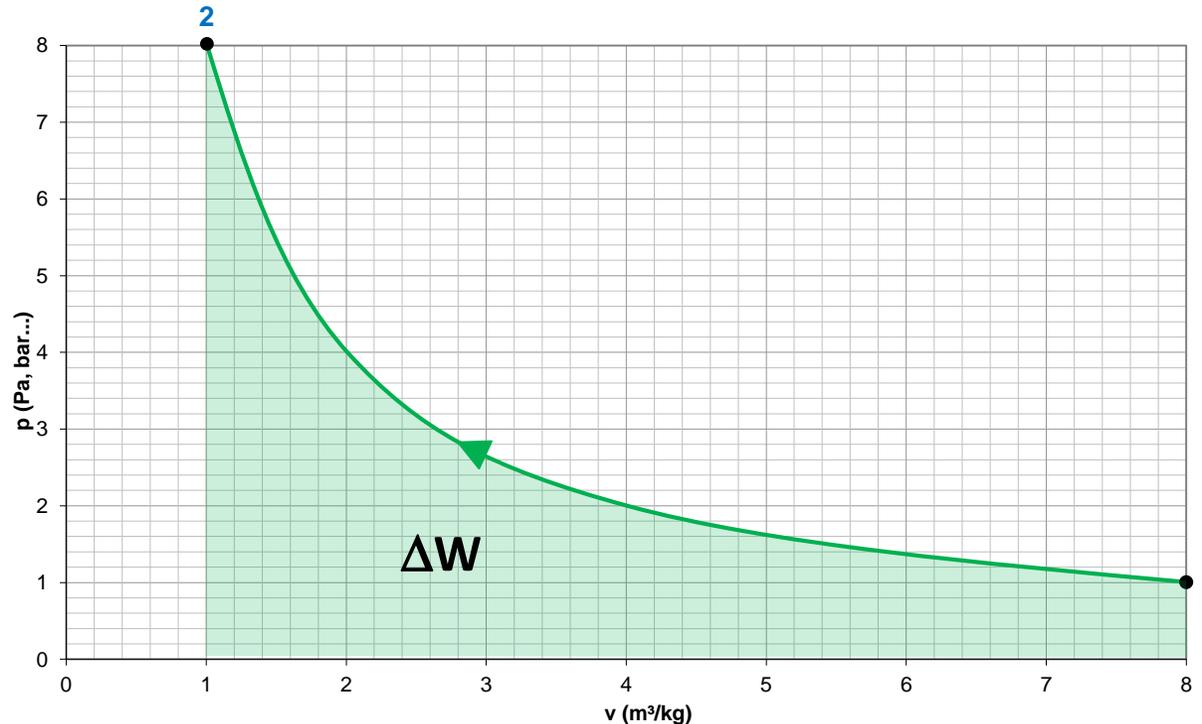
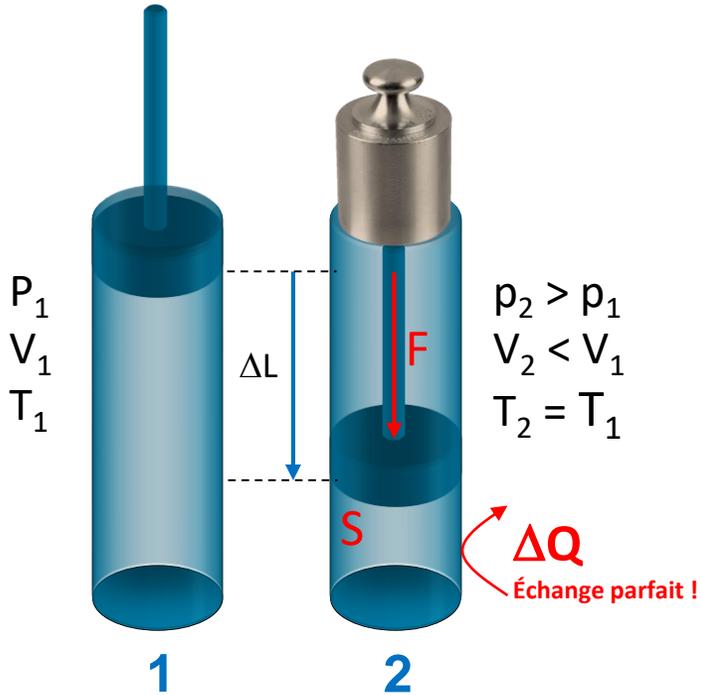


$$\begin{aligned}\Delta W &= F \Delta L \\ &= p S \Delta L \\ &= p \Delta V\end{aligned}$$

# AIR COMPRIMÉ – TECHNOLOGIE

## 2 MOTS DE THERMODYNAMIQUE

- Transformations des gaz parfaits - Transformation **ISOTHERME**



$$\Delta W = m R T \ln \frac{p_1}{p_2}$$

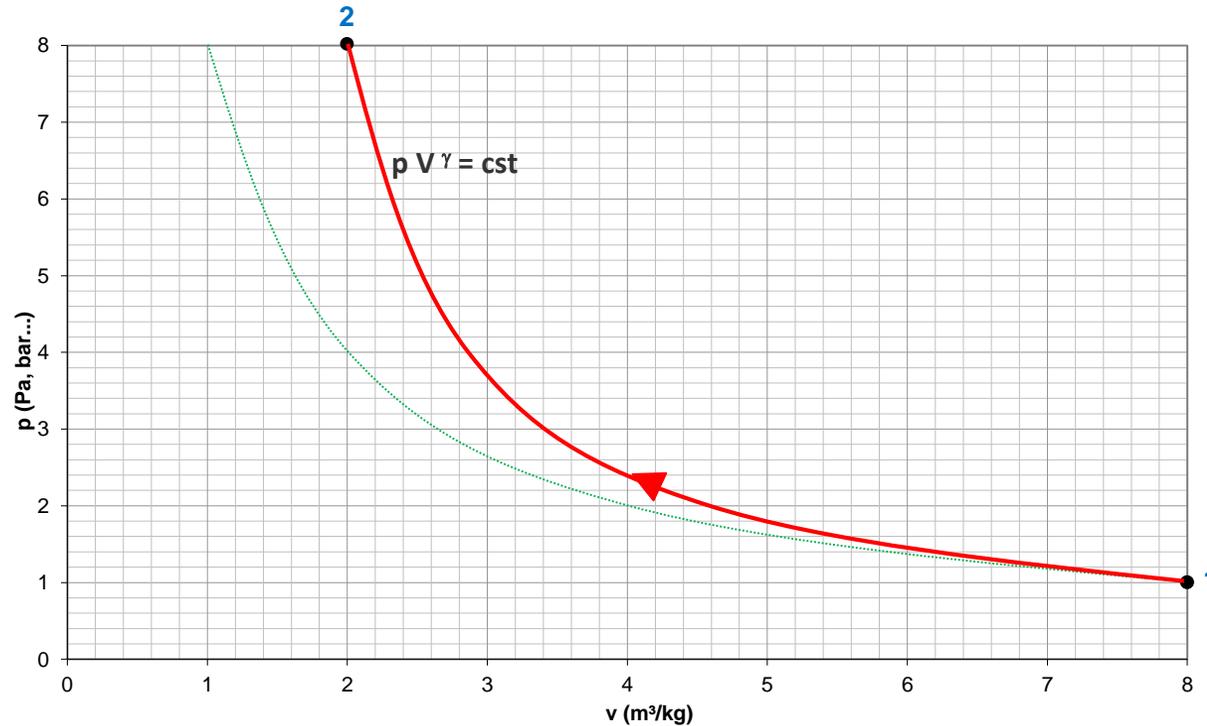
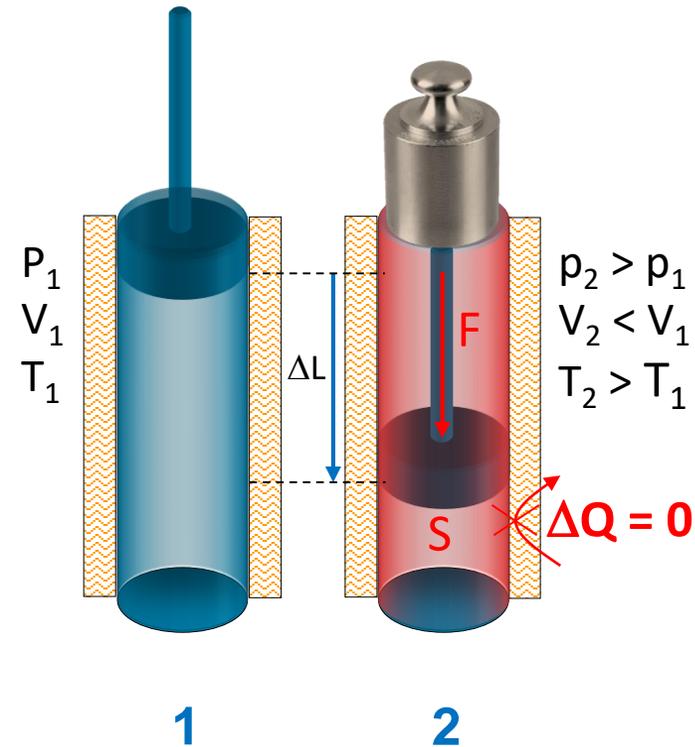
**Tout le travail  
a été évacué sous  
forme de chaleur**

La compression **ISOTHERME** est la  
compression idéale du point de vue énergétique

# AIR COMPRIMÉ – TECHNOLOGIE

## 2 MOTS DE THERMODYNAMIQUE

- Transformations des gaz parfaits - Transformation **ADIABATIQUE** ou **ISENTROPIQUE**



$$\Delta W = \Delta Q - \Delta U$$

$$= m c_v (T_1 - T_2)$$

**Tout le travail  
 a été converti  
 en augmentation  
 d'énergie interne  
 (température)**

Température en fin de compression

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}$$

avec  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  (1,4 pour l'air)

$T_1 = 293 \text{ K (20°C)}$

$p_1 = 1 \text{ bara}$

$P_2 = 8 \text{ bara}$

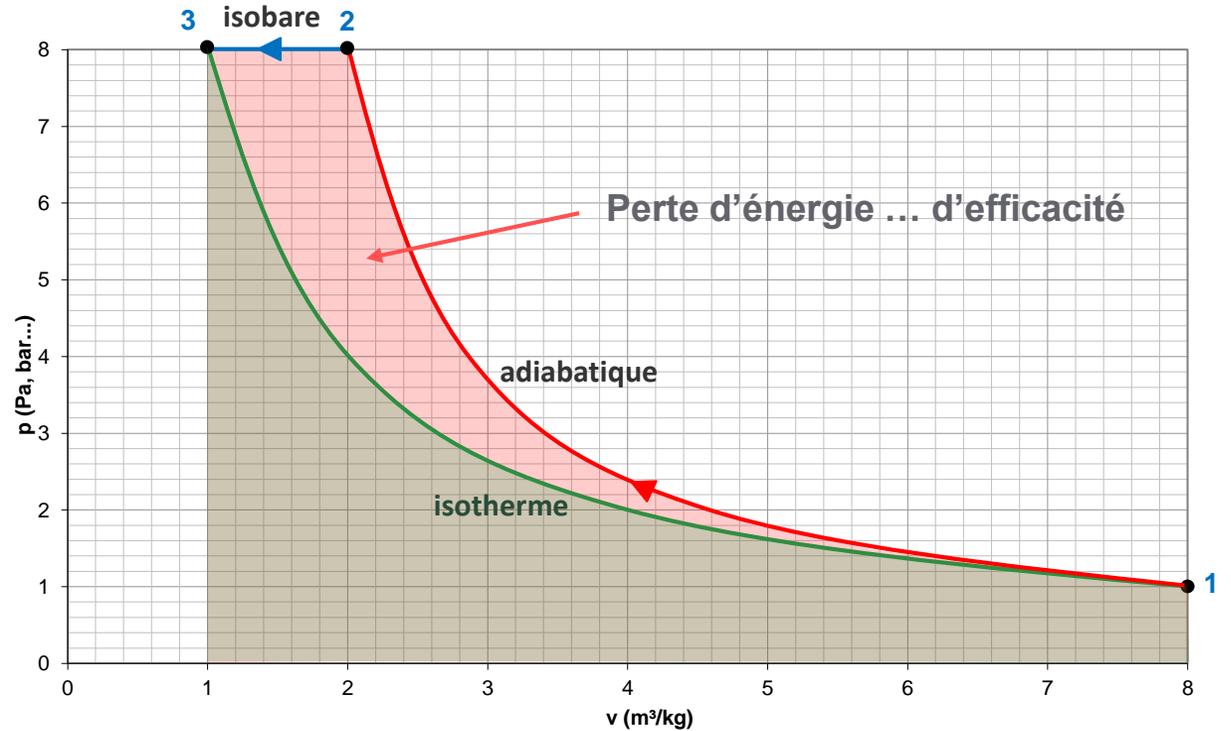
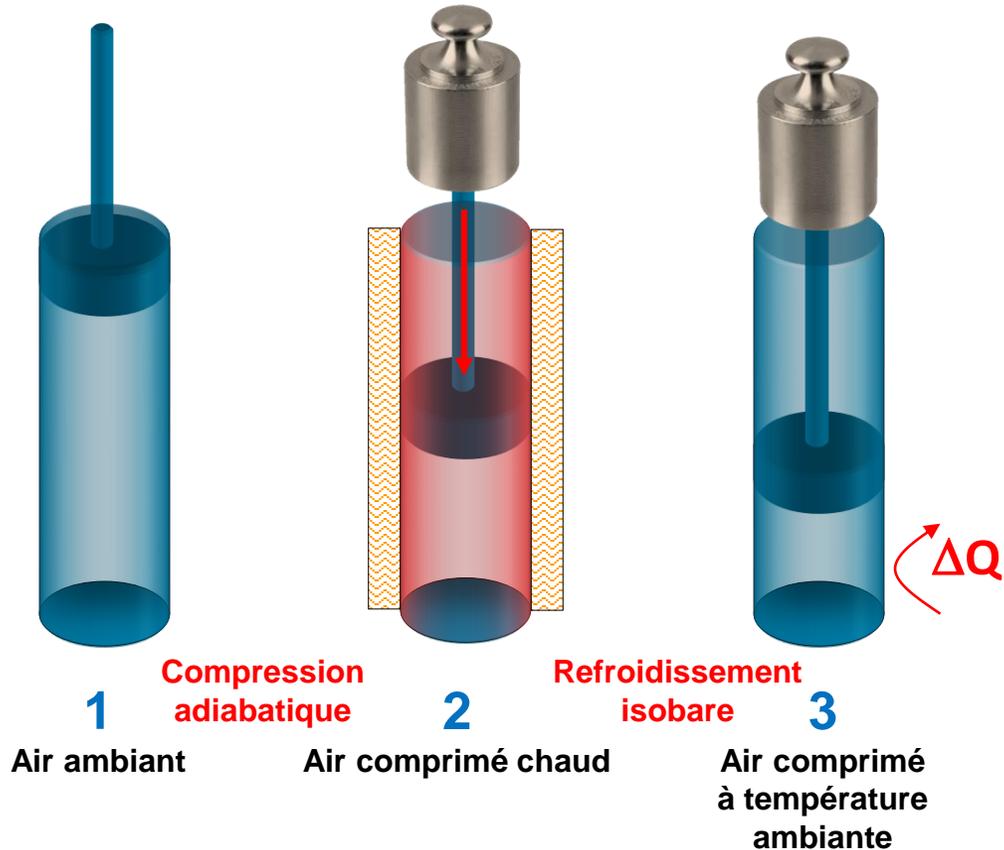
$\gamma = 1,4$

$T_2 = 531 \text{ K (258°C)}$

# AIR COMPRIMÉ – TECHNOLOGIE

## 2 MOTS DE THERMODYNAMIQUE

- Compression adiabatique avec refroidissement final isobare



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

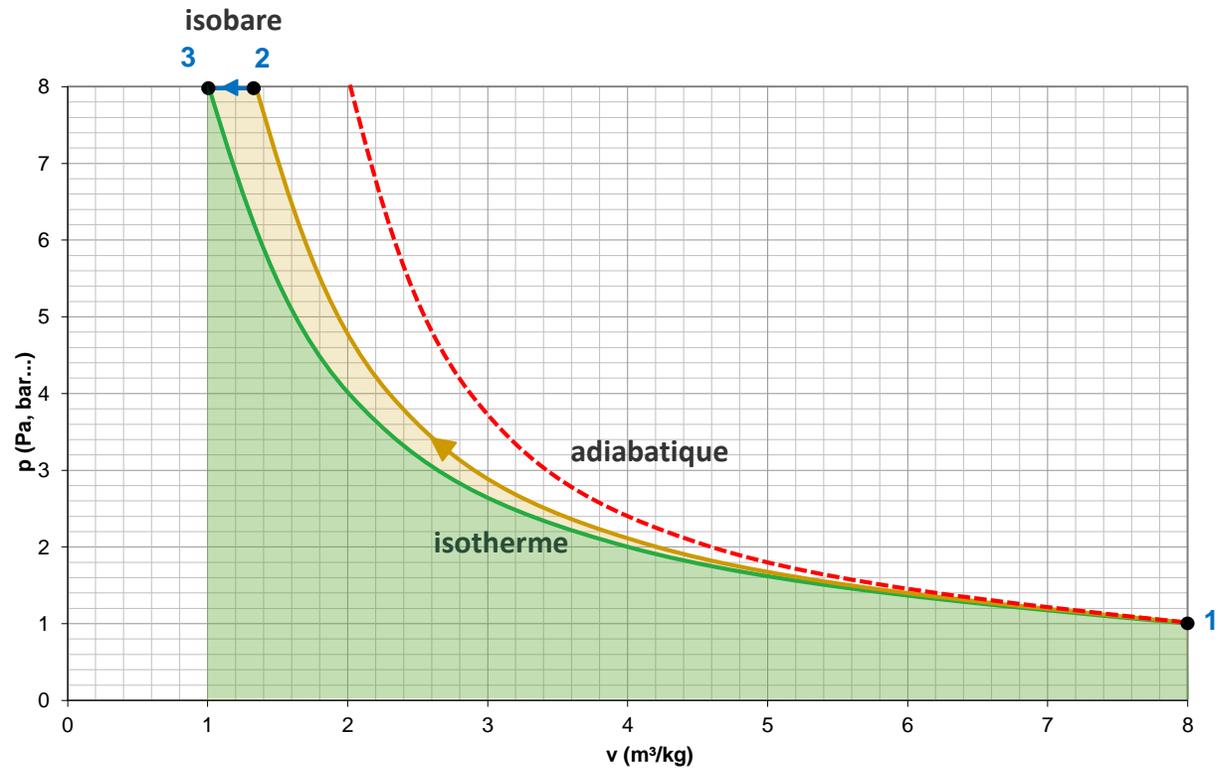
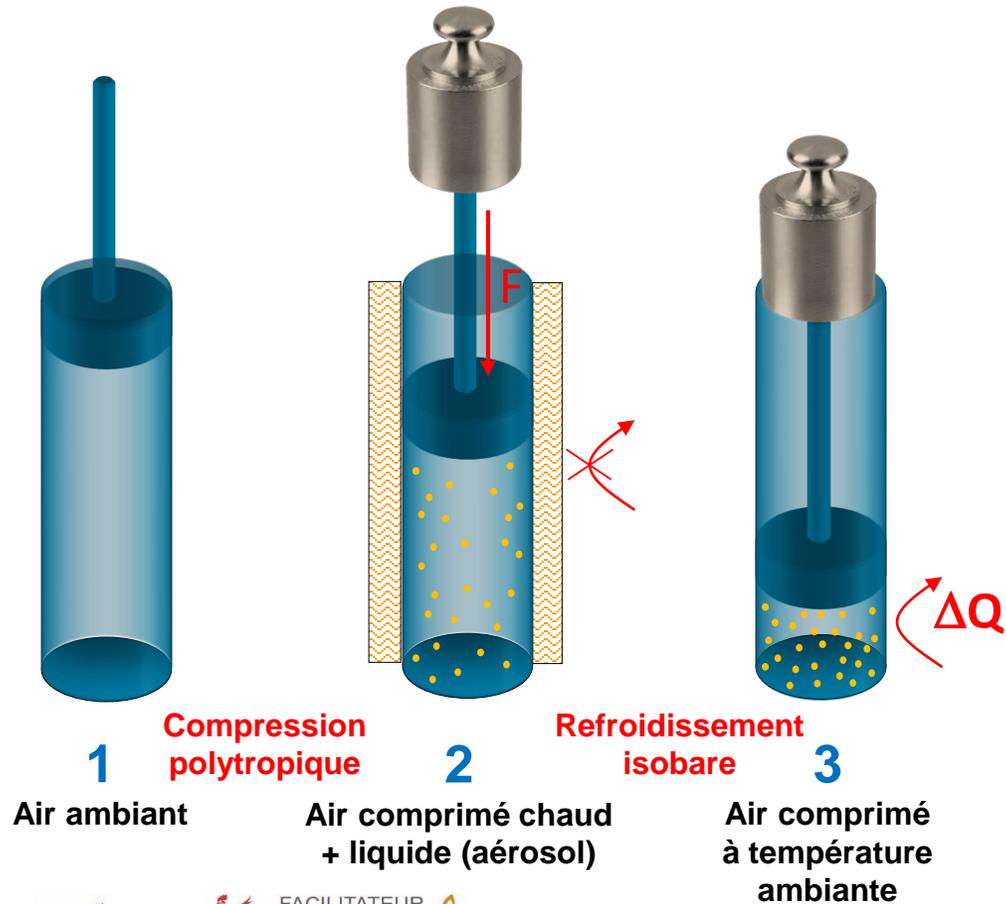
## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- **Compression à injection liquide**
  - Compresseur à vis lubrifiées (injection d'huile)
  - Compresseur à injection d'eau
- **Compression multi-étagée**
  - Compresseur exempt d'huile bi-étagé

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compression à injection liquide avec refroidissement final isobare - Principe



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compression à injection liquide avec refroidissement final isobare - Principe

Quelle quantité de liquide ?

Température en fin de compression

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \text{avec } \gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (1,4 \text{ pour l'air})$$

$$\begin{aligned} T_1 &= 20^\circ\text{C} \\ p_1 &= 1 \text{ bara} \\ p_2 &= 8 \text{ bara} \\ \gamma &= 1,4 \end{aligned} \quad T_2 = 258^\circ\text{C}$$

Soit 1 m<sup>3</sup> d'air à 20°C ( 1,2 kg ) à comprimer à 7 bar(e)

Compression adiabatique, température finale = 258 °C

$$\Delta Q = m c_p D_t = 1,2 \text{ kg} \times 1,005 \text{ kJ/kg K} \times (258 - 20) \text{ K} = 287,0 \text{ kJ}$$

Si je veux limiter à 100°C

$$\Delta Q = 1,2 \text{ kg} \times 1,005 \text{ kJ/kg K} \times (100 - 20) \text{ K} = 96,5 \text{ kJ}$$

Le liquide doit donc absorber

$$287,0 \text{ kJ} - 96,5 \text{ kJ} = 190,5 \text{ kJ}$$

Si liquide = huile

$$\Delta Q = 190,5 \text{ kJ} = M \text{ kg} \times 2,0 \text{ kJ/kg K} \times (100 - 20) \text{ K}$$

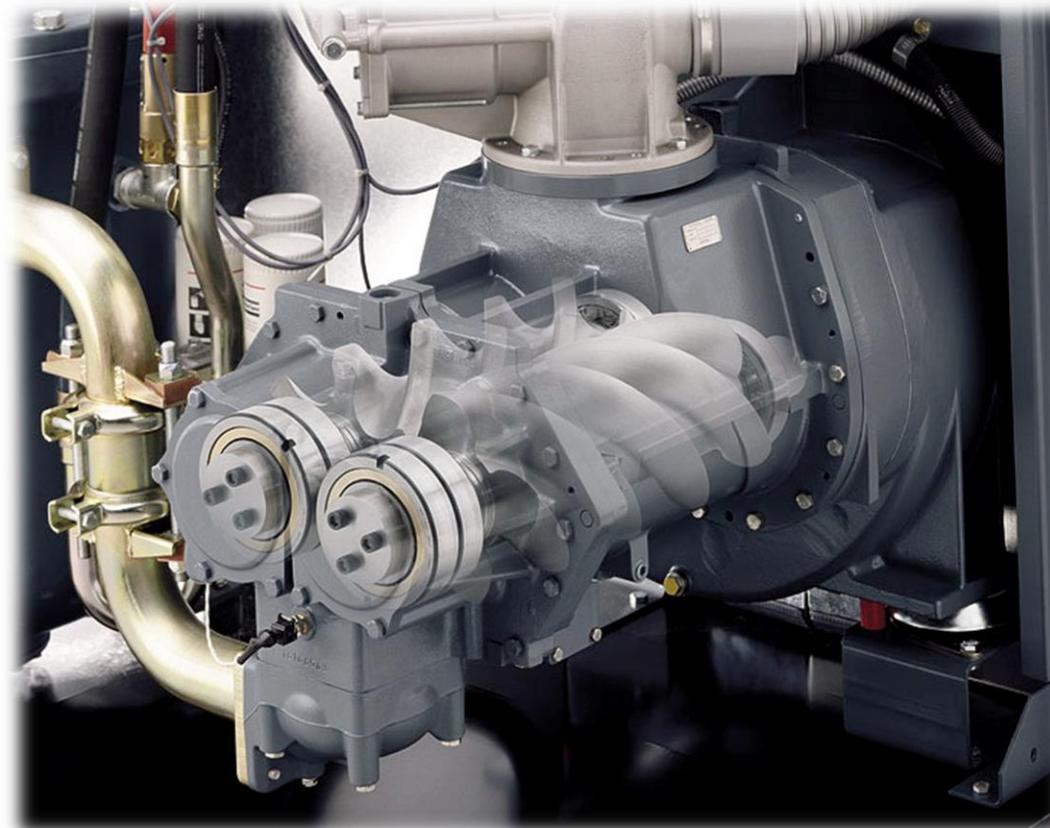
$$M = 1,2 \text{ kg} \rightarrow \mathbf{50 \% \text{ en masse}}$$

$$V = 1,2 \text{ kg} / 875 \text{ kg/m}^3 = 0,0014 \text{ m}^3 \rightarrow \mathbf{0,14 \% \text{ en volume}}$$

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

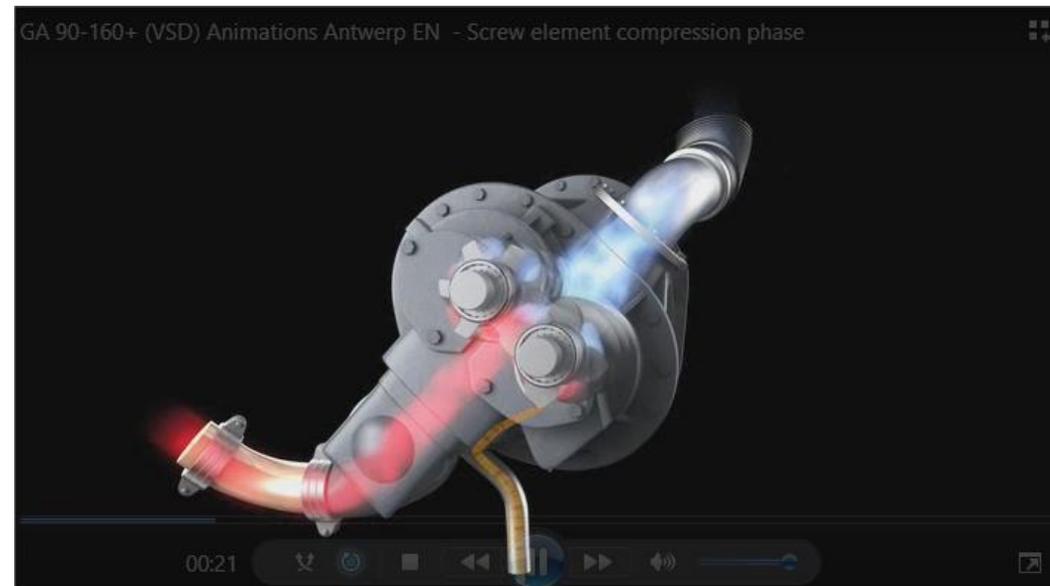
- Compresseur à vis lubrifiée (injection d'huile) – Élément de compression



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compresseur à vis lubrifiée (injection d'huile) – Élément de compression – Animation



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

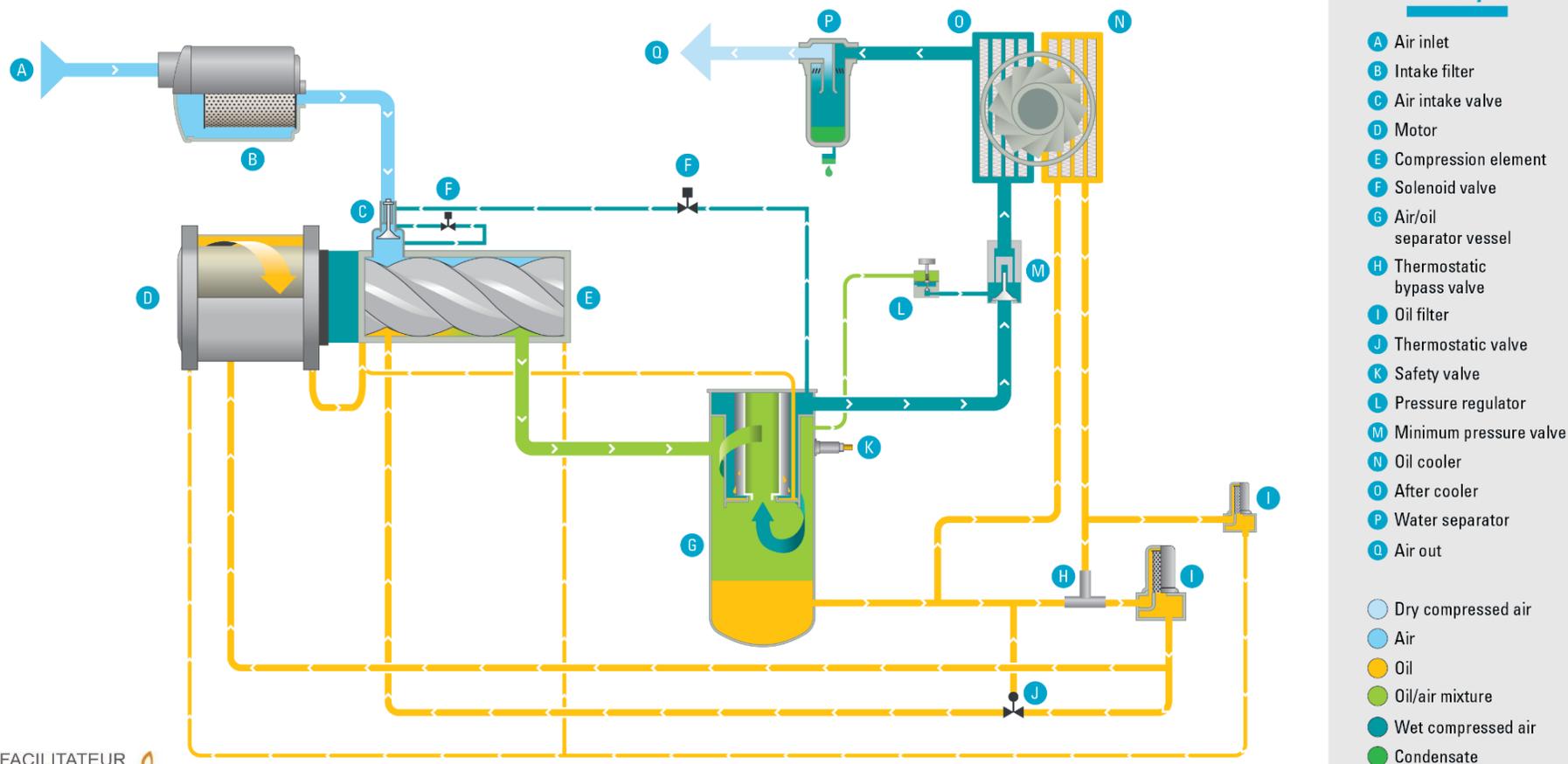
- Compresseur à vis lubrifiée (injection d'huile) – Unité complète



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

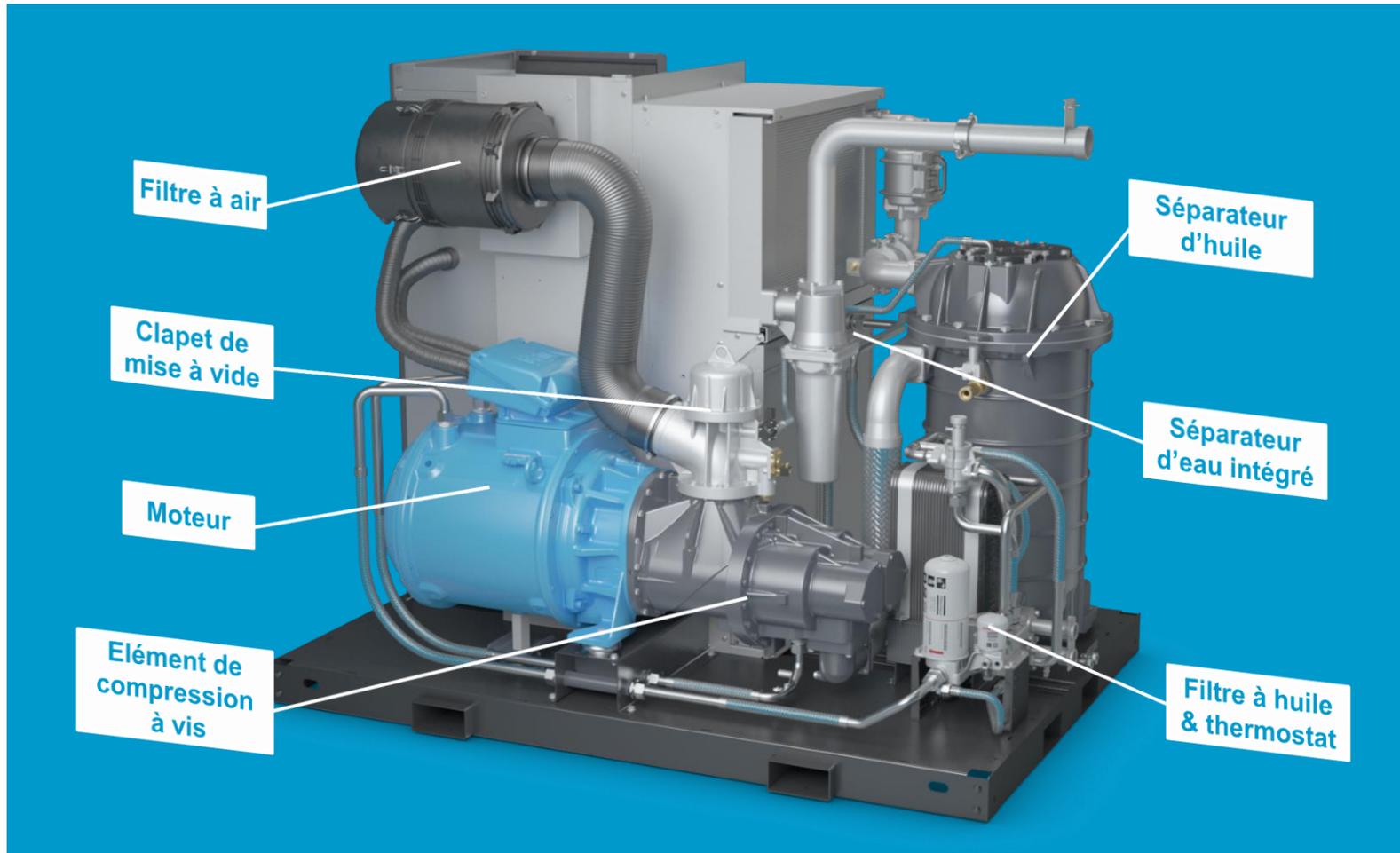
- Compresseur à vis lubrifiée (injection d'huile) – Flow diagram



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compresseur à vis lubrifiée (injection d'huile) – Composants internes



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

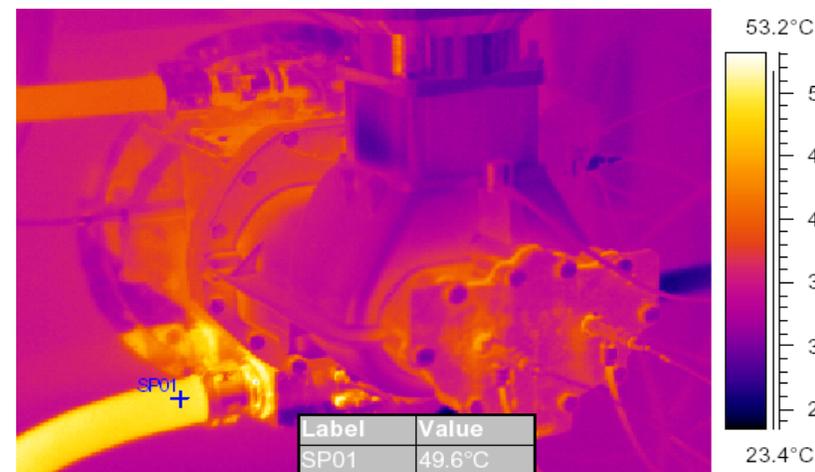
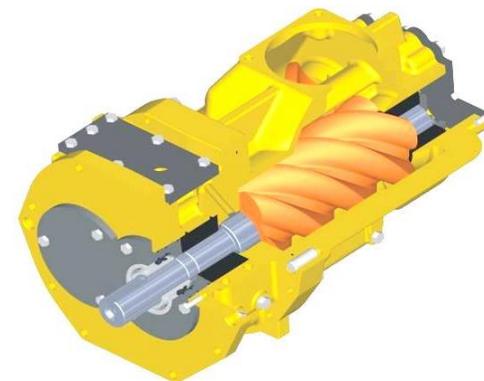
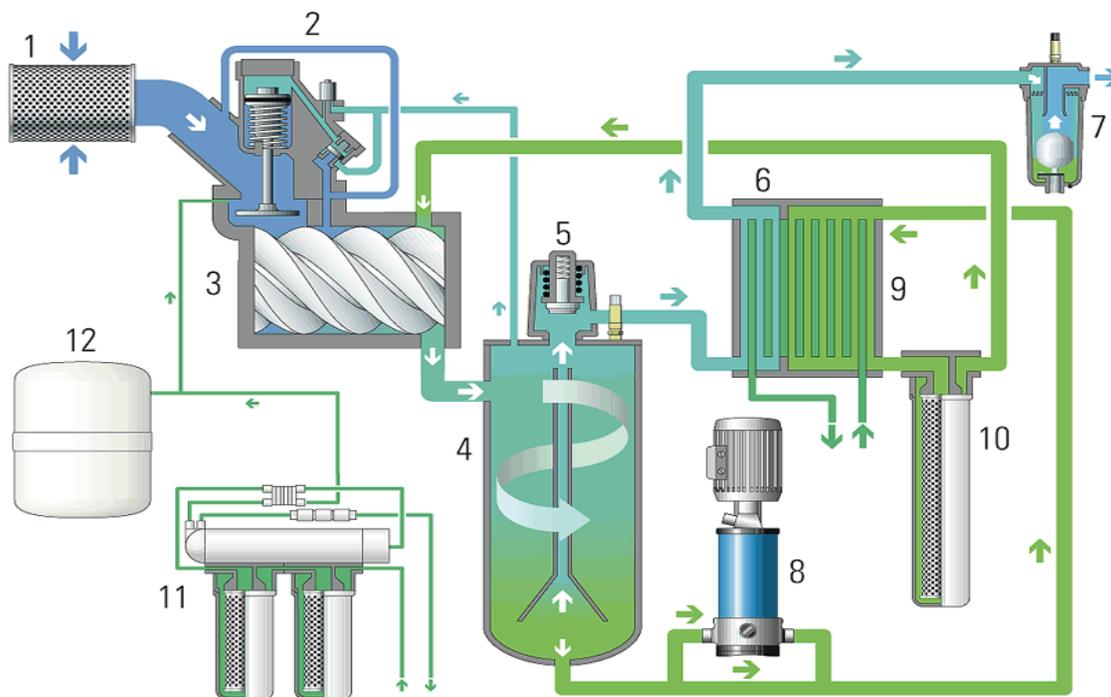
- Compresseur à vis lubrifiée (injection d'huile) – Composants internes



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

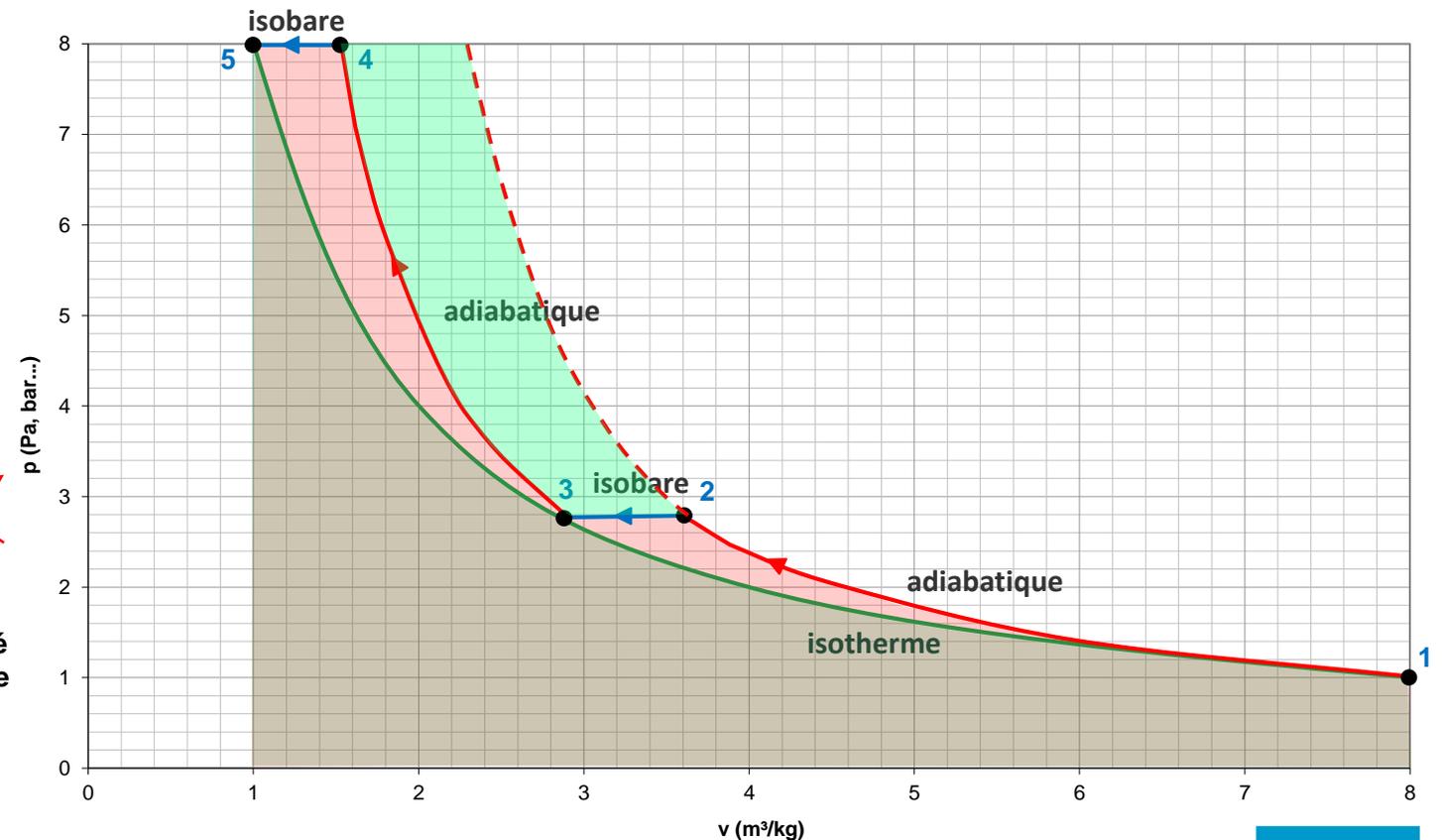
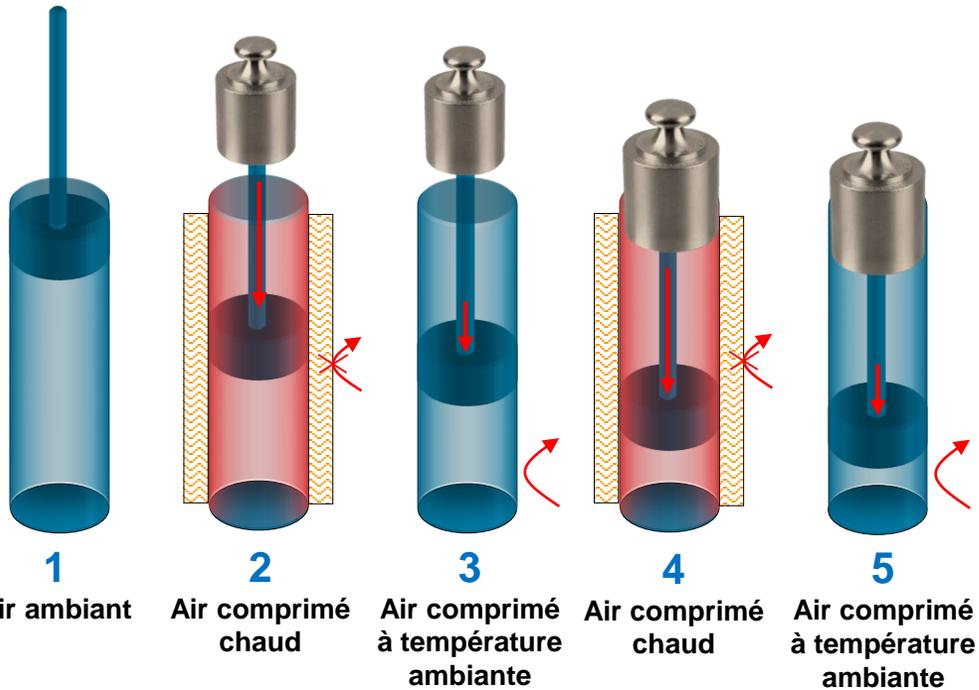
- Compresseur à injection d'eau



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

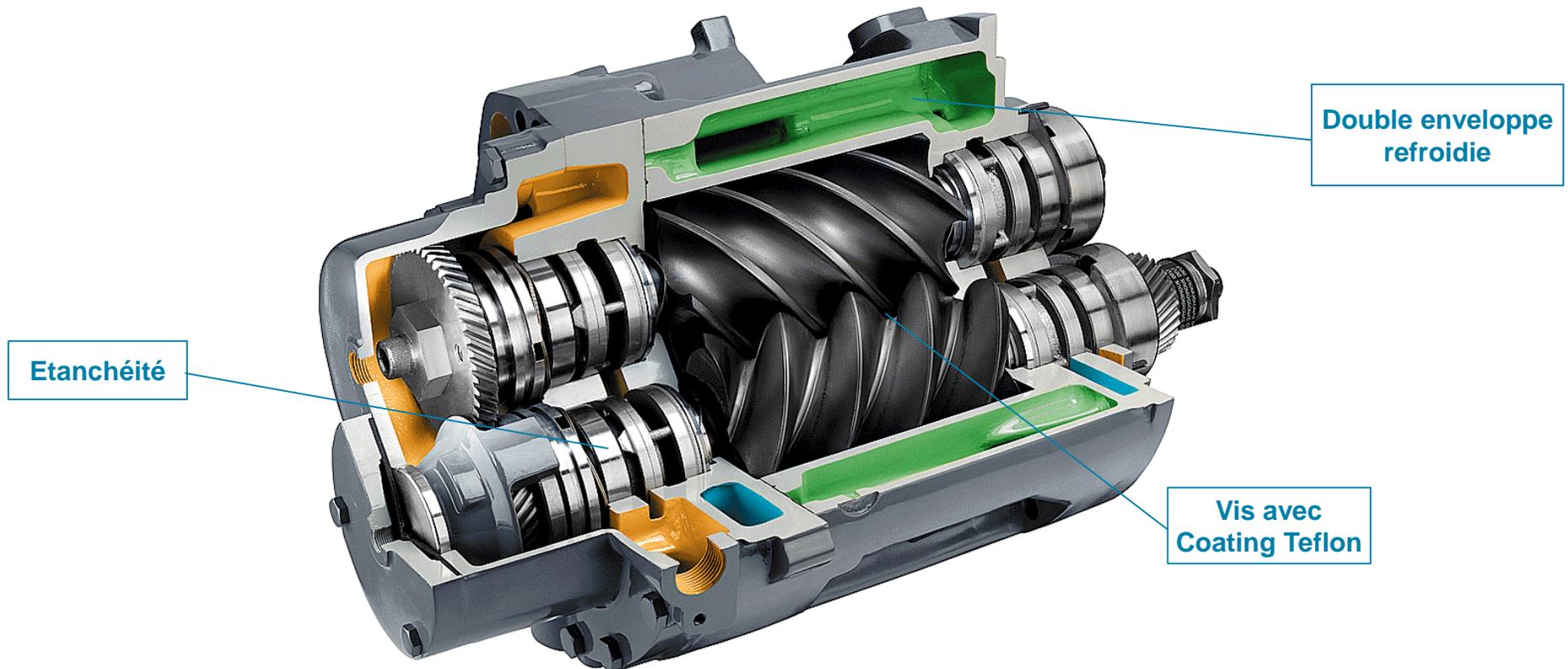
- Compression multi-étagée avec refroidissement intermédiaire – Principe



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compresseur à vis exempt d'huile – élément de compression



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compresseur à vis exempt d'huile – élément de compression – Animation



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

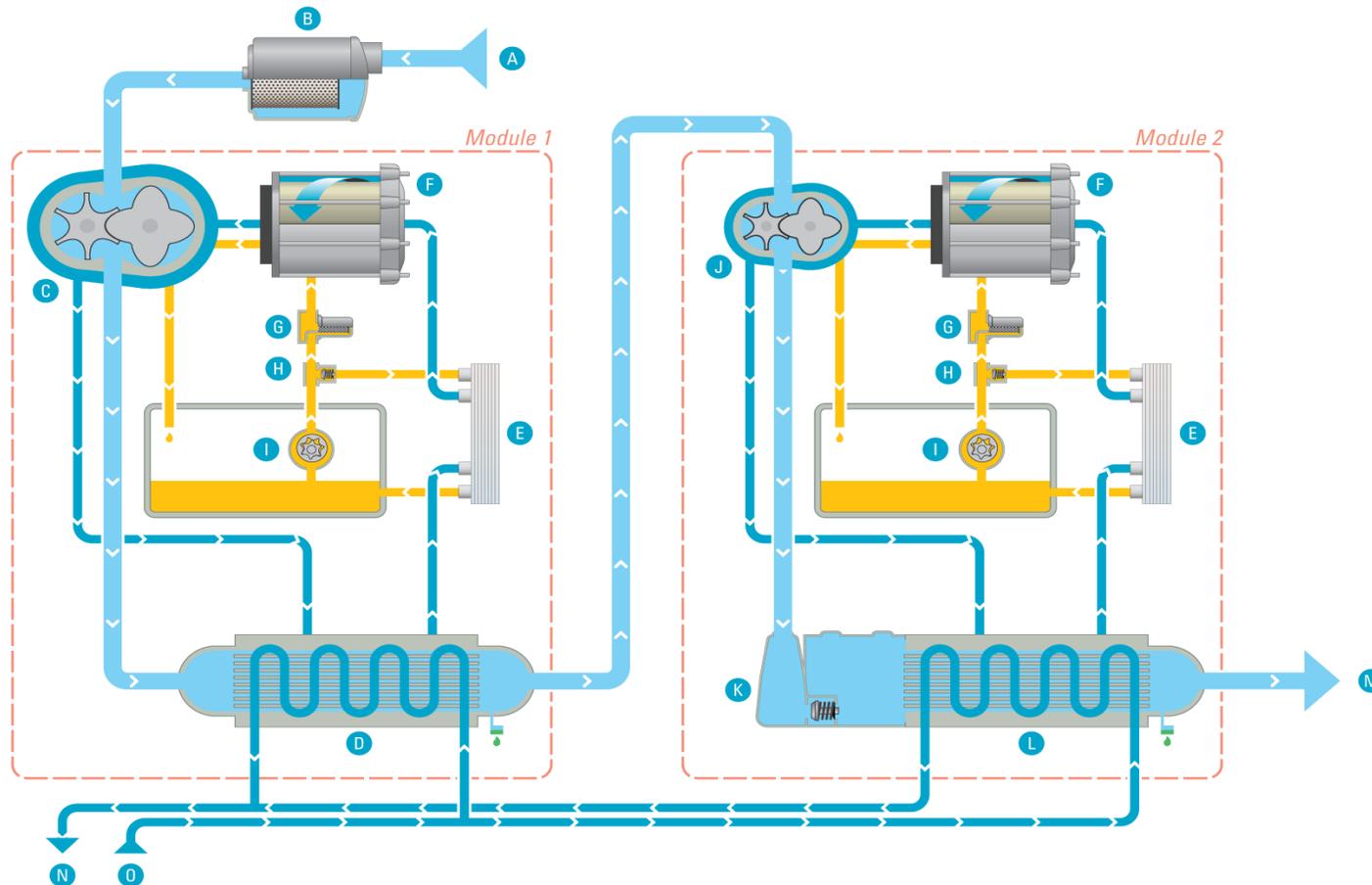
- Compresseur à vis exempt d'huile – Unité complète



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compresseur à vis exempt d'huile – Flow diagram



Atlas Copco

- A Air in
- B Air filter
- C Low pressure element
- D Intercooler
- E Oil cooler
- F Motor
- G Oil filter
- H Bypass valve
- I Oil pump
- J High pressure element
- K Pulsation damper (with check valve)
- L Aftercooler
- M Air out
- N Water out
- O Water in

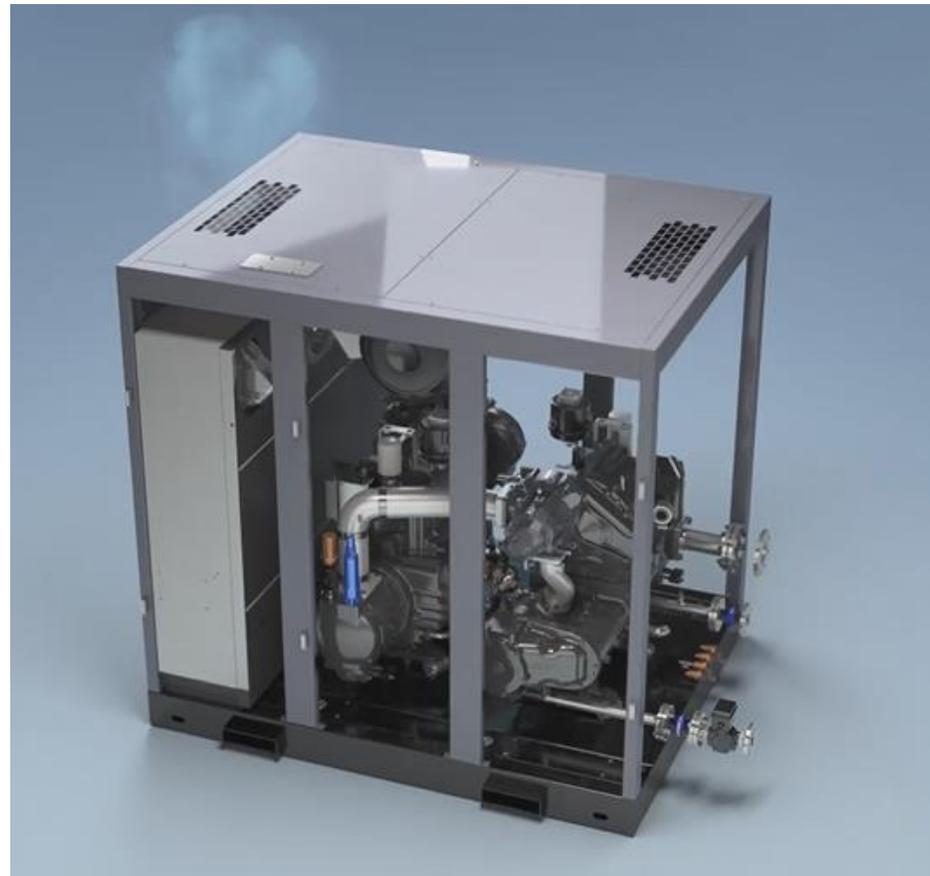
- Air
- Water
- Oil
- Condensate

Atlas Copco

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## AMÉLIORER L'EFFICACITÉ DE L'ÉLÉMENTS DE COMPRESSION À VIS

- Compresseur à vis exempt d'huile – Unité complète – Animation



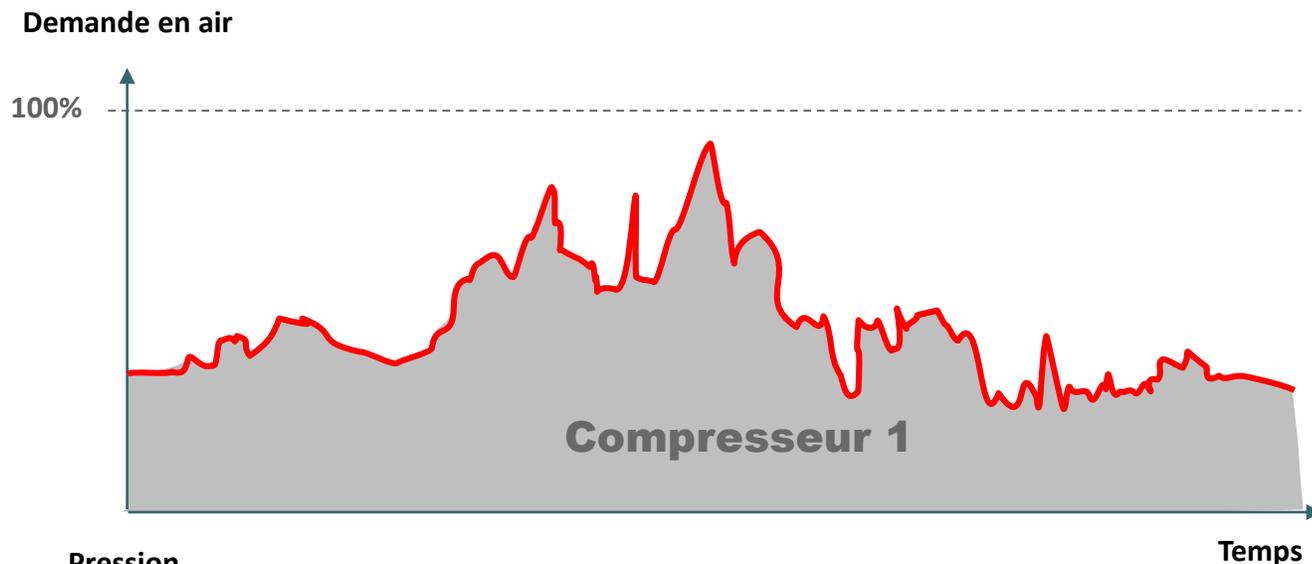
# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

- **Régulation performante**
  - Marche à vide
  - Régulation en cascade
  - Vitesse variable
  - Gestion centralisée
- **Récupération d'énergie**
  - Récupération d'énergie pour compresseur à injection d'huile
  - Récupération d'énergie pour compresseur exempt d'huile
  - Sécheur à adsorption à récupération de chaleur de compression

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Régulation des compresseurs à vitesse fixe – Régulation de pression TOR – Marche à vide

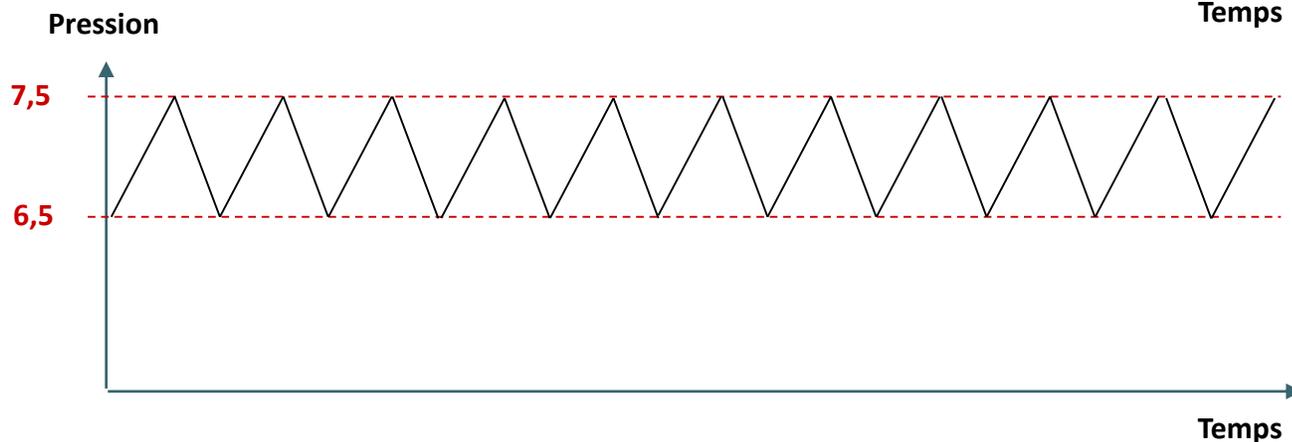


1 compresseur vitesse fixe  
100% capacité



1

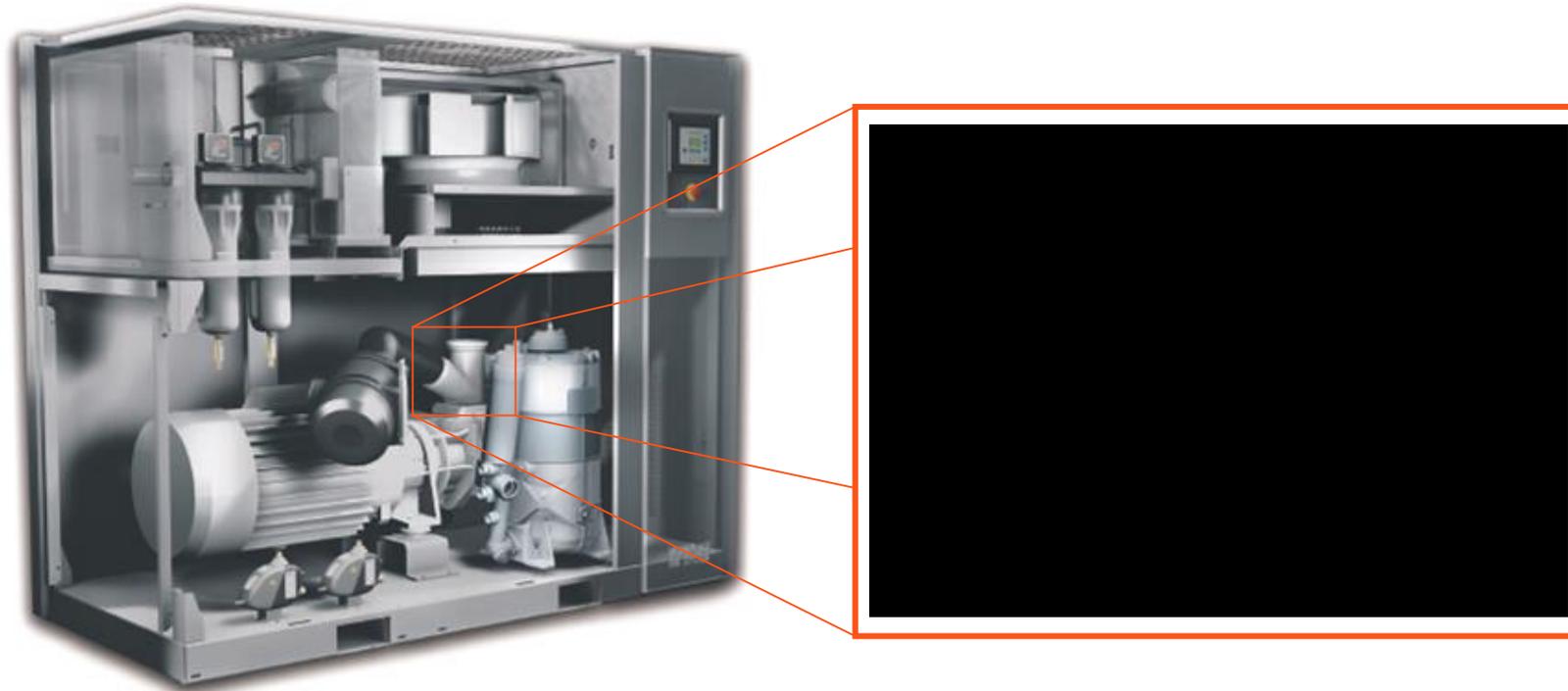
Compresseur 1



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

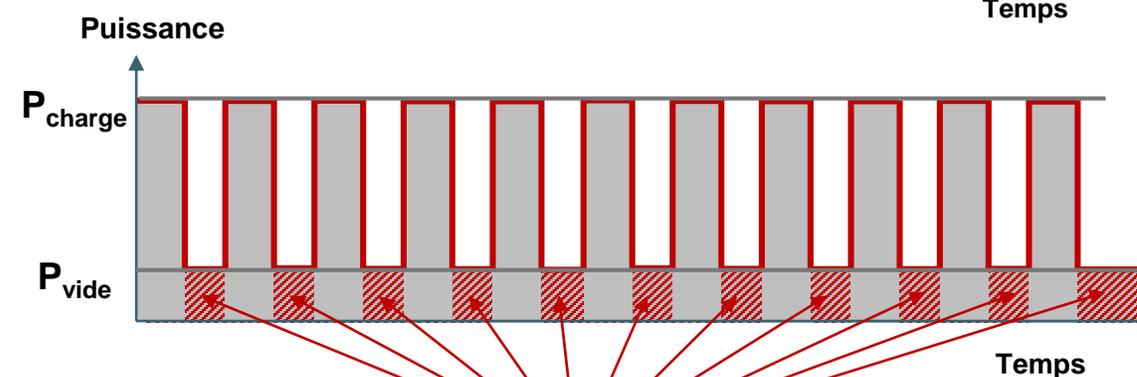
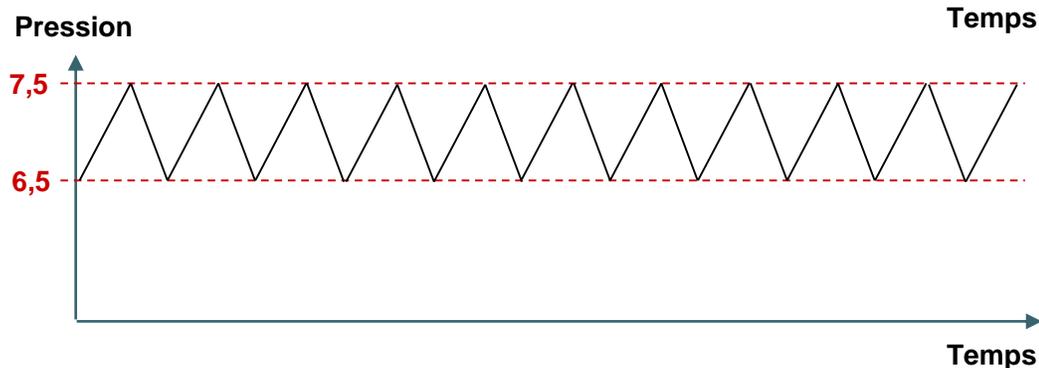
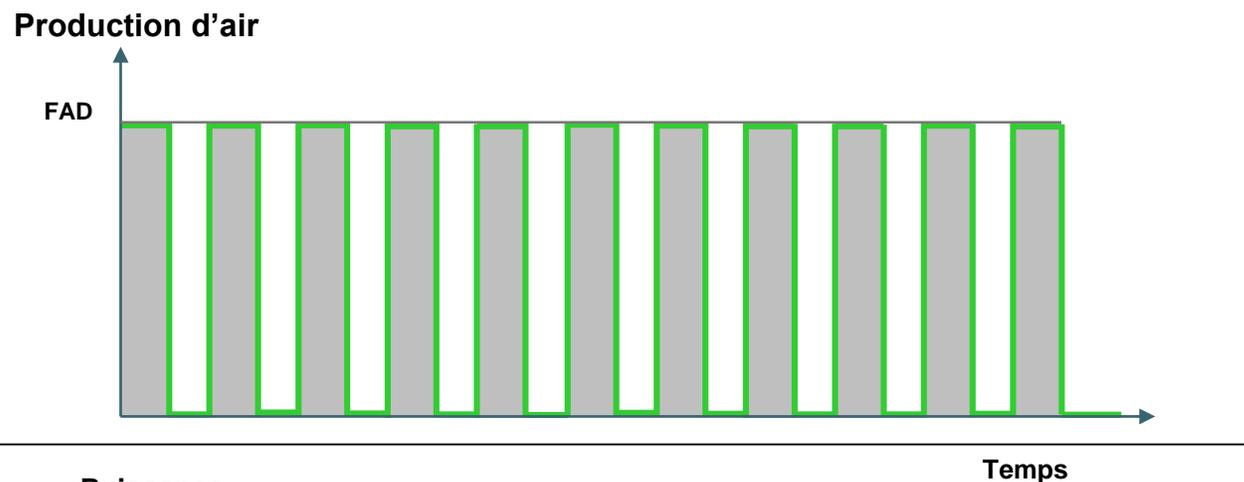
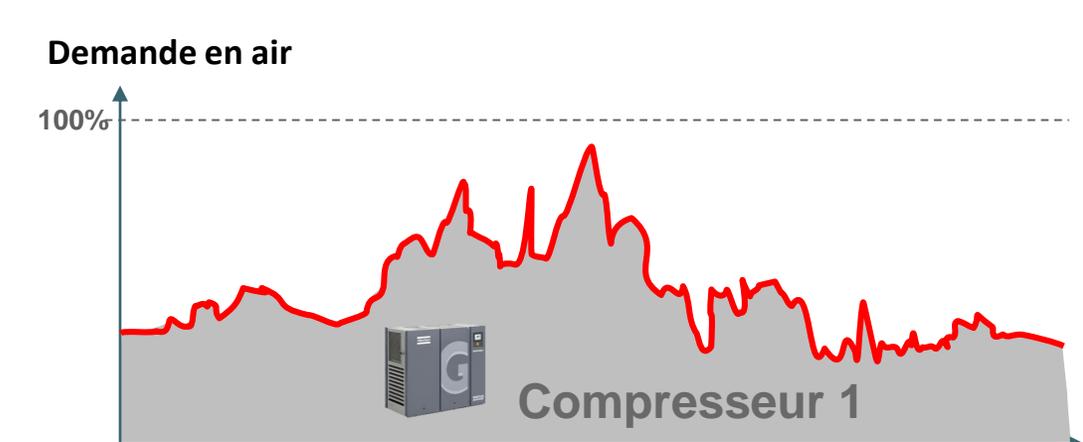
- Régulation des compresseurs à vitesse fixe – Régulation de pression TOR – Marche à vide



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Régulation des compresseurs à vitesse fixe – Régulation de pression TOR – Marche à vide

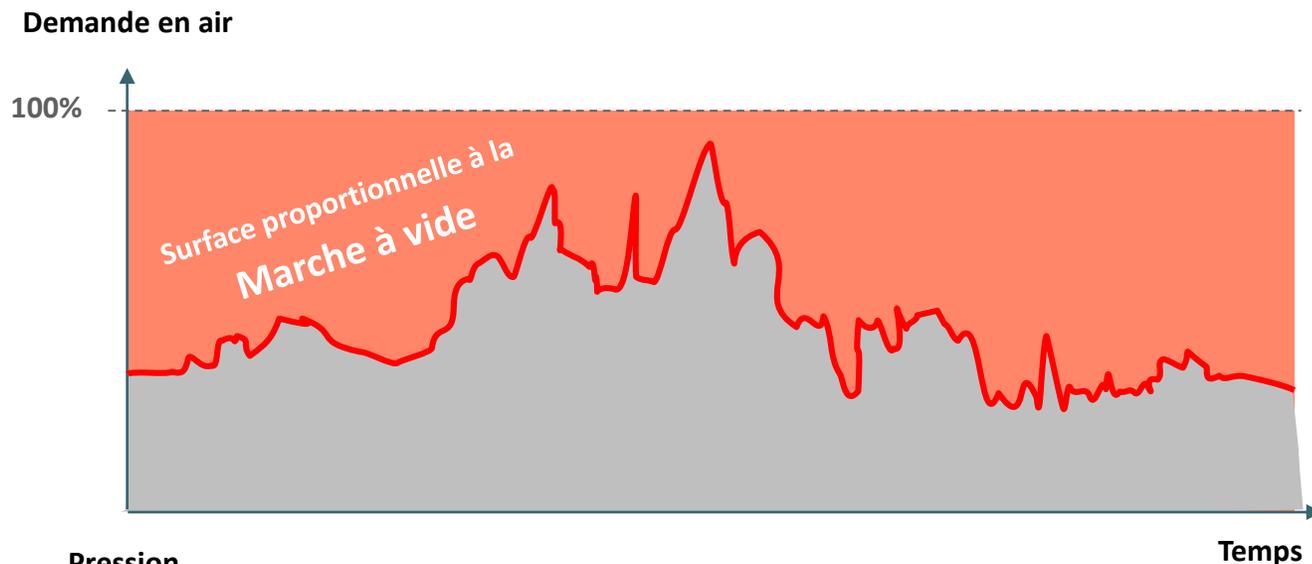


Pertes d'énergie

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Régulation des compresseurs à vitesse fixe – Régulation de pression TOR – Marche à vide

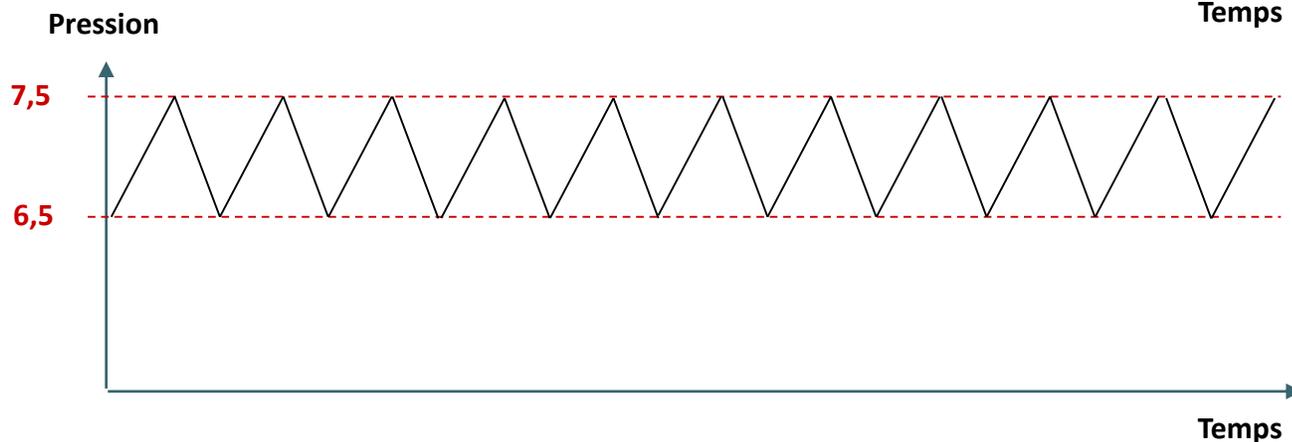


1 compresseur vitesse fixe  
100% capacité



1

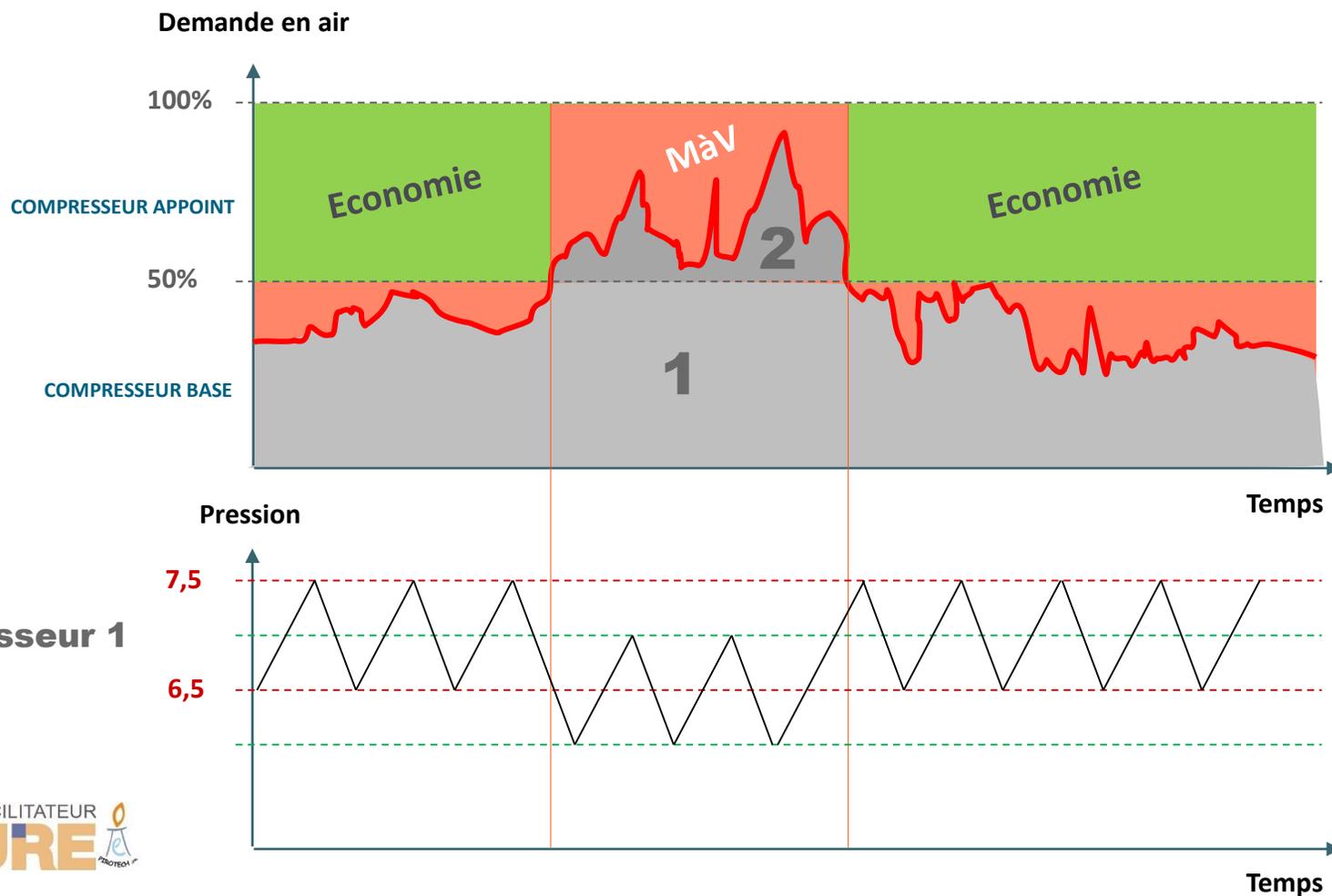
Compresseur 1



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Régulation en cascade



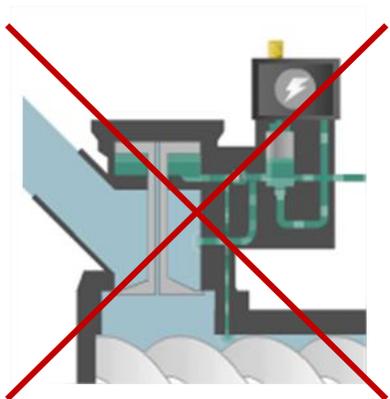
2 compresseurs vitesse fixe  
50% de capacité totale



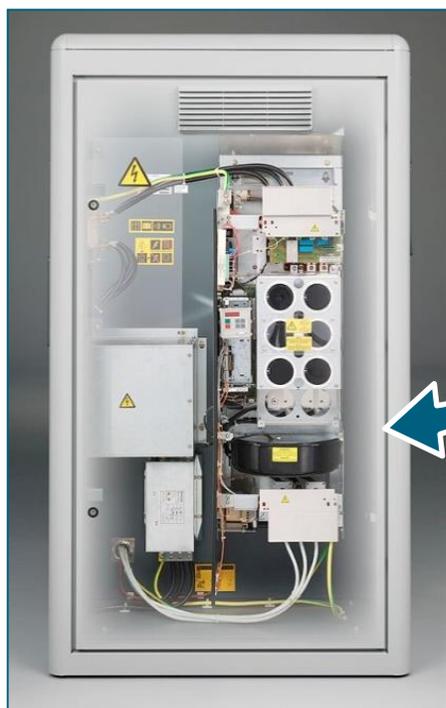
# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

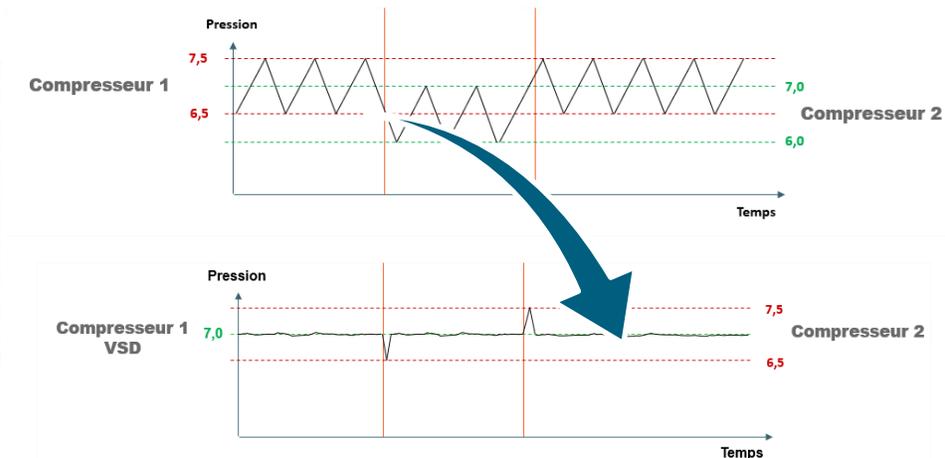
- Compresseur à vitesse variable



Plus de  
Marche à Vide



Convertisseur  
de fréquence

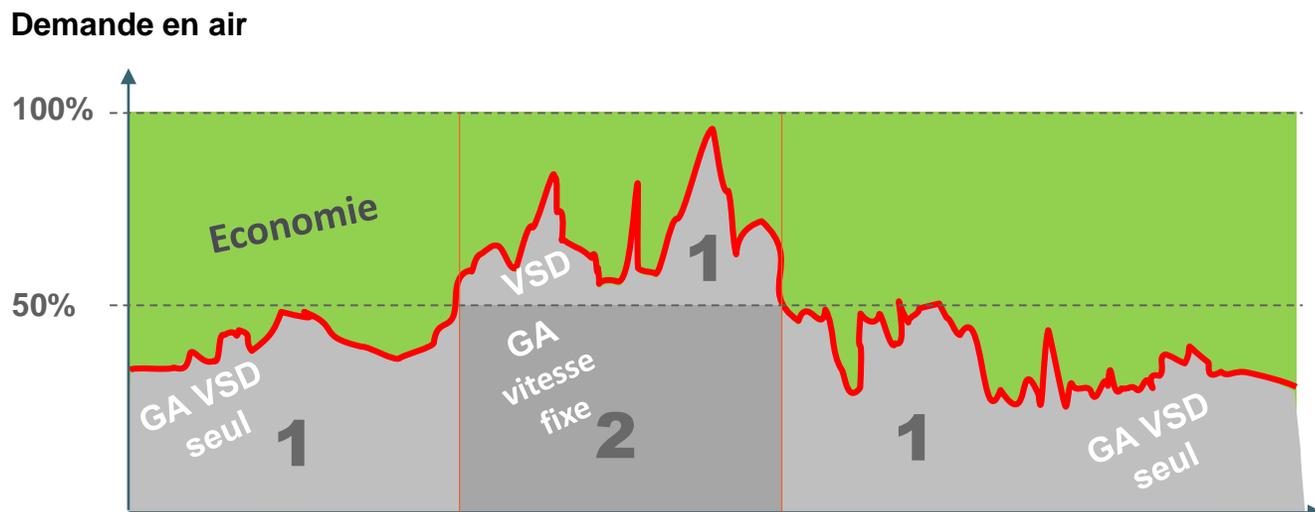


Régulation  
TOR → PID

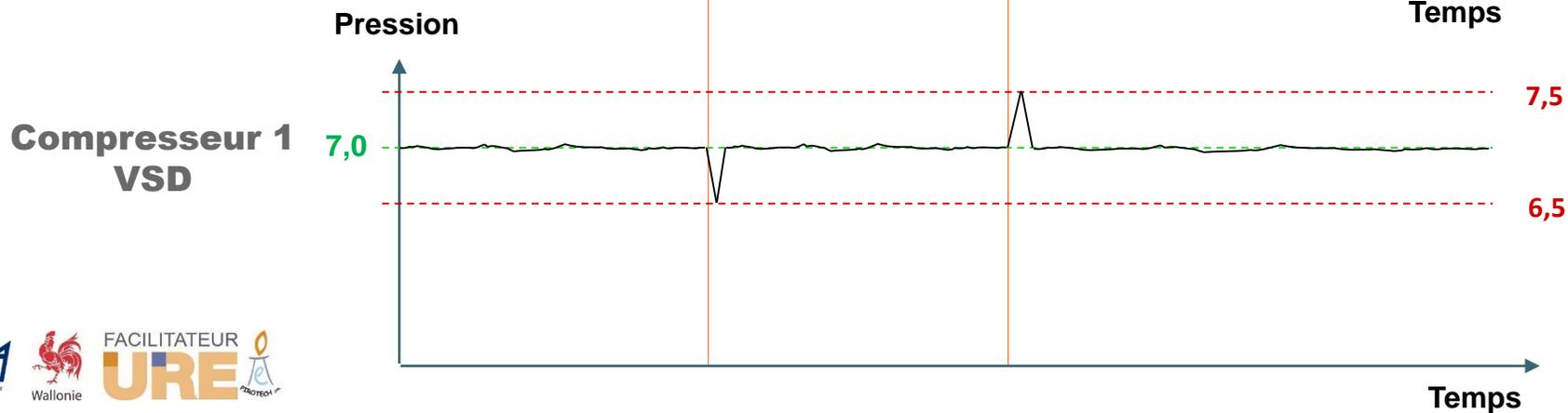
# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Compresseur à vitesse variable – Suppression de la Marche à Vide



1 compresseur vitesse fixe  
1 vitesse variable  
50% de capacité totale



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Compresseur à vitesse variable



Estimer l'économie : Audit – **iitrak**

- Mesure de courant non invasive
- 1 valeur par seconde
- Autonomie 2 à 3 semaines (Batterie LR6)
- Mesure individuelle, cumulable jusque 8 compresseurs



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

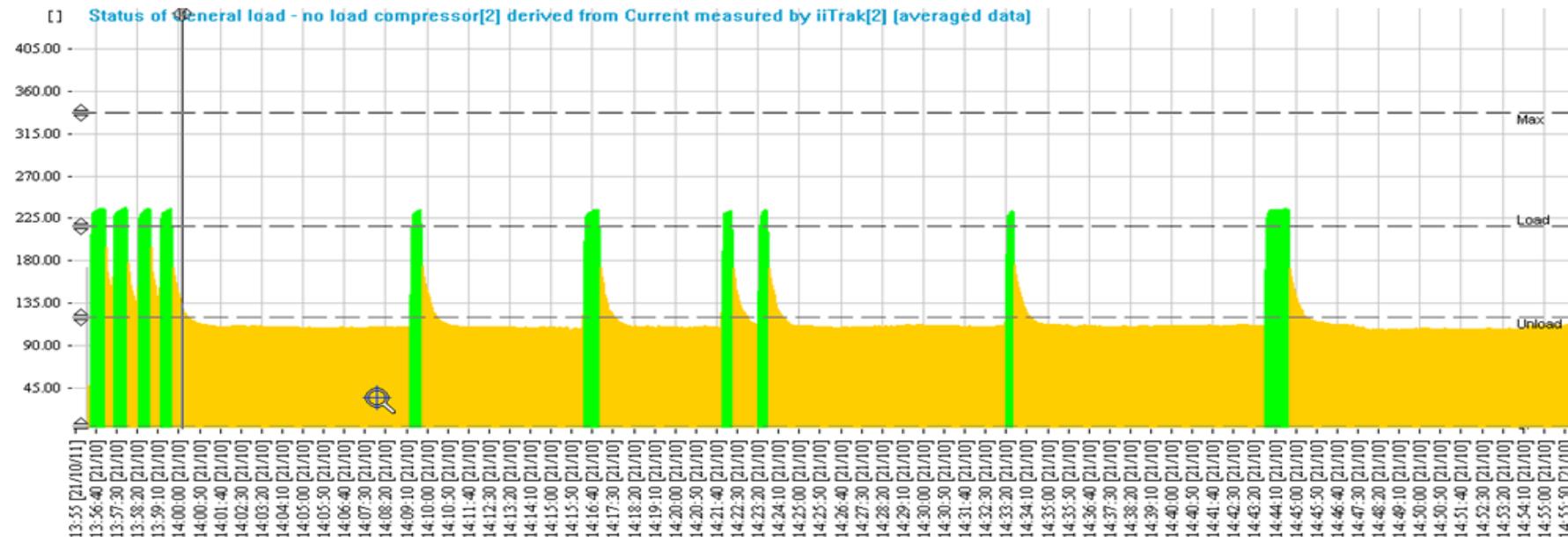
## RÉGULATION PERFORMANTE

- Compresseur à vitesse variable



Estimer l'économie : Audit – **iiTrak**

- Mesure de courant = Mesure de l'état compresseur



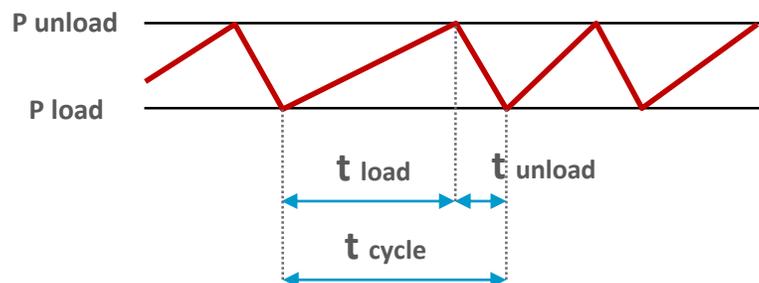
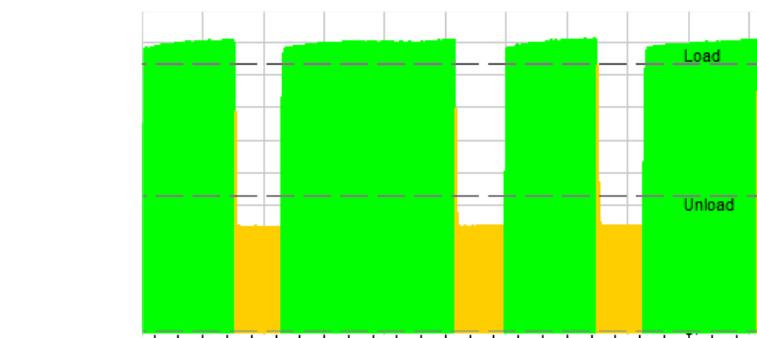
# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

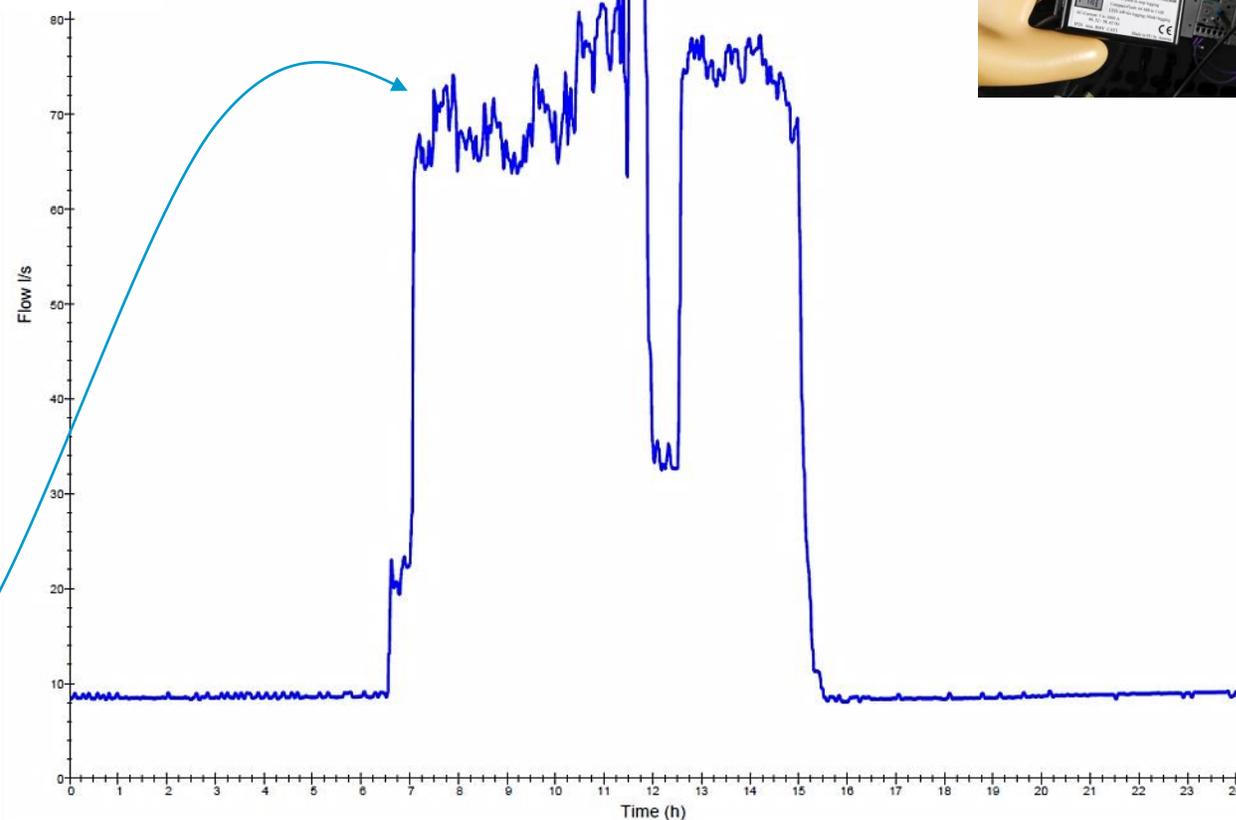
- Compresseur à vitesse variable

Estimer l'économie : Audit – **iitrak**

– Transformation en débit → 1 valeur par cycle de régulation



$$\text{Flow} = \frac{\text{FAD} \times t_{\text{load}}}{t_{\text{cycle}}}$$



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Compresseur à vitesse variable

Estimer l'économie : Audit – **iitrak**

– Bilan énergétique global de l'installation



Compressor Information	1	2	3	4	5
Manufacturer	AC	AC	AC	AC	AC
Type	GA1108	GA1108	GA1108	GA110	GA110
Manufacturer Type					
Control System	Elek.	Elek.	Elek.	Elek.	Elek.
FAD (l/s)	262.0	262.0	262.0	334.0	334.0
Min FAD (l/s)	---	---	---	---	---
Unload Power (kW)	25.6	25.6	25.6	29.0	29.0
Load Power (kW)	99.2	99.2	99.2	121.0	121.0
<b>Calculated Compressor Data</b>					
Loaded Time (h)	13.0	79.3	55.6	132.7	167.8
Unloaded Time (h)	9.7	0.6	52.5	32.7	0.1
Stopped Time (h)	145.3	88.0	59.9	2.6	0.1
Load/Unload Cycles-VSD Stops	454	51	1398	1211	115
Energy Loaded (kWh)	1286	7871	5519	16055	20304
Energy Unloaded (kWh)	436	33	1909	1572	6
Total Energy Cons. (kWh)	1722	7904	7428	17627	20310
<b>Calculated Air Net Data</b>					
Energy Loaded (kWh)	51035				
Energy Unloaded (kWh)	3955				
Total Energy Cons. (kWh)	54990				



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- Compresseur à vitesse variable



Estimer l'économie : Audit – **iitrak**

- Simulation de la performance d'autres configurations



Compressor Information	1	2	3	4	5
Manufacturer	AC	AC	AC	AC	AC
Type	GA1108	GA1108	GA1108	GA110	GA110
Manufacturer	{AC}	{AC}	{AC}	{AC}	{AC}
Type	{GA110VSD}	{GA1108}	{GA1108}	{GA110}	{GA110}
Control System	Elek.{VSD GA110-50-Pack}	Elek.{Elek.}	Elek.{Elek.}	Elek.{Elek.}	Elek.{Elek.}
FAD (l/s)	262.0{---}	262.0{ 262.0}	262.0{ 262.0}	334.0{ 334.0}	334.0{ 334.0}
Min FAD (l/s)	--{---}	--{---}	--{---}	--{---}	--{---}
Unload Power (kW)	25.6{---}	25.6{ 25.6}	25.6{ 25.6}	29.0{ 29.0}	29.0{ 29.0}
Load Power (kW)	99.2{---}	99.2{ 99.2}	99.2{ 99.2}	121.0{ 121.0}	121.0{ 121.0}
<b>Calculated Compressor Data</b>					
Loaded Time (h)	13.0{ 133.6}	79.3{ 1.7}	55.6{ 44.7}	132.7{ 134.1}	167.8{ 168.0}
Unloaded Time (h)	9.7{---}	0.6{ 0.8}	52.5{ 2.5}	32.7{ 1.8}	0.1{ 0.0}
Stopped Time (h)	145.3{ 34.4}	88.0{ 165.5}	59.9{ 120.8}	2.6{ 32.1}	0.1{ 0.0}
Load/Unload Cycles-VSD Stops	454{ 959}	51{ 12}	1398{ 52}	1211{ 37}	115{ 0}
Energy Loaded (kWh)	1286{ 9960}	7871{ 169}	5519{ 4431}	16055{ 16229}	20304{ 20328}
Energy Unloaded (kWh)	436{---}	33{ 26}	1909{ 88}	1572{ 73}	6{ 0}
Total Energy Cons. (kWh)	1722{ 9960}	7904{ 194}	7428{ 4519}	17627{ 16302}	20310{ 20328}
<b>Calculated Air Net Data</b>					
Energy Loaded (kWh)	51035{ 51116}				
Energy Unloaded (kWh)	3955{ 186}				
Total Energy Cons. (kWh)	54990{ 51303}				

**Economie = 3.687 kWh/sem**



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- **Gestion centralisée**

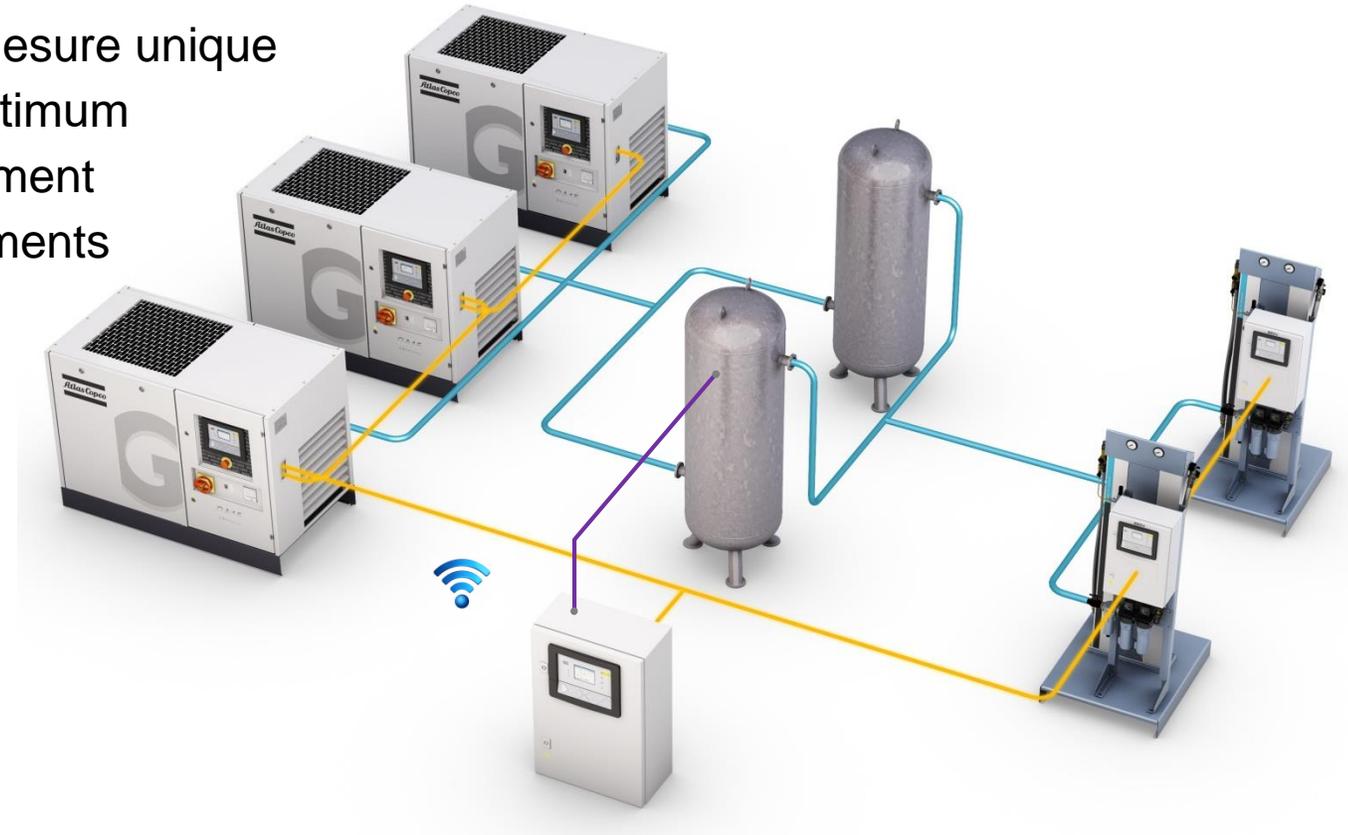
Réduction de la pression moyenne, mesure unique

Sélection adaptative → rendement optimum

Intégration des équipements de traitement

Maîtrise du vieillissement des équipements

Connectivité

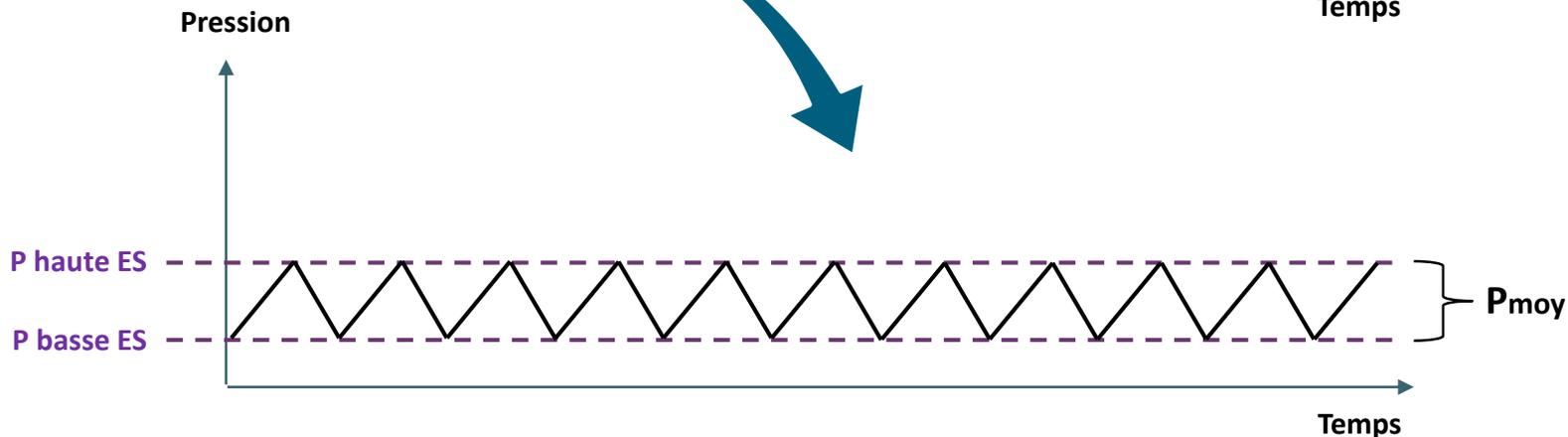
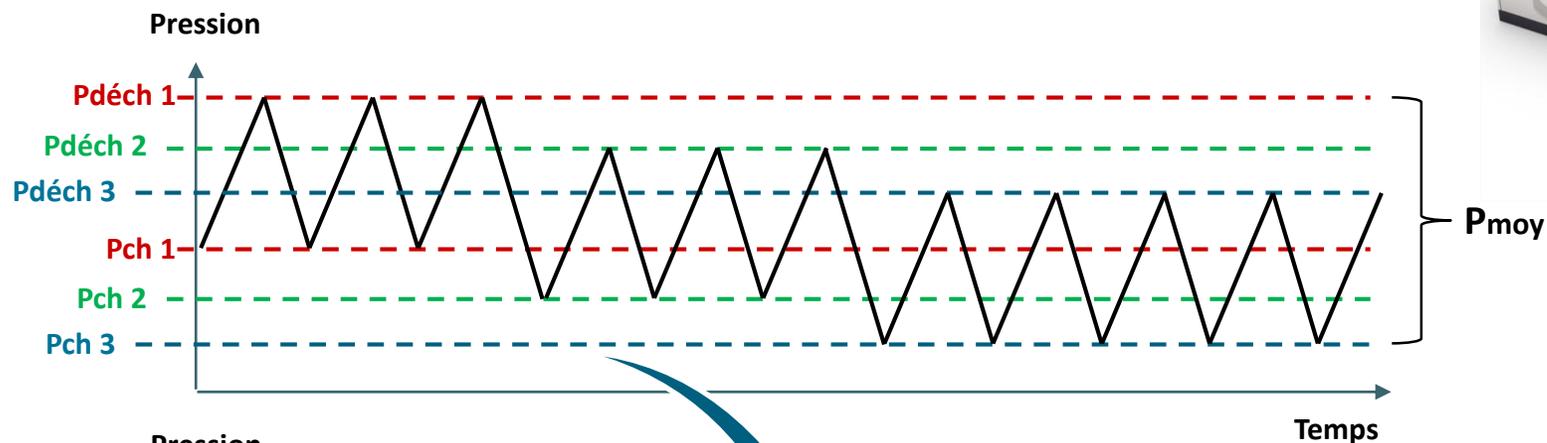


# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

- **Gestion centralisée**

Réduire la pression moyenne, mesure de pression unique



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉGULATION PERFORMANTE

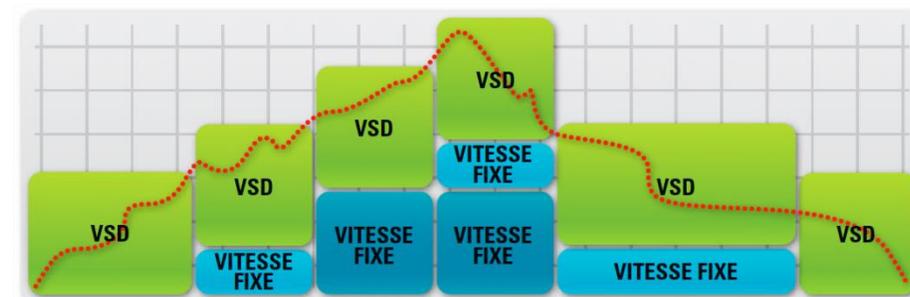
- **Gestion centralisée**

Sélection adaptative → rendement optimum

Intégration des équipements de traitement

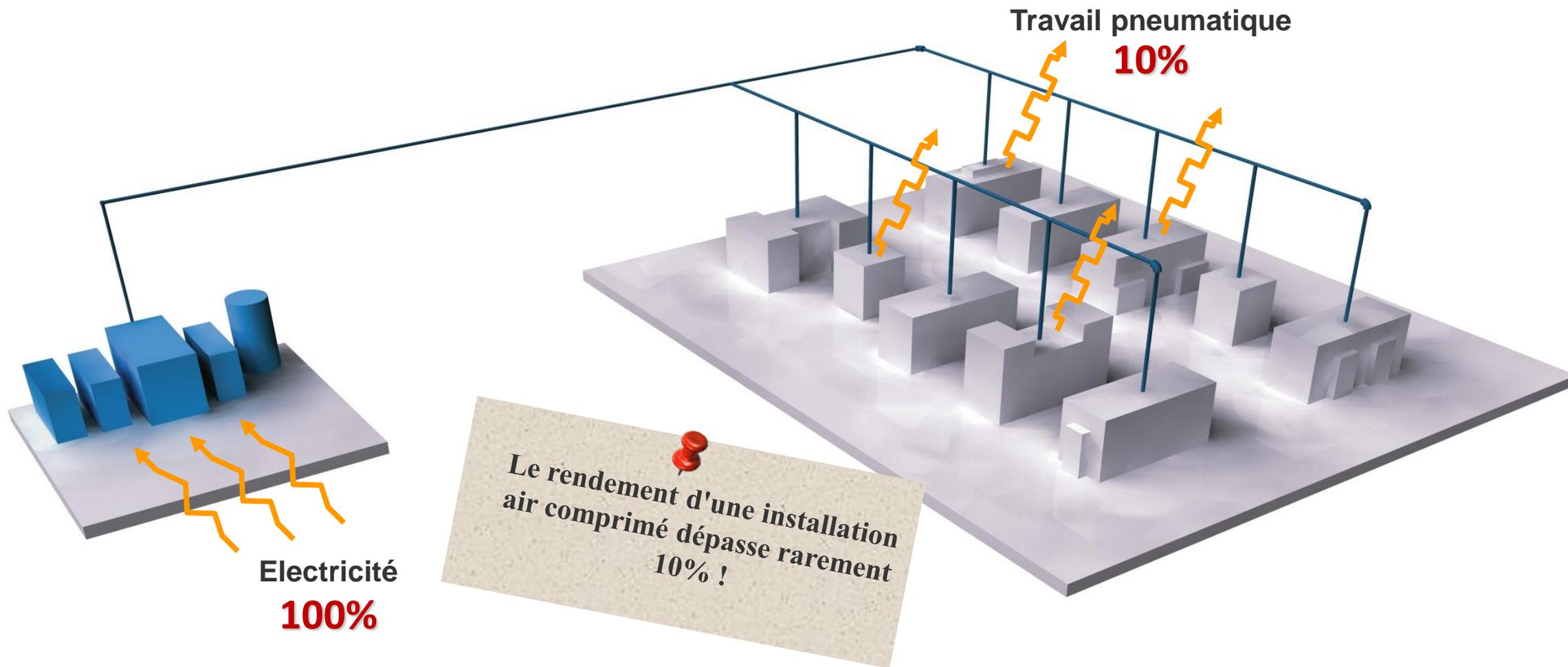
Maîtrise du vieillissement des équipements

Connectivité



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

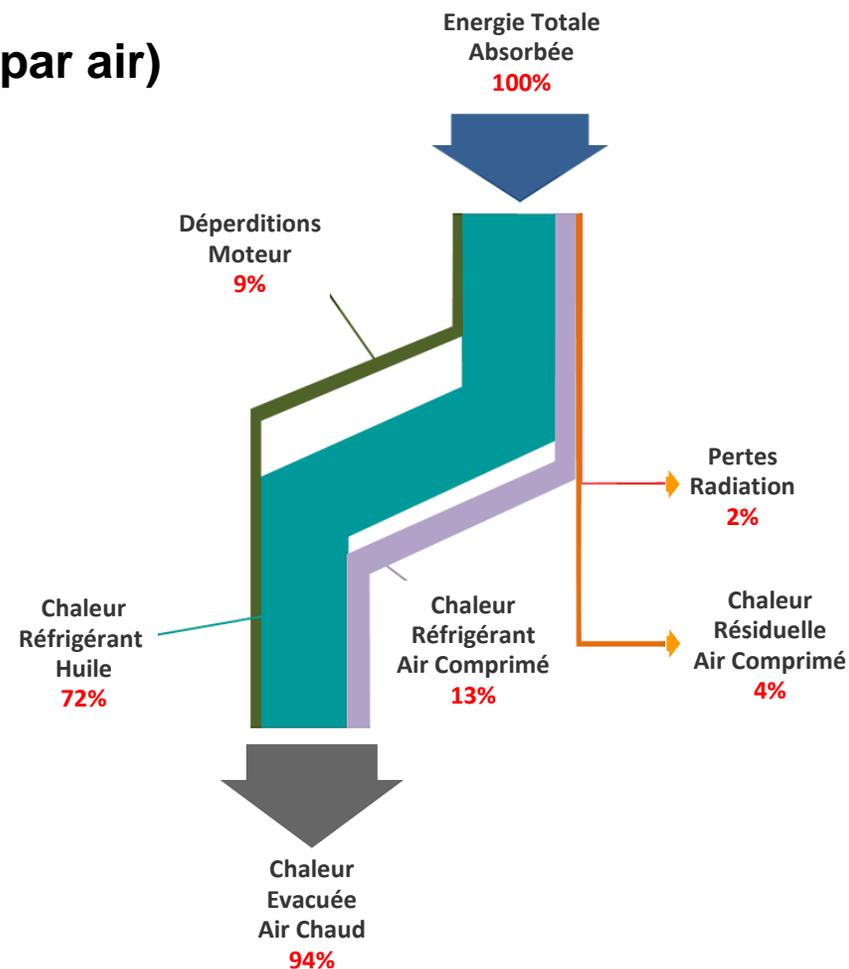
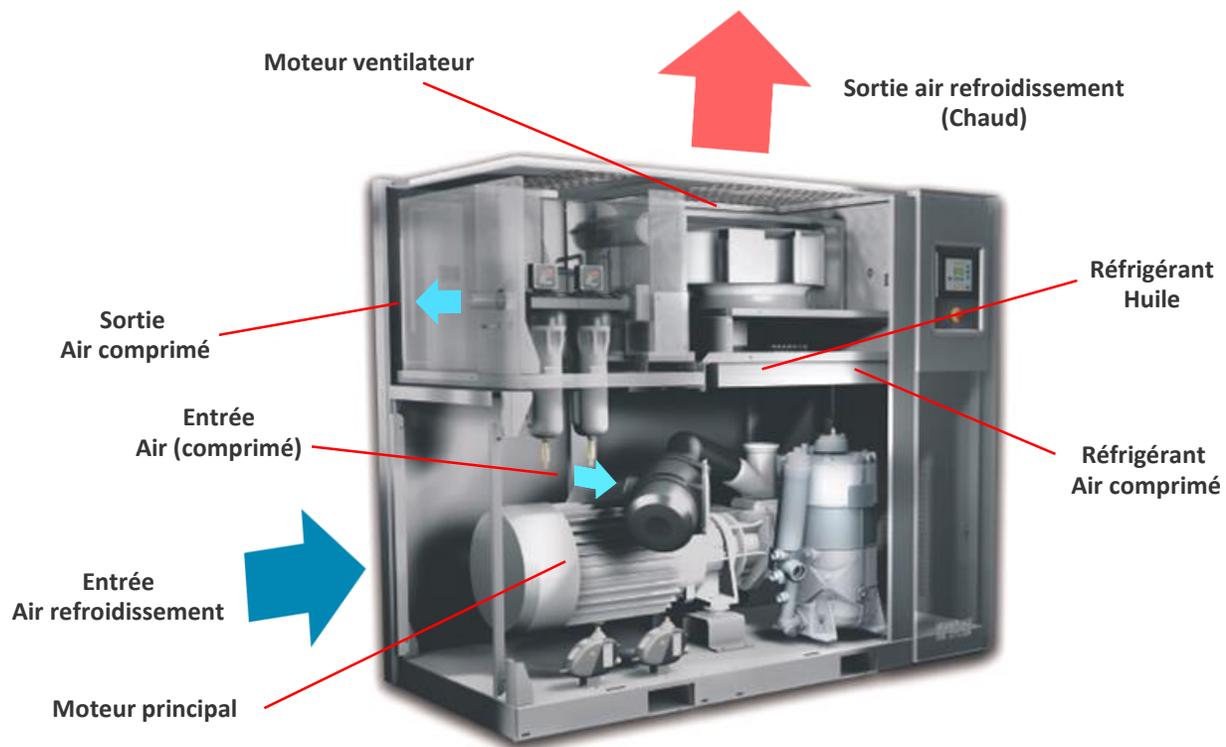
## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

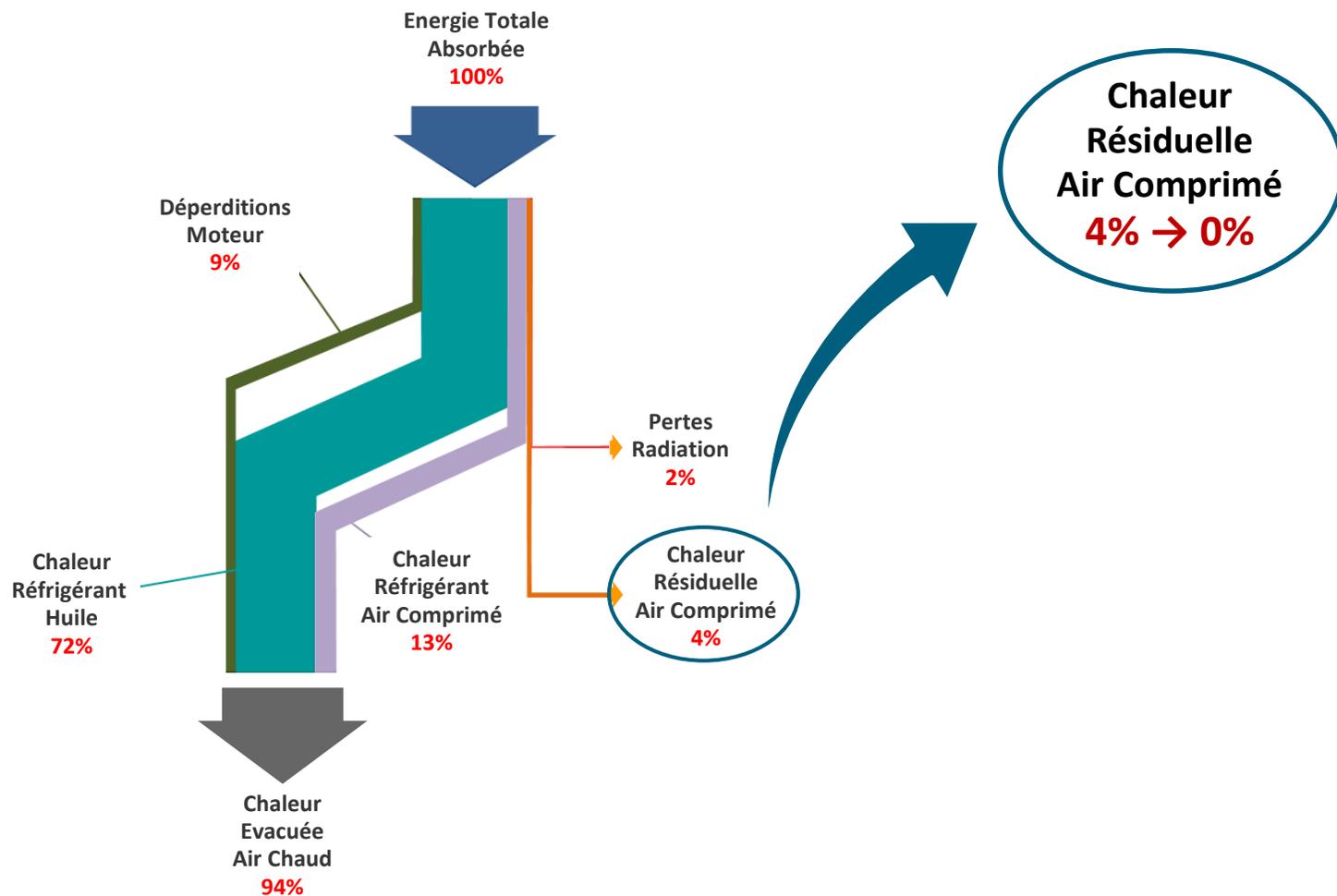
- Bilan thermique du compresseur (vis lubrifiées refroidi par air)



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

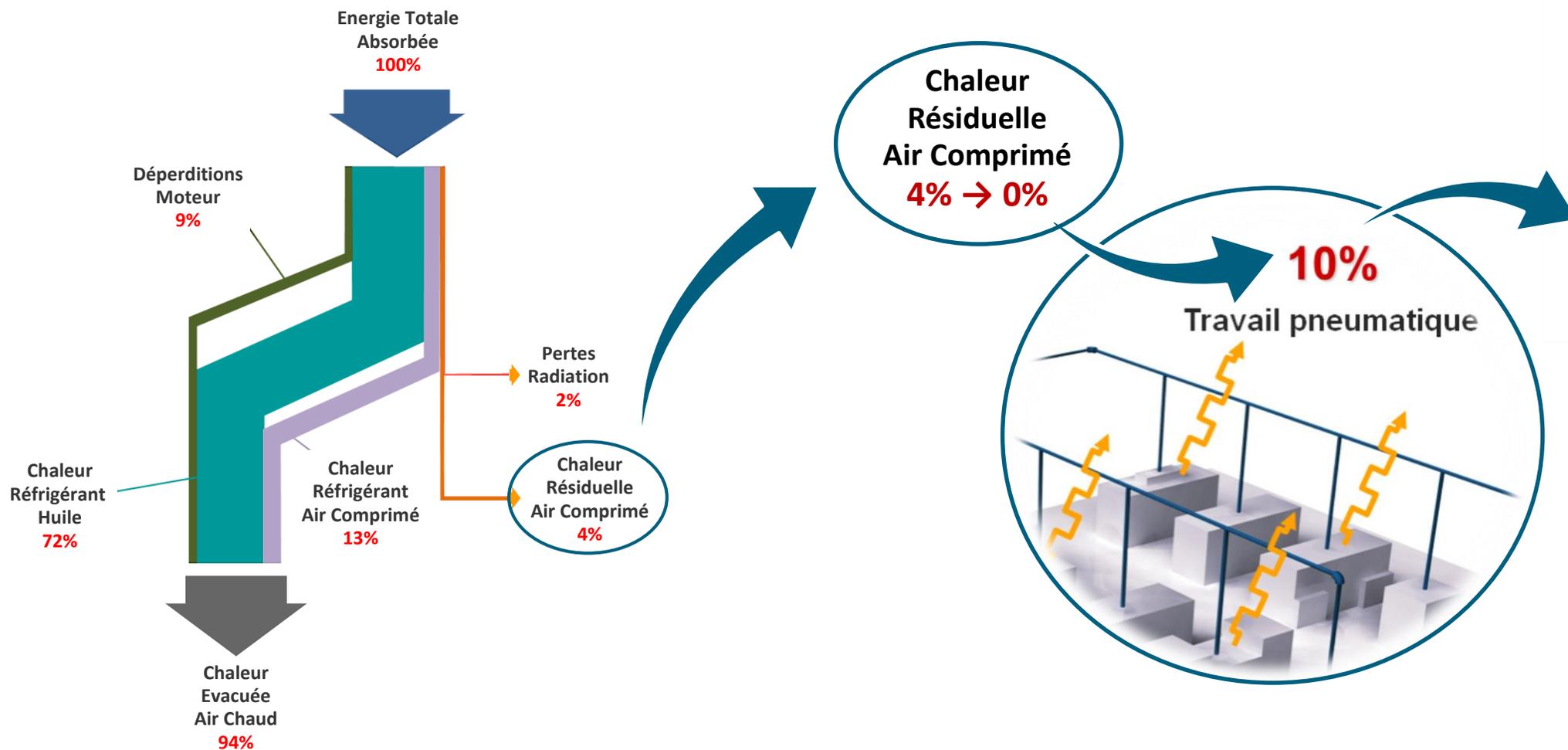
- Bilan thermique du compresseur (vis lubrifiées refroidi par air)



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

- Bilan thermique du compresseur (vis lubrifiées refroidi par air)



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

- Compression & détente adiabatique

### Compression adiabatique ( sans injection d'huile)



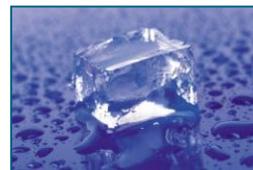
$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

8 bar(a)  
298 K (25°C)  
1,4  
1 bar(a)  
540K (267°C)



Travail de compression 1 → 8 bar(a) = 100 %

### Détente adiabatique



$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

1 bar(a)  
298 K (25°C)  
1,4  
8 bar(a)  
165K (-108°C)

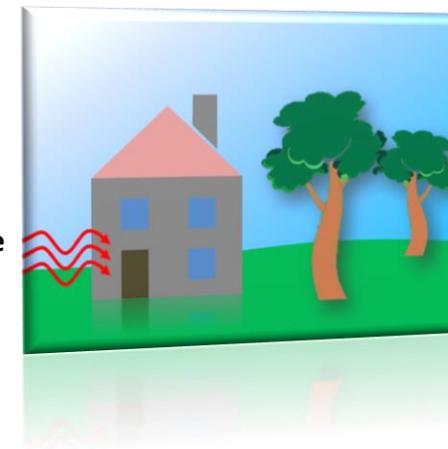
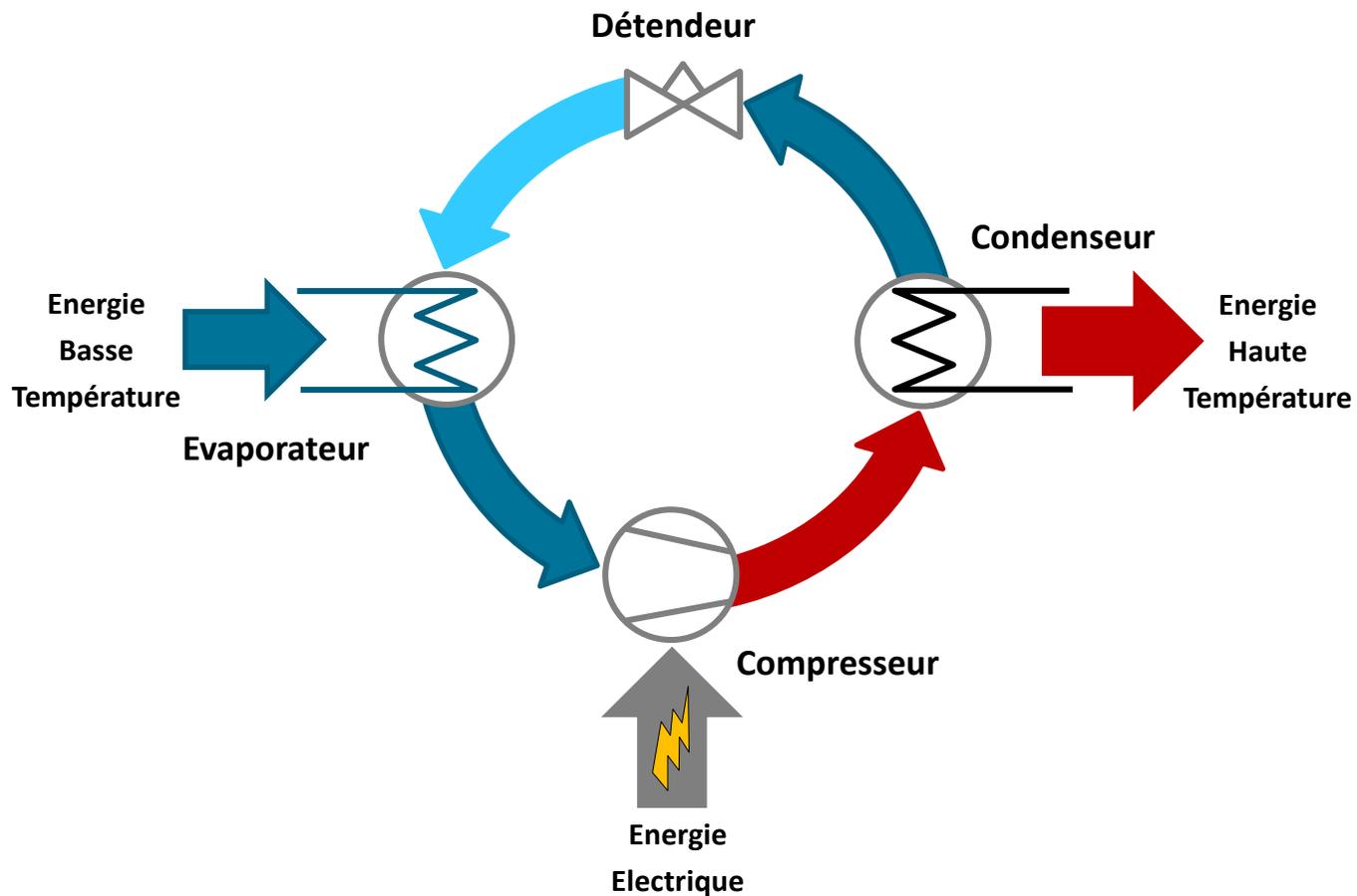


Travail de détente 8 → 1 bar(a) = 30 %

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

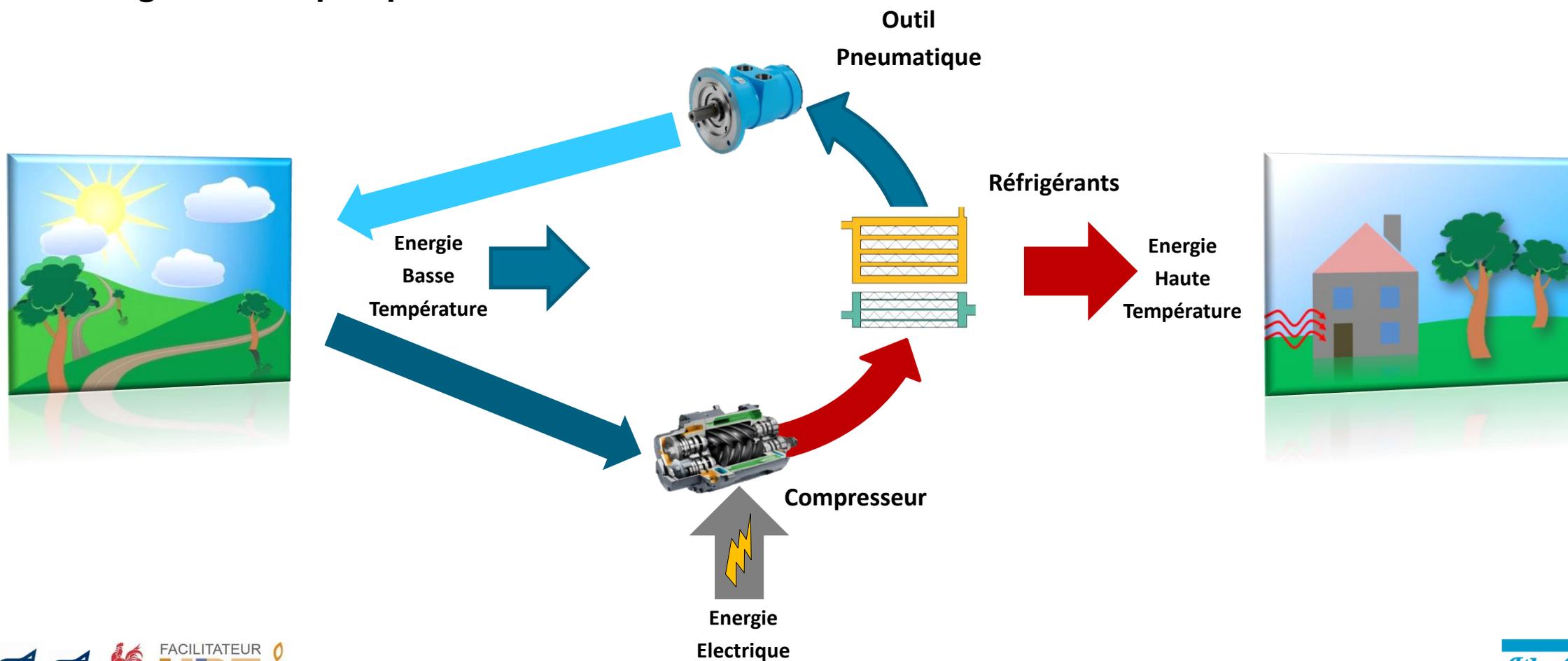
- Analogie avec la pompe à chaleur



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

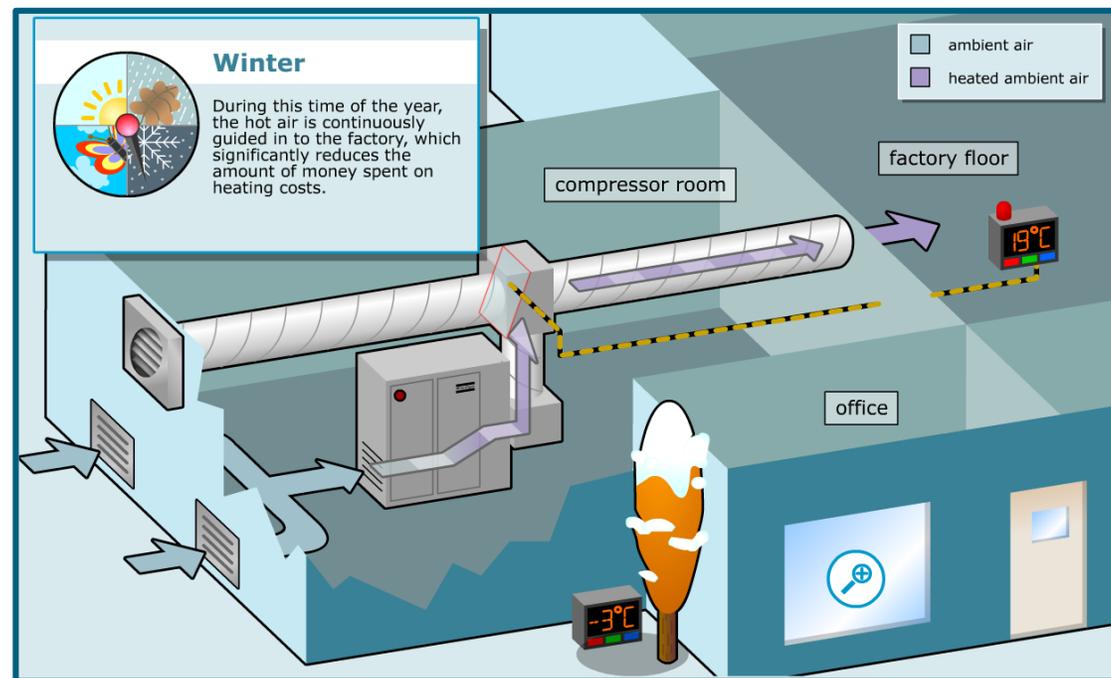
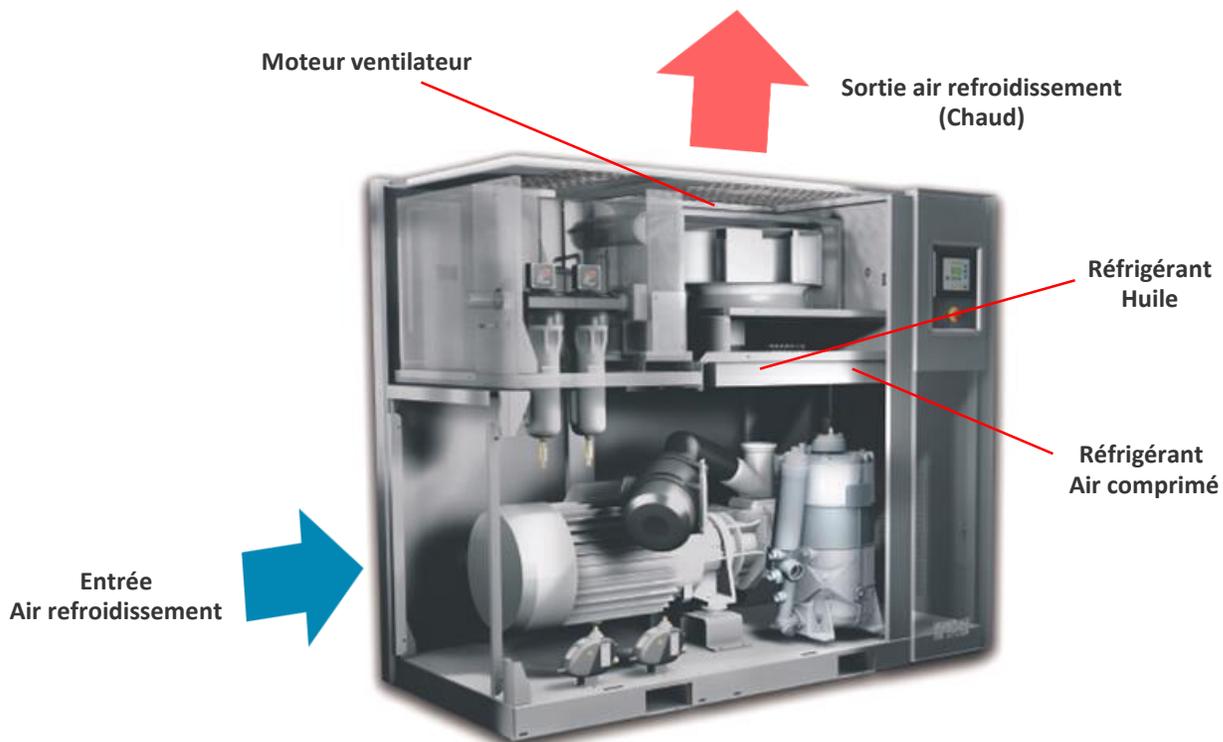
- Analogie avec la pompe à chaleur



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

- Récupération d'énergie pour compresseur à injection d'huile - Récupération directe par air chaud



Potentiel de récupération élevé

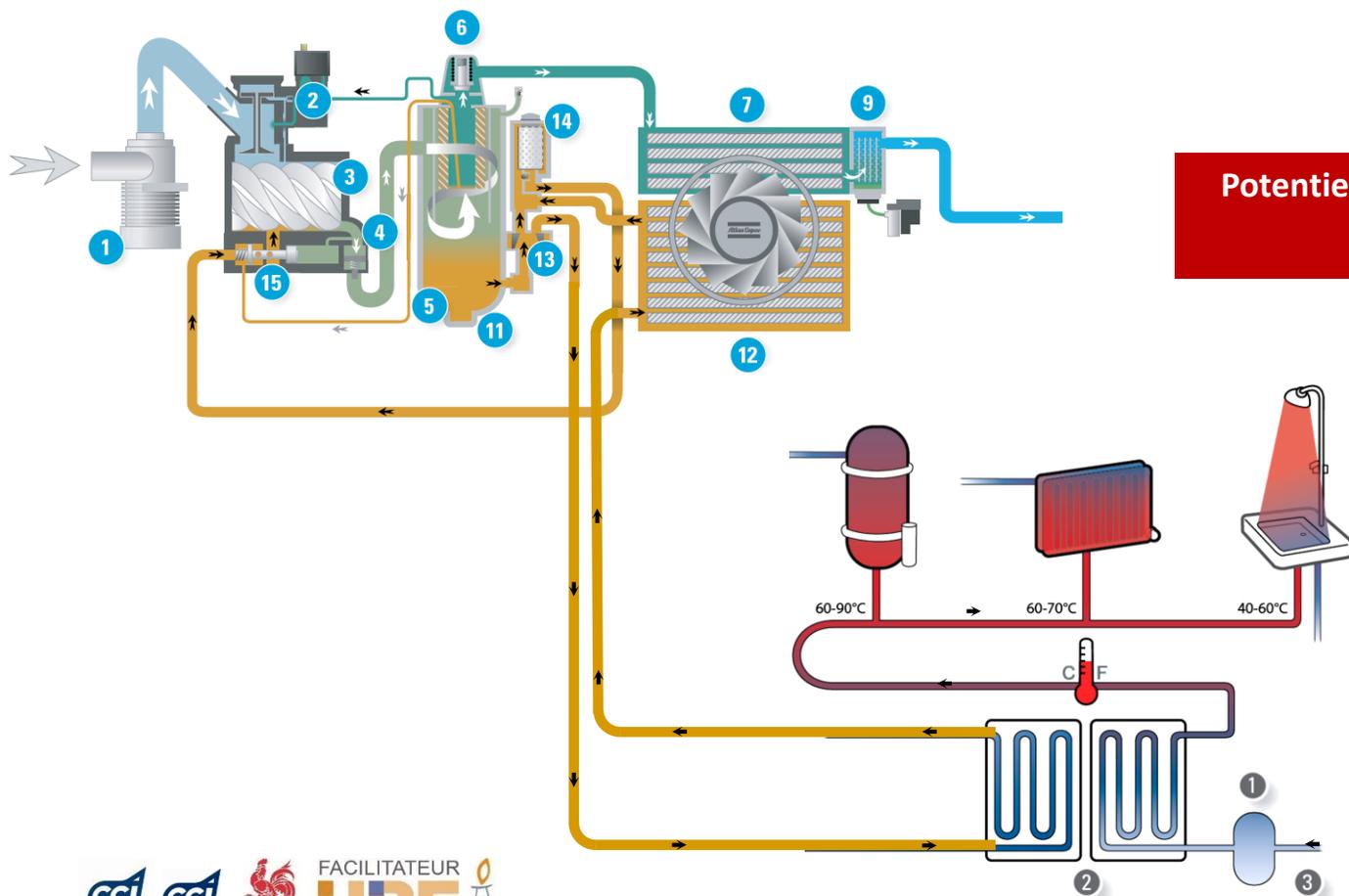
90%

Mais basse température et saisonnier !

# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

- Récupération d'énergie pour compresseur à injection d'huile – Production d'eau chaude (90°C)



Energy Recovery Intégré



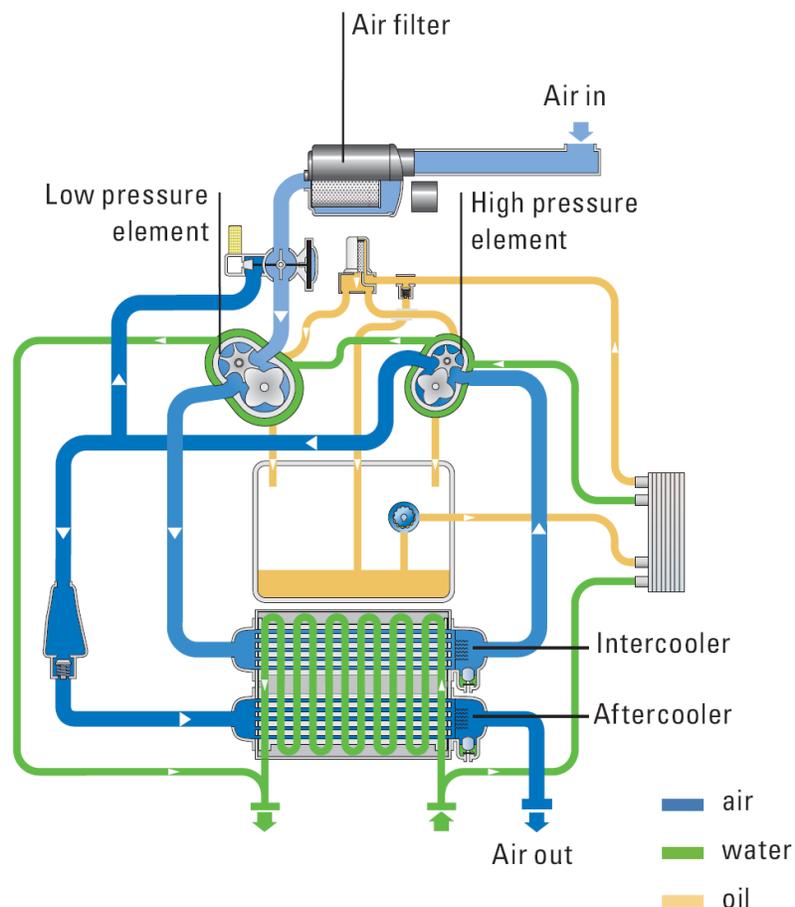
Unité Energy Recovery Externe



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

- Récupération d'énergie pour compresseur **exempt d'huile** – Production d'eau chaude (90°C)



Unité Energy Recovery Externe



Potentiel de récupération  
90%

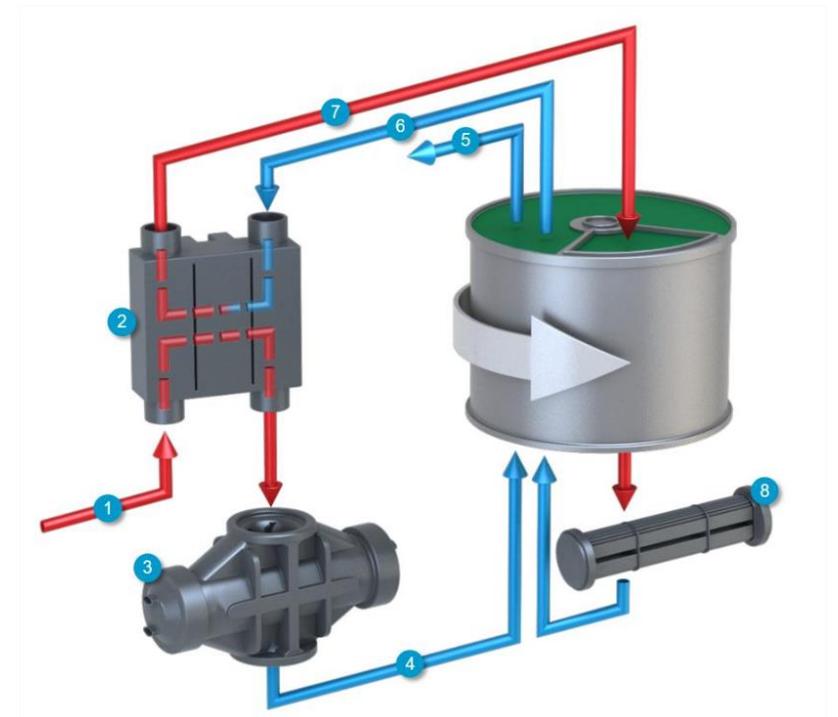
# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

- Sécheur à adsorption à récupération de chaleur de compression (compresseur **exempt d'huile**)



Consommation limitée à  
150 W



# PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES COMPRESSEURS À VIS

## RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

- Sécheur à adsorption à récupération de chaleur de compression (compresseur **exempt d'huile**)



***Merci***

***COMMITTED TO SUSTAINABLE PRODUCTIVITY***

