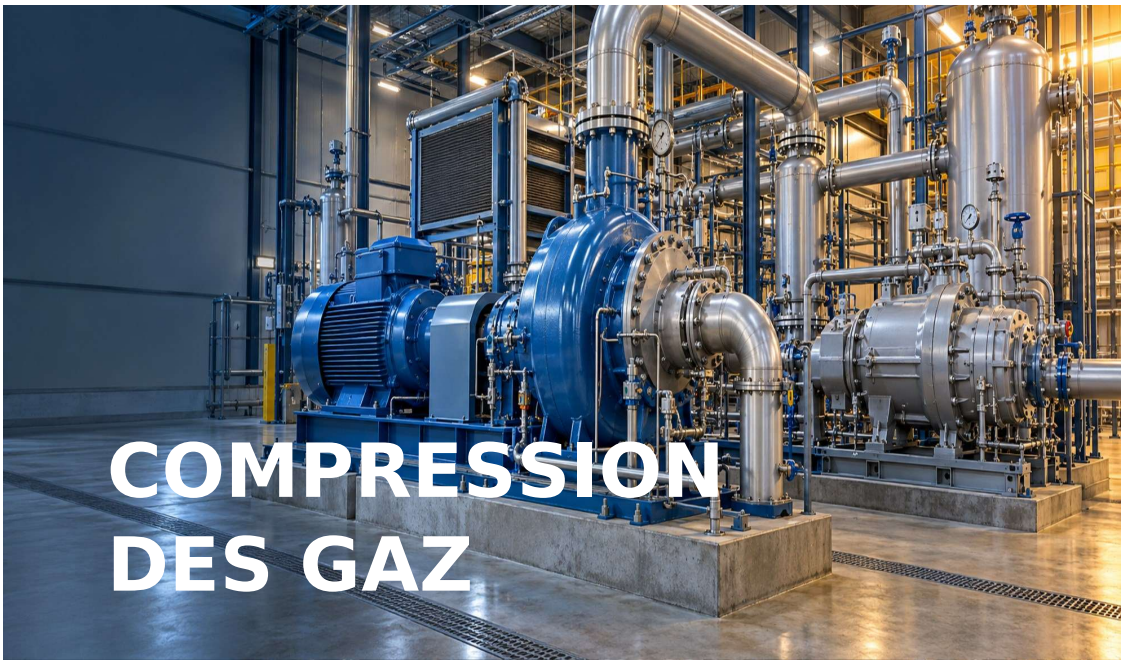
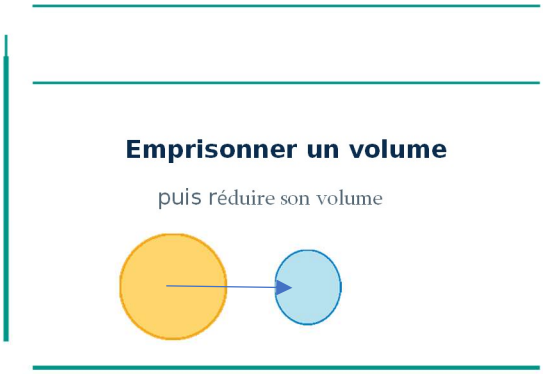


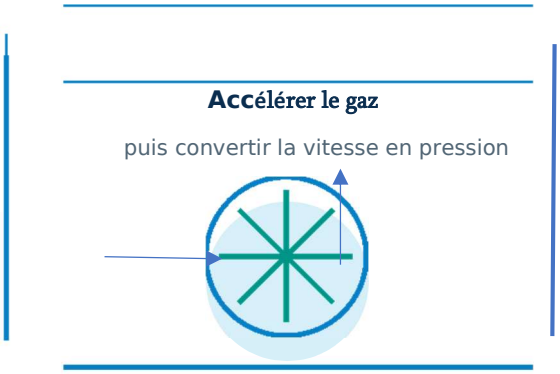
COMPRESSION DES GAZ

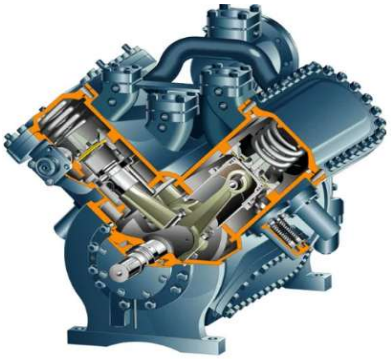
1 Pourquoi comprimer un gaz ?

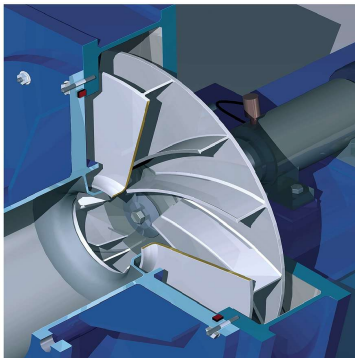
La compression augmente la pression et la masse volumique d'un gaz par un apport de travail mécanique. Comme le gaz est compressible, sa température, son volume et ses propriétés thermodynamiques évoluent fortement.

Deux mécanismes de transfert d'énergie









2 Bases thermodynamiques

Gaz parfait : le modèle relie pression, volume, masse et température.

$$P \cdot V = m \times R \times T \quad \text{et} \quad \rho = P/(R \times T)$$

Pour l'air sec : $R \approx 287\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $Cp \approx 1{,}005\ kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ et $\gamma = Cp/Cv \approx 1{,}4$ à température modérée.

Point de vigilance

Toujours employer des pressions absolues : $P_{abs} = P_{manométrique} + P_{atmosphérique}$.
Une sortie à 7 bar(g) correspond environ à 8 bar(a).

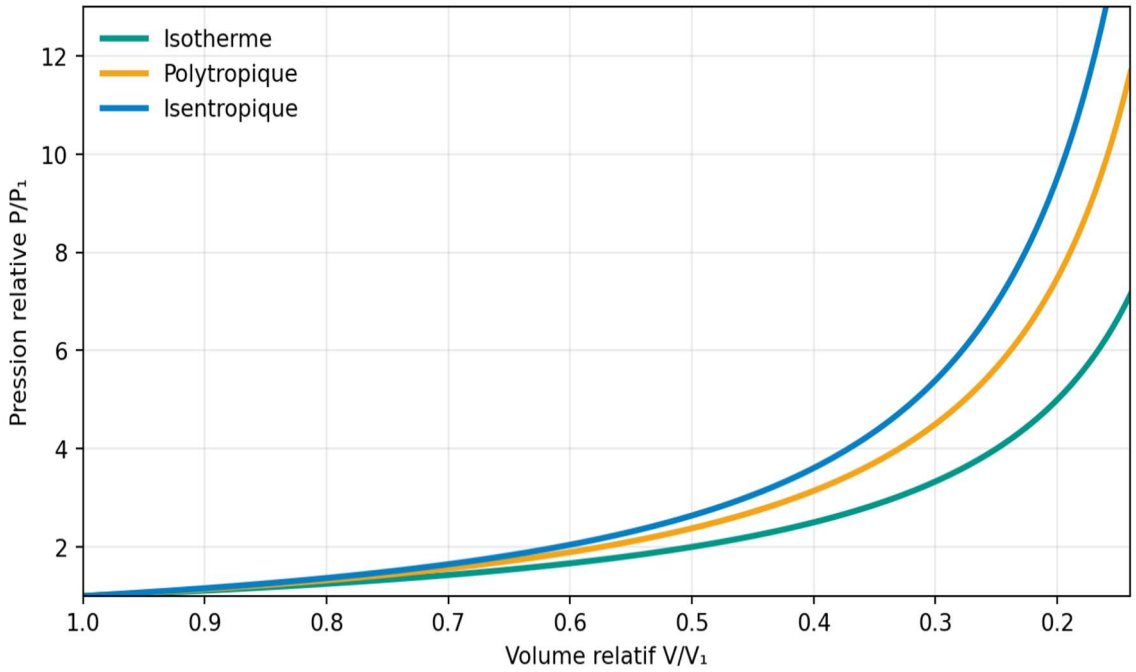
Gaz réel : aux fortes pressions, le facteur de compressibilité corrige le modèle idéal.

$$P \times V = Z \times m \times R \times T$$

Le facteur Z dépend de la pression, de la température et de la composition. Il devient indispensable pour le gaz naturel, le CO_2, l'hydrogène ou les fluides frigorigènes à haute pression.

Grandeur	Symbole	Unité SI
Pression absolue	P	Pa
Température absolue	T	K
Débit massique	$\dot{m}$	$kg \cdot s^{-1}$
Enthalpie massique	h	$J \cdot kg^{-1}$
Rapport de compression	$r_p = P_2/P_1$	-

3 Transformations de compression



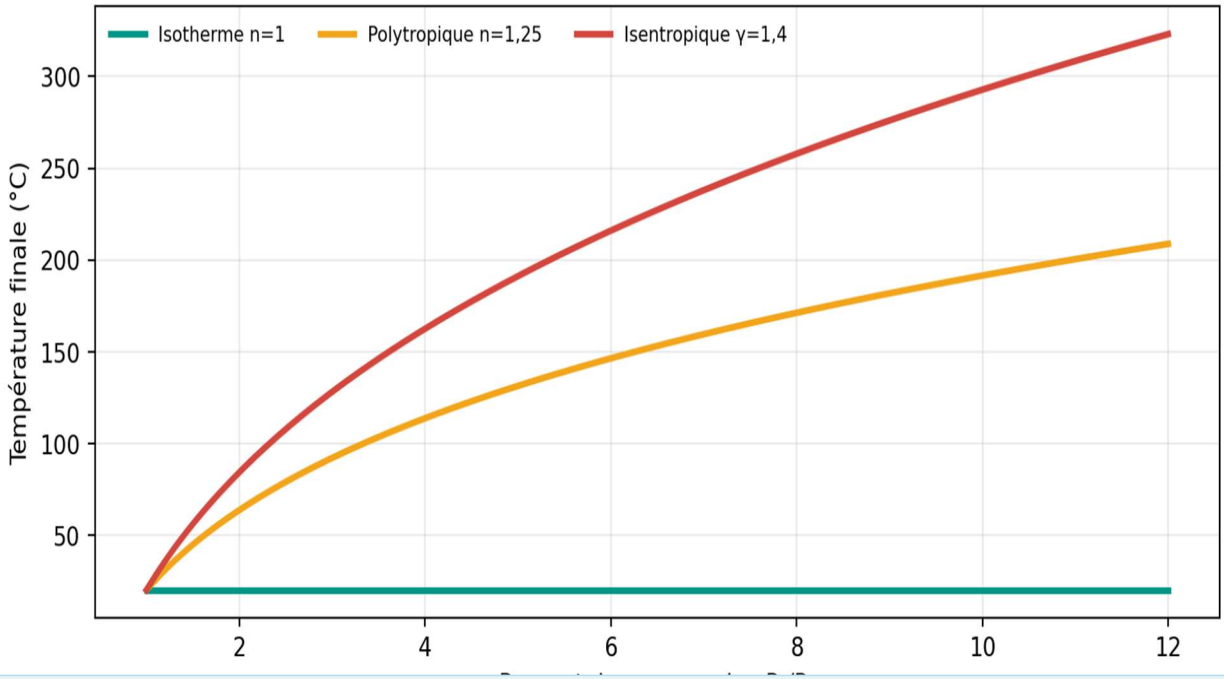
Transformation	Loi	Interprétation
Isotherme	PV = constante	Refroidissement parfait, travail minimal
Isentropique	PV^{γ} = constante	Adiabatique réversible, référence idéale
Polytropique	PV^{n} = constante	Modèle pratique de la compression réelle

$$\mathbf{T_2 = T_1 \times (P_2/P_1)^{((n-1)/n)}}$$

Pour une compression refroidie classique : $1 < n < \gamma$. Plus n se rapproche de 1, plus la compression se rapproche de l'isotherme.

4 Élévation de température

La température de refoulement augmente rapidement avec le rapport de compression. Cette contrainte gouverne souvent le nombre d'étages, le choix des matériaux et le refroidissement.



$$T_2is = T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{((\gamma-1)/\gamma)}$$

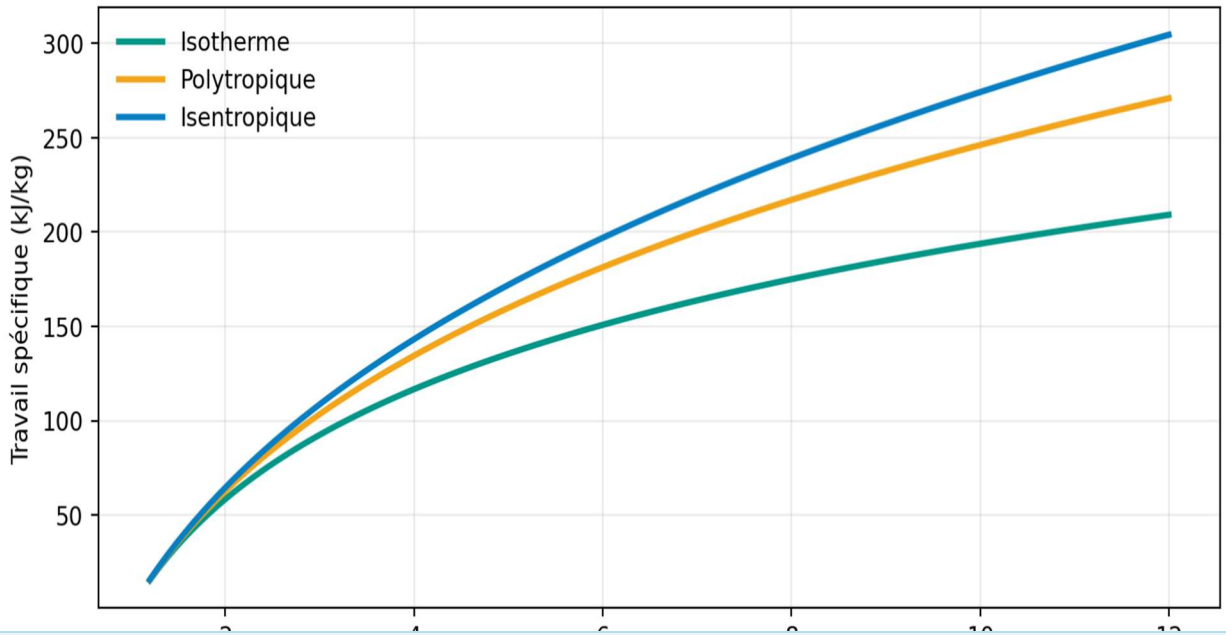
La température réelle est supérieure à la valeur isentropique :

$$T_2 = T_1 + (T_2is - T_1)/\eta_{is}$$

Conséquences d'une température excessive

Dégradation de l'huile, vieillissement des joints, dépôts, contraintes thermiques et, selon le gaz, risque d'inflammation ou de réaction chimique.

5 Travail et puissance de compression



$$w_{is} = \gamma/(\gamma - 1) \times R \times T_1 \times \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)-1}$$

$$\dot{W}gaz = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \approx \dot{m} \times Cp \times (T_2 - T_1)$$

La puissance électrique tient compte des rendements mécanique et moteur :

$$\dot{W}élec = \dot{W}gaz \ / (\eta_{méc} \times \eta_{moteur})$$

Lecture de la courbe

À rapport de compression donné, l'isotherme demande le travail minimal.
Le refroidissement pendant ou entre les étages rapproche la compression réelle de cette limite.

6 Technologies des compresseurs

Famille	Technologie	Domaine typique	Atout principal
Volumétrique	Piston	Faible/moyen débit, haute	Rapport élevé
Volumétrique	Vis	Débit moyen, service continu	Débit régulier
Volumétrique	Membrane	Gaz pur, toxique ou H_2	Étanchéité
Dynamique	Centrifuge	Débit élevé, pression par étages	Compacité
Dynamique	Axial	Très grand débit	Débit exceptionnel

Critères de choix

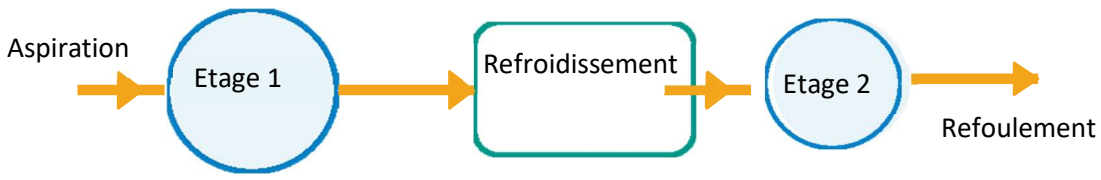
- débit massique et plage de variation ;
- pression d'aspiration, pression finale et nombre d'étages ;
- composition, masse molaire, corrosivité et inflammabilité ;
- présence de liquide, particules ou risque de condensation ;
- exigences de pureté, étanchéité, bruit et maintenance.

Règle générale

Les volumétriques dominent aux rapports de compression élevés et aux débits faibles à moyens. Les machines dynamiques deviennent avantageuses lorsque le débit est important.

7 Compression multiétagée

Compression biétagée avec refroidissement intermédiaire



P_i optimal $\approx \sqrt{(P_1 \cdot P_3)}$ • séparation des condensats entre les étages

Le refroidissement intermédiaire réduit le volume spécifique avant l'étage suivant. Le travail diminue, la température reste maîtrisée et les condensats peuvent être séparés.

Pour 2 étages :

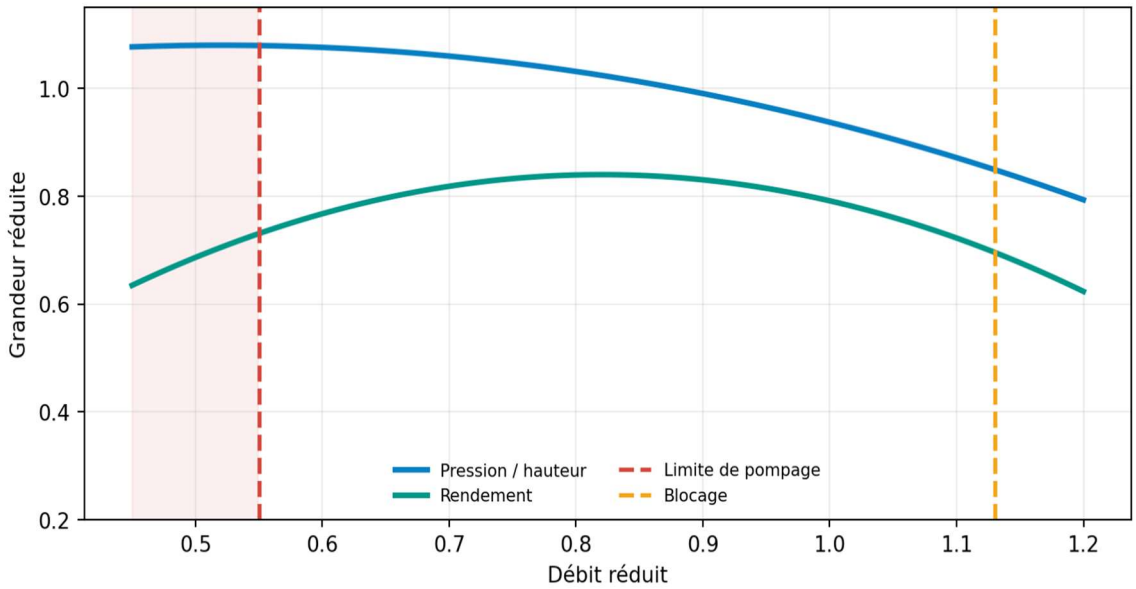
$$P_{i,\,opt} \approx \sqrt{(P_1 \times P_3)}$$

Pour N étages :

$$r_{p,\,étage} = \left(\frac{Psortie}{Pentrée}\right)^{\frac{1}{N}}$$

Énergie	Travail plus proche de l'isotherme
Fiabilité	Températures et efforts réduits
Qualité du gaz	Condensats retirés entre étages

8 Compresseur centrifuge : domaine stable



Pompage : A faible débit devient instable et provoque de graves vibrations endommageant le compresseur.

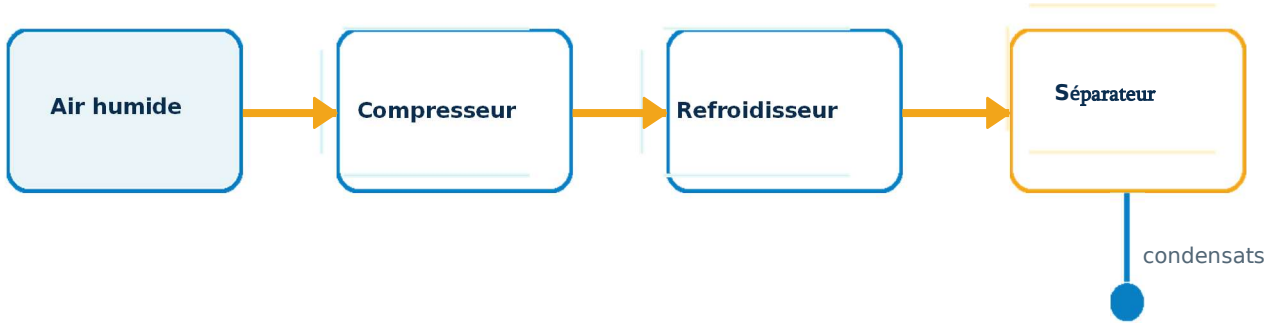
En général une boucle anti-pompage recycle rapidement une fraction du débit vers l'aspiration. Le point de fonctionnement doit conserver une marge suffisante par rapport à la ligne de pompage.

Blocage : Le débit ne peut plus augmenter lorsque Mach 1 est atteint localement.

9 Air humide et condensation

L'air atmosphérique contient de la vapeur d'eau. La compression augmente sa pression partielle, puis le refroidissement dans les échangeurs peut provoquer une condensation.

Chaîne de traitement de l'air comprimé



$$\dot{m}_{cond} = \dot{m}_{air\ sec} \times (x_{entrée} - x_{sortie})$$

Le traitement usuel associe refroidisseur final, séparateur, purge, filtres puis sécheur frigorifique ou à adsorption. Le point de rosée sous pression doit être choisi selon la température minimale du réseau.

Attention

Les condensats d'un compresseur lubrifié peuvent contenir de l'huile. Leur traitement doit respecter les exigences environnementales applicables.

10 Régulation et efficacité énergétique

Méthode	Principe	Performance énergétique
Marche/arrêt	Arrêt lorsque le stockage suffit	Bonne si cycles acceptables
Charge/à vide	Aspiration neutralisée à vide	Pertes importantes à vide
Étranglement	Réduction de la pression d'aspiration	Simple, mais dissipatif
By-pass	Recyclage vers l'aspiration	Sûr, mais énergivore
Variation de vitesse	Adaptation directe au besoin	Souvent la meilleure en charge variable

Principaux gisements d'économie

- réduire la pression du réseau au strict besoin ;
- rechercher et réparer les fuites ;
- limiter les pertes de charge dans filtres, sécheurs et tuyauteries ;
- récupérer la chaleur des refroidisseurs et de l'huile ;
- adapter la stratégie de régulation au profil de consommation.

Indicateur utile

Suivre l'énergie spécifique en kWh par m³ normal ou par kg de gaz permet de détecter dérives, encrassement et fonctionnement hors plage.

11 Étude de cas : compression d'air

Donnée	Valeur
Aspiration	1 bar(a), 20 °C
Refoulement	7 bar(a)
Débit massique	0,10 kg·s^{-1}
Rendement isentropique	0,80
Cp ; γ	Cp= 1,005 kJ·kg^{-1}·K^{-1} ; γ = 1,4

1. Température isentropique

$$T_{2s} = 293,15 \times \left(\frac{7}{1}\right)^{(1,4-1)/1,4} \approx 511\ K \approx 238\ °C$$

2. Température réelle

$$T_2 = 293,15 + (511-293,15)/0,80 \approx 565\ K \approx 292\ °C$$

3. Travail et puissance transmis au gaz

$$w \approx Cp \cdot (T_2 - T_1) \approx 273\ kJ \cdot kg^{-1}$$

$$\dot{W}gaz = 0{,}10 \times 273 \approx 27{,}3\ kW$$

Interprétation

La température calculée est très élevée. En pratique, on retiendra plusieurs étages, un refroidissement efficace et une vérification avec les propriétés réelles du gaz.

12 Gain d'une compression en deux étages

La pression intermédiaire optimale vaut environ $P_i = \sqrt{(1 \times 7)} = 2.65$ bar(a).

Configuration	Température maximale	Travail indicatif
1 étage	292 °C	274 kJ·kg⁻¹
2 étages + refroidissement parfait	137 °C	236 kJ·kg⁻¹

Résultat

Le refroidissement intermédiaire abaisse fortement la température maximale et réduit le travail de compression. Le gain réel dépend des pertes de charge, du rendement de chaque étage et de l'approche thermique des refroidisseurs.

Vérifications de conception

- pression intermédiaire réelle et pertes de charge ;
- température de sortie de chaque étage ;
- puissance moteur avec marge de service ;
- débit de refroidissement et puissance thermique à évacuer ;
- quantité de condensats et capacité des séparateurs.

13 Instrumentation, protection et sécurité

Grandeur surveillée	Risque détecté	Action typique
Pression refoulement	Blocage, vanne fermée	Alarme, arrêt, soupape
Température refoulement	Refroidissement insuffisant	Alarme et arrêt
Vibrations	Désalignement, pompage	Analyse vibratoire, trip
Pression d'huile	Défaut de lubrification	Arrêt immédiat
Point de rosée	Séchage insuffisant	Contrôle sécheur
ΔP filtres	Encrassement	Maintenance

Dispositifs indispensables
Soupapes dimensionnées, clapets anti-retour, arrêts haute température/pression, protection anti-pompage, surveillance de lubrification, purge sûre et équipements compatibles avec la classification de zone.

Pour les gaz inflammables, toxiques ou riches en oxygène, la sélection des matériaux, l'étanchéité, la ventilation, l'inertage et les procédures d'exploitation doivent faire l'objet d'une analyse de risques dédiée.

14 Méthode de dimensionnement

1	Définir le gaz : Composition, humidité, impuretés, masse molaire
2	Fixer le service : P_1, T_1, P_2, débit, variations, durée
3	Choisir le modèle : Gaz parfait ou réel, Z et propriétés
4	Répartir les étages : Rapports, P intermédiaires, refroidissement
5	Calculer : T sorties, puissance, chaleur, condensats
6	Sélectionner : Technologie, carte, moteur, auxiliaires
7	Sécuriser : Soupapes, anti-pompage, instrumentation
8	Valider : Cas dégradés, démarrage, tmaintenance

Bonne pratique

Le calcul thermodynamique fournit un point de départ. La sélection finale doit être confirmée par les cartes constructeur et les propriétés réelles du gaz sur toute la plage de fonctionnement.

15 Synthèse et formules essentielles

Objet	Relation
Gaz parfait	$P \times V = m \times R \times T$
Gaz réel	$P \times V = Z \times m \times R \times T$
Rapport de compression	$r_p = P_2/P_1$
Température polytropique	$\frac{T_2}{T_1} = r_p^{((n-1)/n)}$
Température réelle	$T_2 = T_1 + (T_{2s} - T_1)/\eta_{is}$
Puissance gaz	$\dot{W} = \dot{m} \times (h_2 - h_1)$
Pression intermédiaire, 2 étages	$P_i \approx \sqrt{(P_1 P_3)}$

À retenir

- Employer les pressions absolues et les températures en kelvins.
- La température augmente fortement avec le rapport de compression.
- Le refroidissement et la compression multiétagée réduisent le travail.
- Le choix de la machine dépend autant du débit que de la pression et du gaz.
- Les propriétés réelles deviennent essentielles à haute pression.
- L'efficacité globale inclut régulation, refroidissement, traitement et fuites.

Conclusion

Une installation performante associe un calcul thermodynamique juste, une technologie adaptée, une exploitation dans le domaine stable et une maîtrise continue de l'énergie et de la sécurité.

Quelques références.

1. Thermodynamique de la compression des gaz
Référence 1 – Éléments de thermodynamique technique

- Éditeur : Presses universitaires de Louvain.
- Chapitre 8 : La compression des gaz.
- Contenu :
  - Compression isentropique et polytropique.
  - Compression dans les compresseurs centrifuges.
  - Compression dans les compresseurs à piston.
  - Travail de compression et puissance absorbée.
  - Compression multiétagée avec refroidissement intermédiaire.

2 – Thermodynamique des machines à fluide compressible

- Auteur : G. Brun.
- Éditeur : J. & R. Sennac.
- Langue : français.
- Contenu : propriétés des gaz, transformations thermodynamiques, écoulements compressibles, rendement et fonctionnement des machines à fluide compressible.

3- Thermodynamique de compression
Compression et détente des gaz ou des vapeurs – André Lallemand

- Éditeur : Techniques de l'Ingénieur.
- Contenu : compression isotherme, isentropique et polytropique, travail de compression, compression étagée et refroidissement intermédiaire.

4- Compressors: Selection and Sizing
Dimensionnement

- Auteur : Royce N. Brown.
- Éditeur : Gulf Professional Publishing.
- Contenu : sélection des compresseurs, calcul des performances, dimensionnement et choix technologiques.
- Intérêt : référence pratique pour les ingénieurs procédés et bureaux d'études.
- Langue : anglais.

5- Compressors: Selection and Sizing
Compresseurs industriels

- Auteur : R. N. Brown.
- Éditeur : Gulf Publishing Company.
- Contenu : compresseurs alternatifs, centrifuges et rotatifs, critères de sélection et applications industrielles.
- Intérêt : documentation pratique pour les installations pétrolières et gazières.
- Langue : anglais.

6- Handbook of Compressor Technology
Technologies de compression

- Auteur : Nicholas P. Cheremisinoff.
- Éditeur : Marcel Dekker.
- Contenu : technologies de compression, caractéristiques des machines, applications industrielles et performances.
- Intérêt : approfondissement des différentes technologies de compression.
- Langue : anglais.