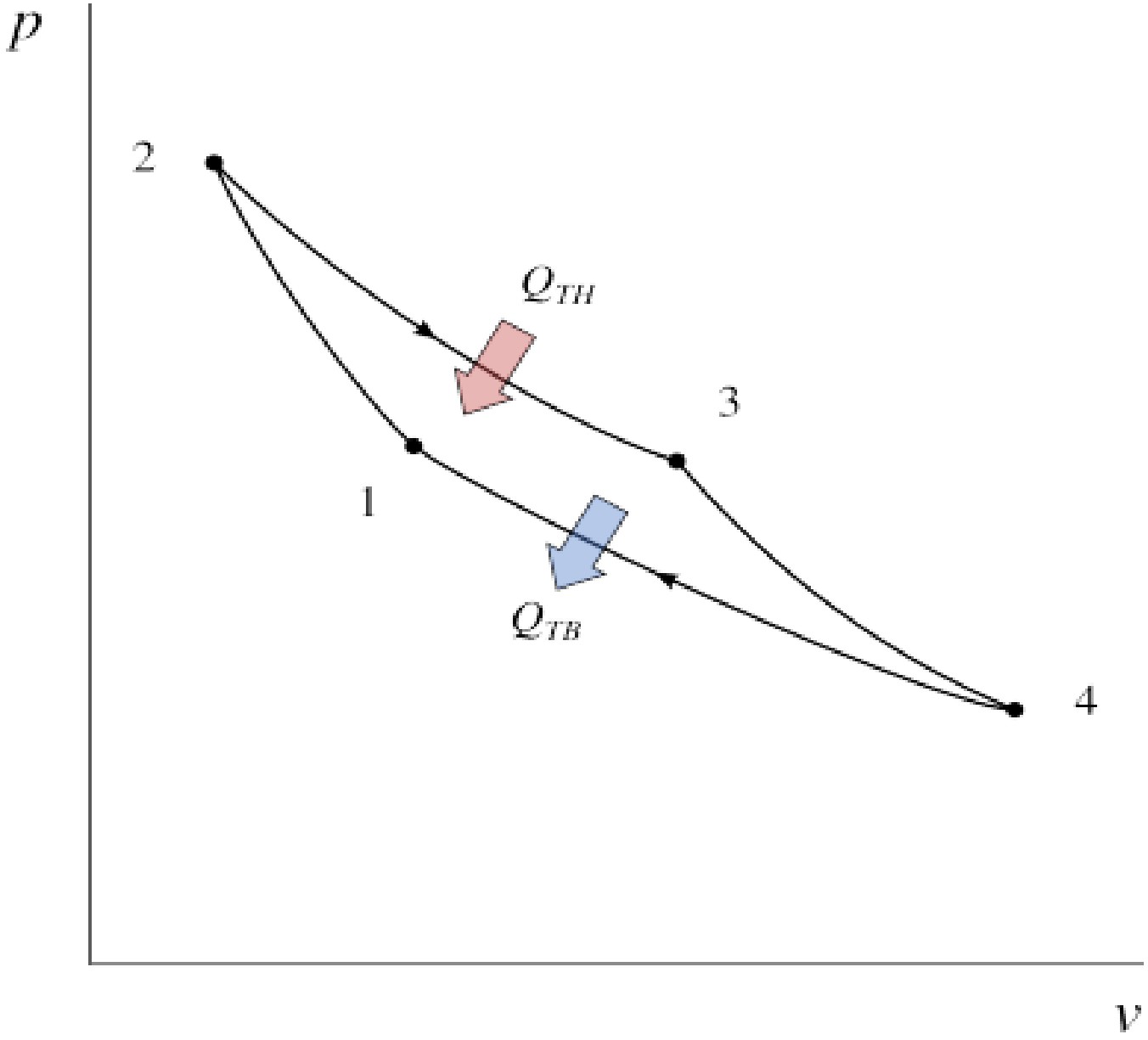
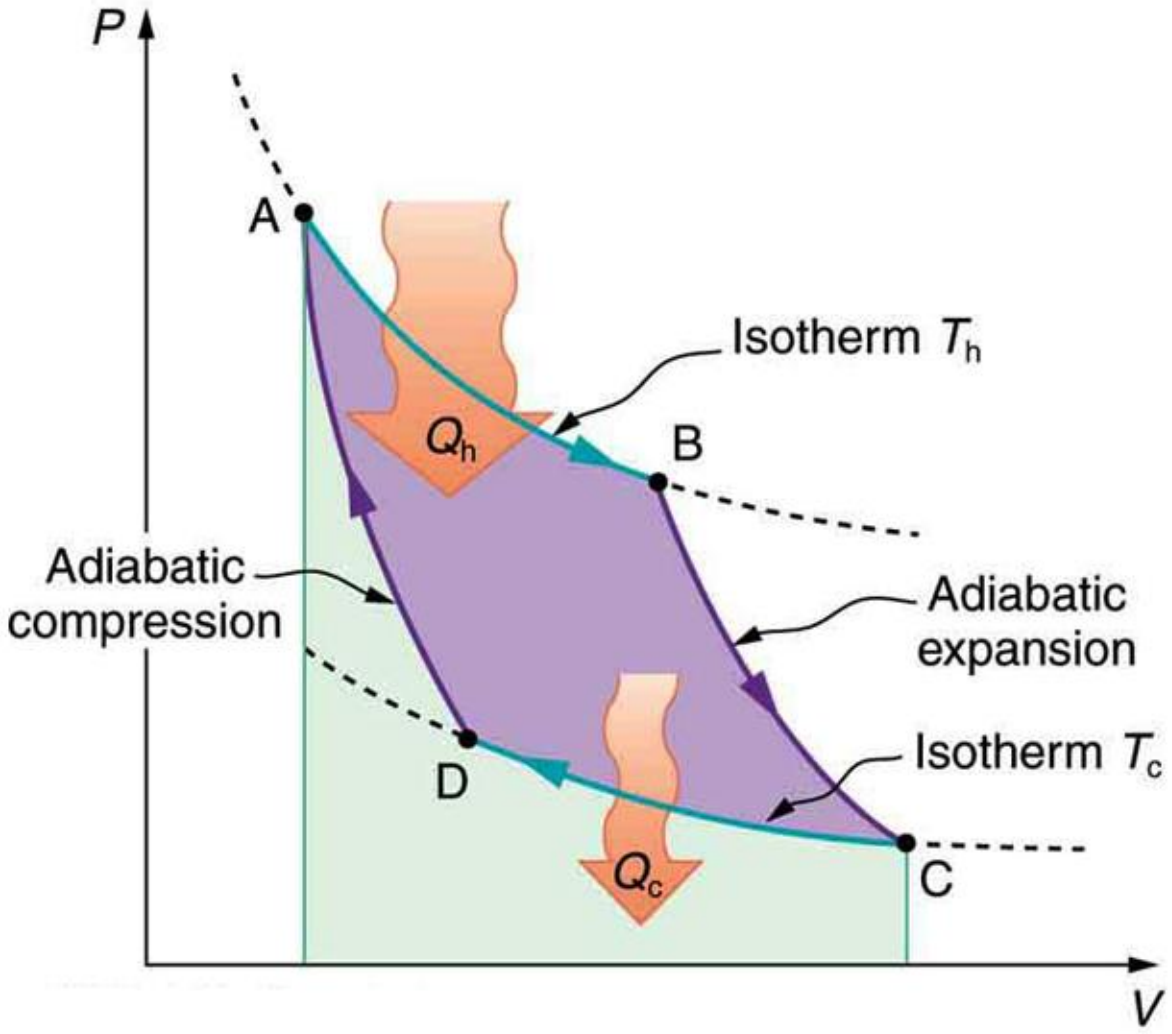


– Diagramme pression-volume du moteur de Carnot réalisé avec un gaz parfait. Les évolutions 2 → 3 et 4 → 1 se font respectivement à T_H et T_B.

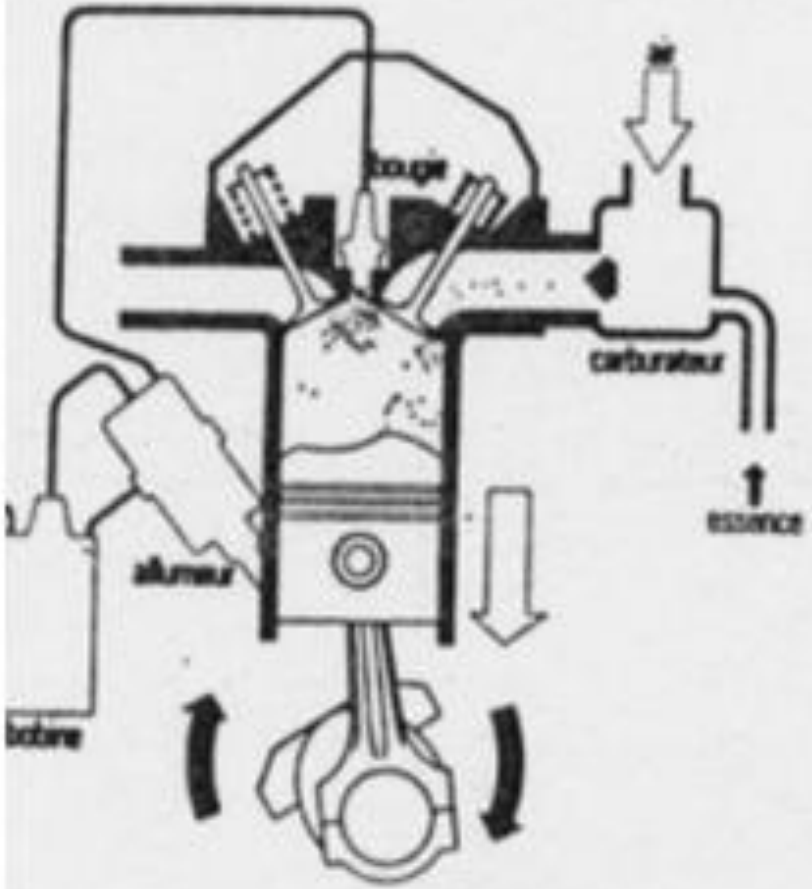


Created by Paint X

Moteur à explosion quatre temps

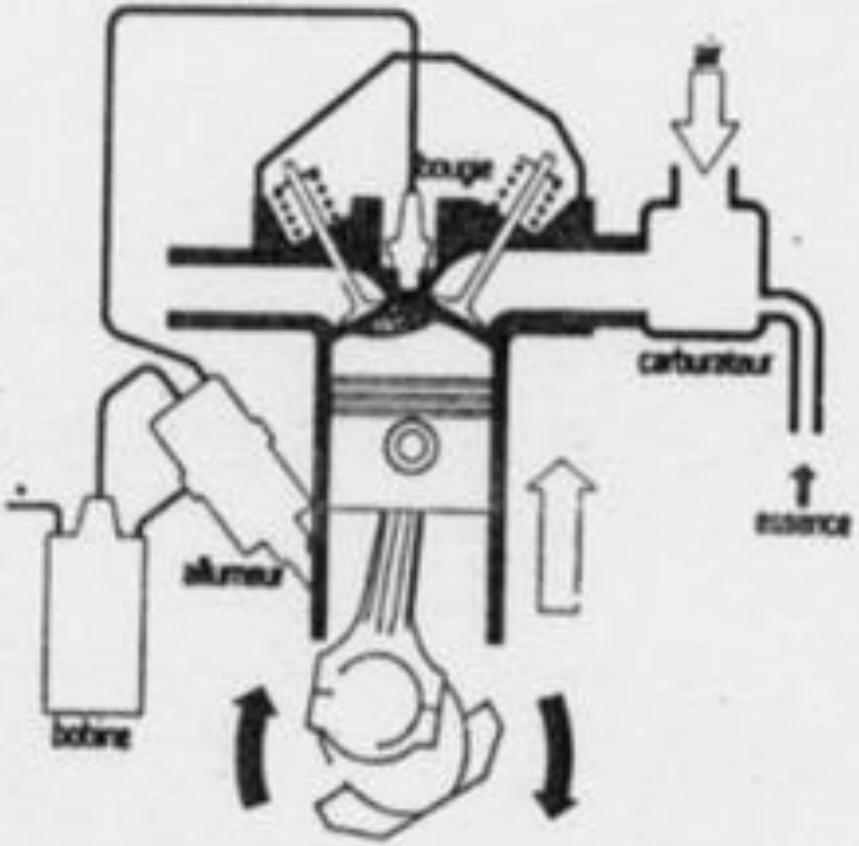
1er temps : admission du mélange air–essence
2ème temps : compression (adiabatique car rapide)
3ème temps : explosion et détente
4ème temps : échappement

Aspiration d'un
mélange air + essence



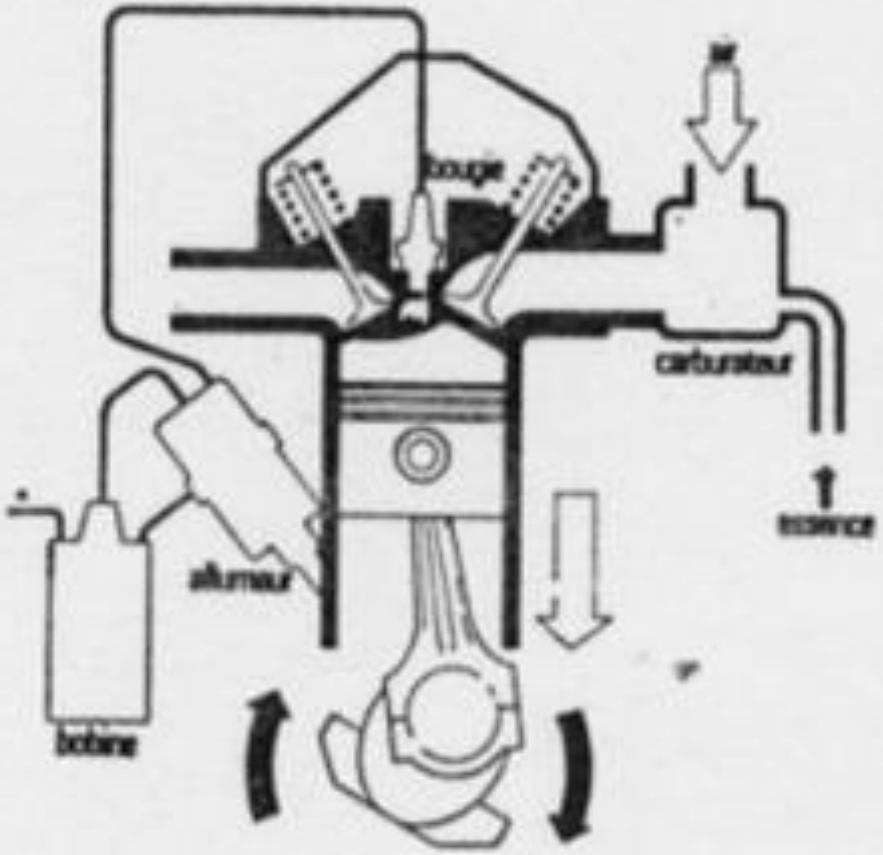
ADMISSION

Compression du mélange air_essence
(10 à 15 bars température 300° C environ)
Rapport volumétrique de 7 à 10



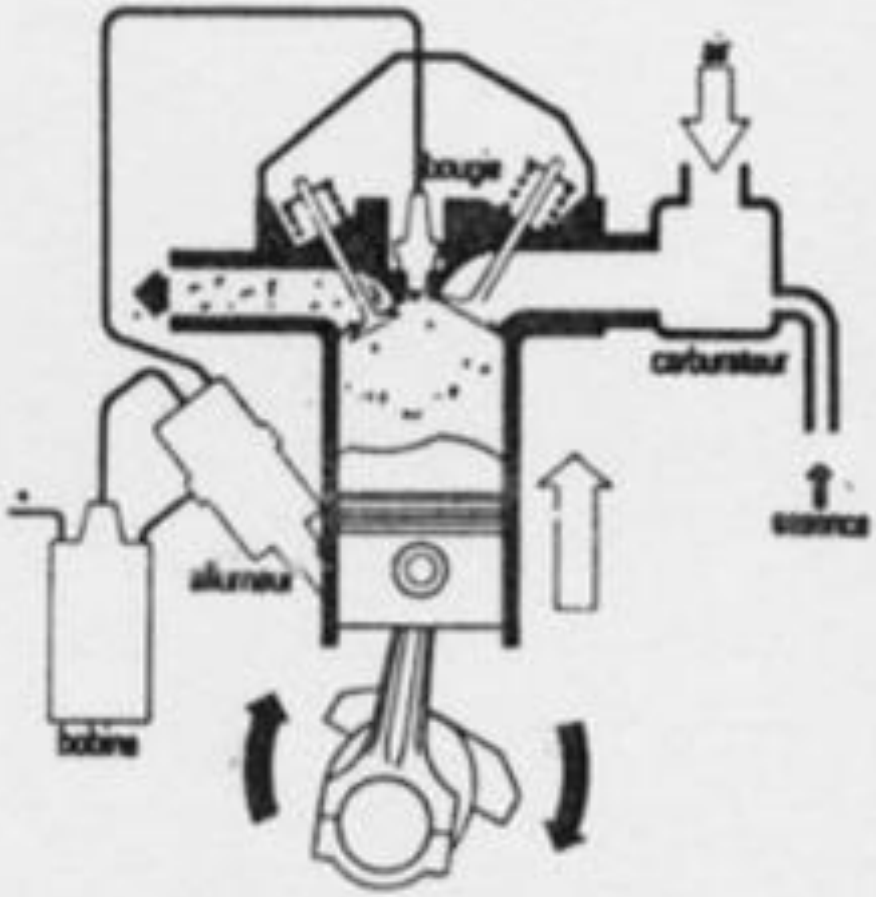
COMPRESSION

Allumage du mélange air_essence
par étincelle électrique



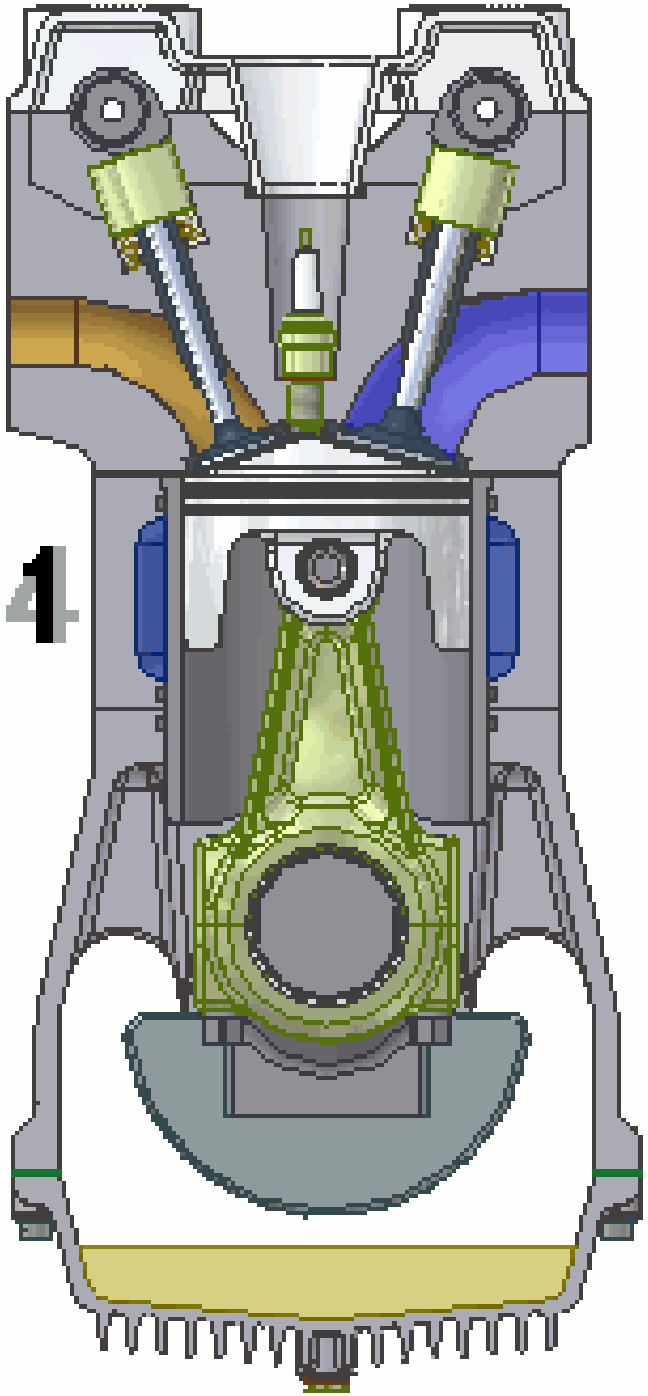
EXPLOSION DÉTENTE

Evacuation des gaz brûlés



ÉCHAPPEMENT

SPARK
PLUG
INLET
VALVES
OUTLET
VALVES


1

Remarques

Quelle est la valeur angulaire d'un temps ?

180°

Quelle est la valeur angulaire d'un cycle ?

4 x 180° = 720° soit 2 tours moteur

Combien de fois s'est ouverte chaque soupape pendant un cycle ?

1 fois

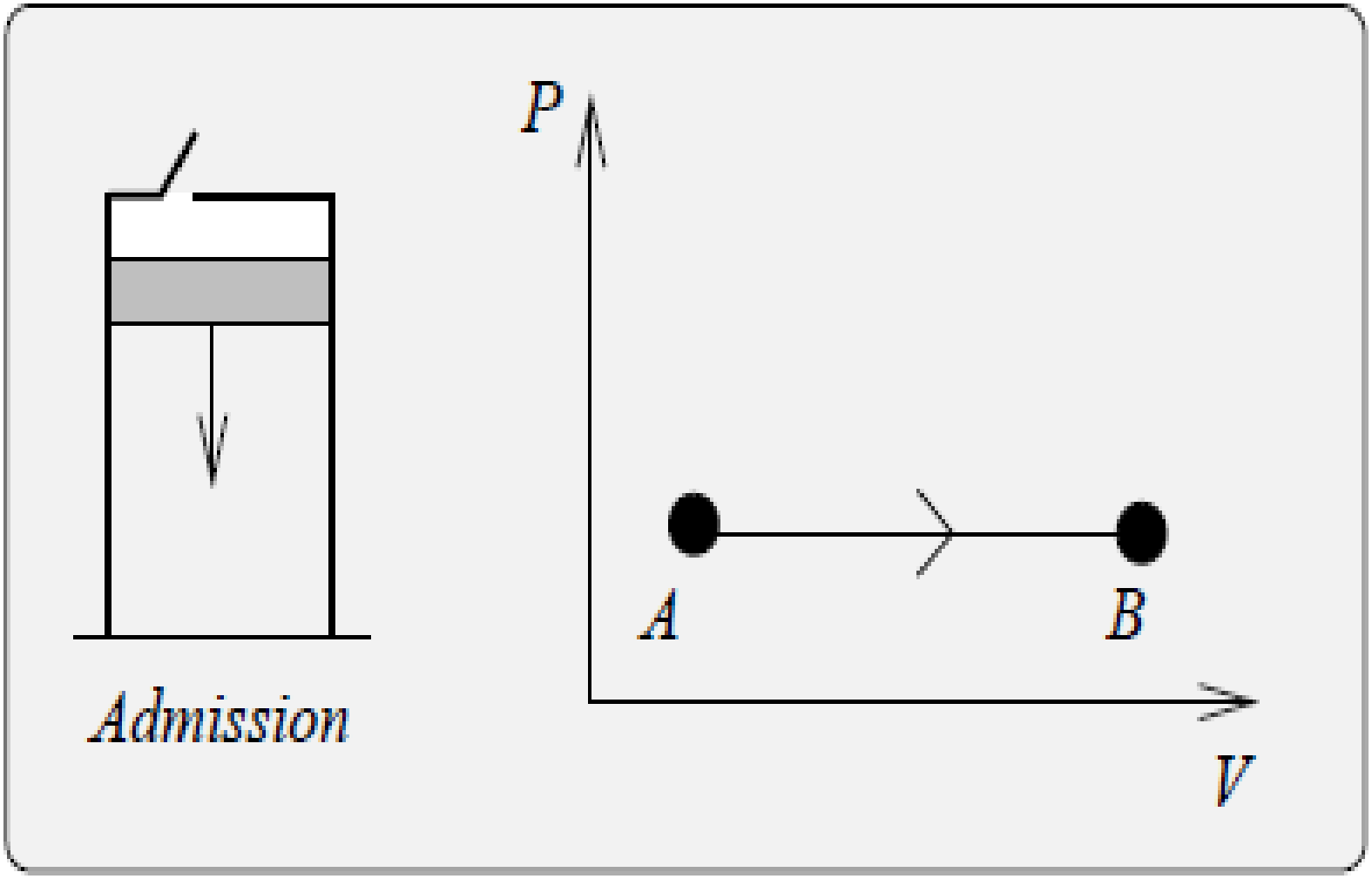
Pendant un cycle, combien de tours doit faire l'organe mécanique qui commande chaque soupape ?

1 tour

Comment s'appelle cet organe ?

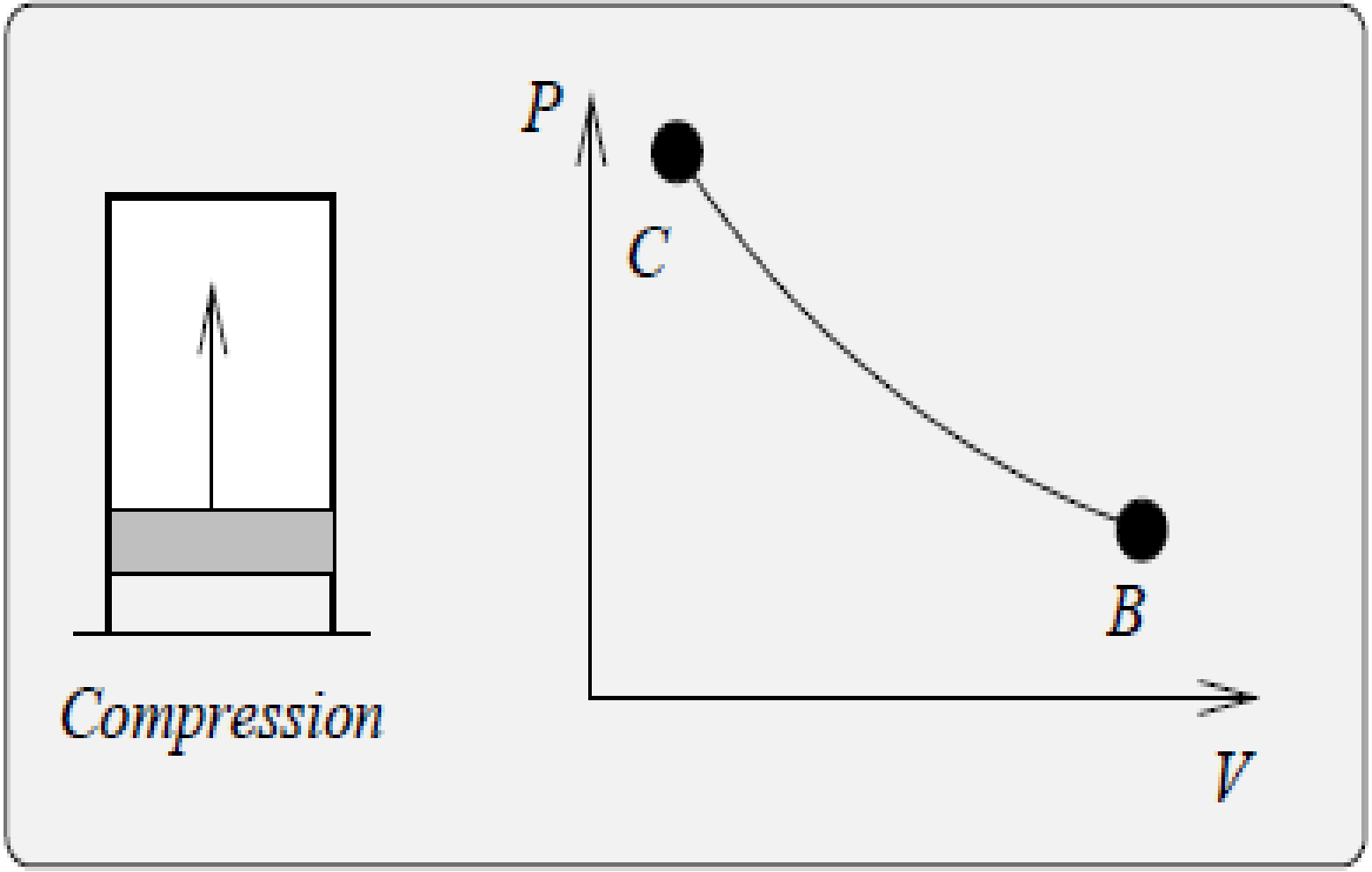
L'arbre à came

1er temps : admission



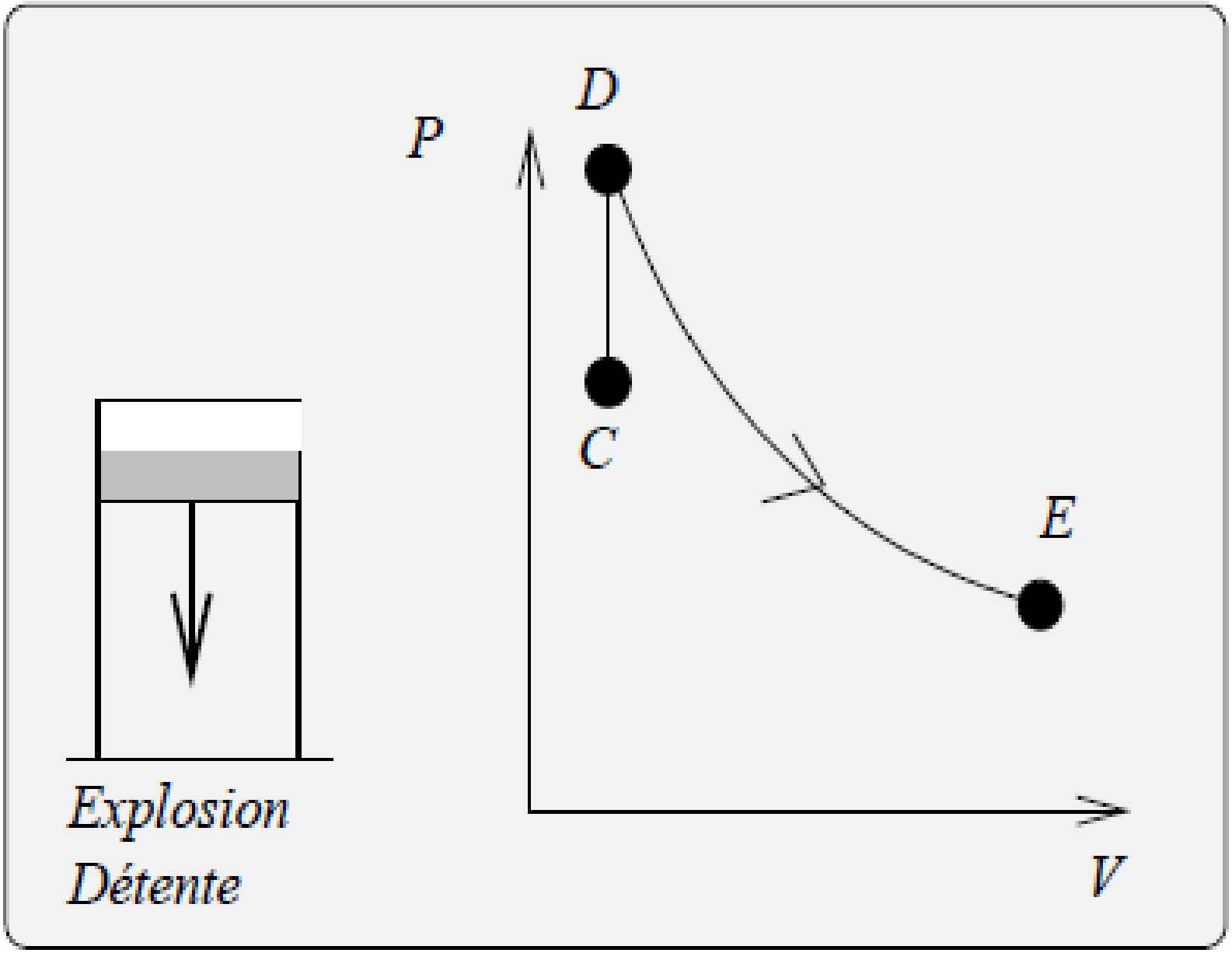
Le piston aspire le mélange gazeux à pression constante

2e temps : compression

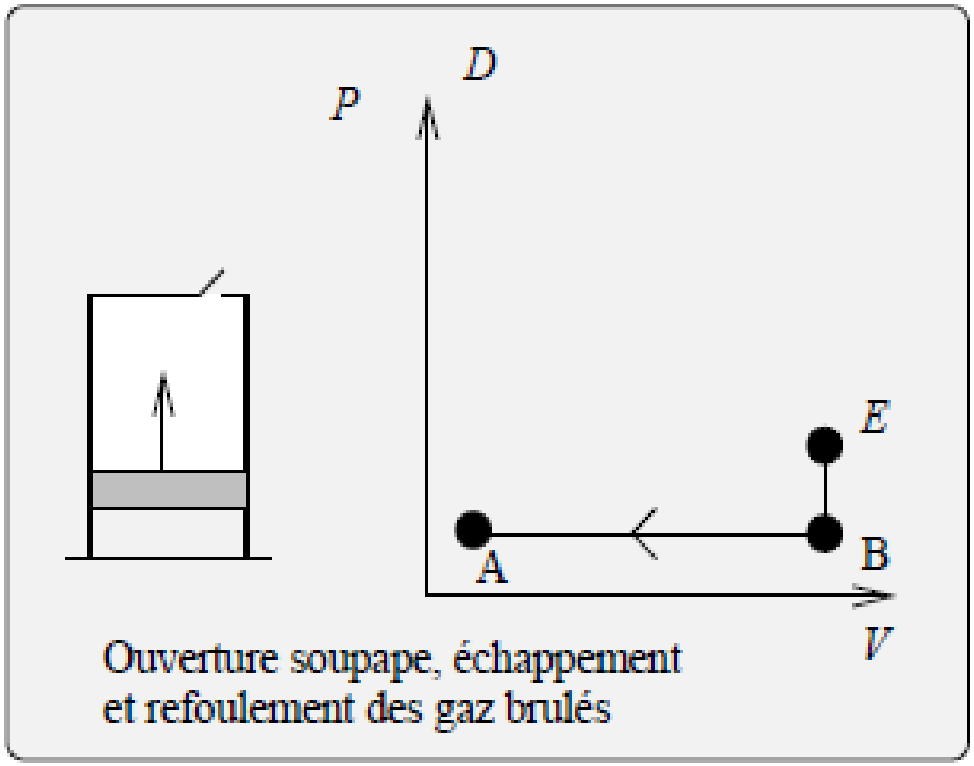


Le piston comprime de façon **adiabatique** le mélange.

3e temps : Explosion-détente



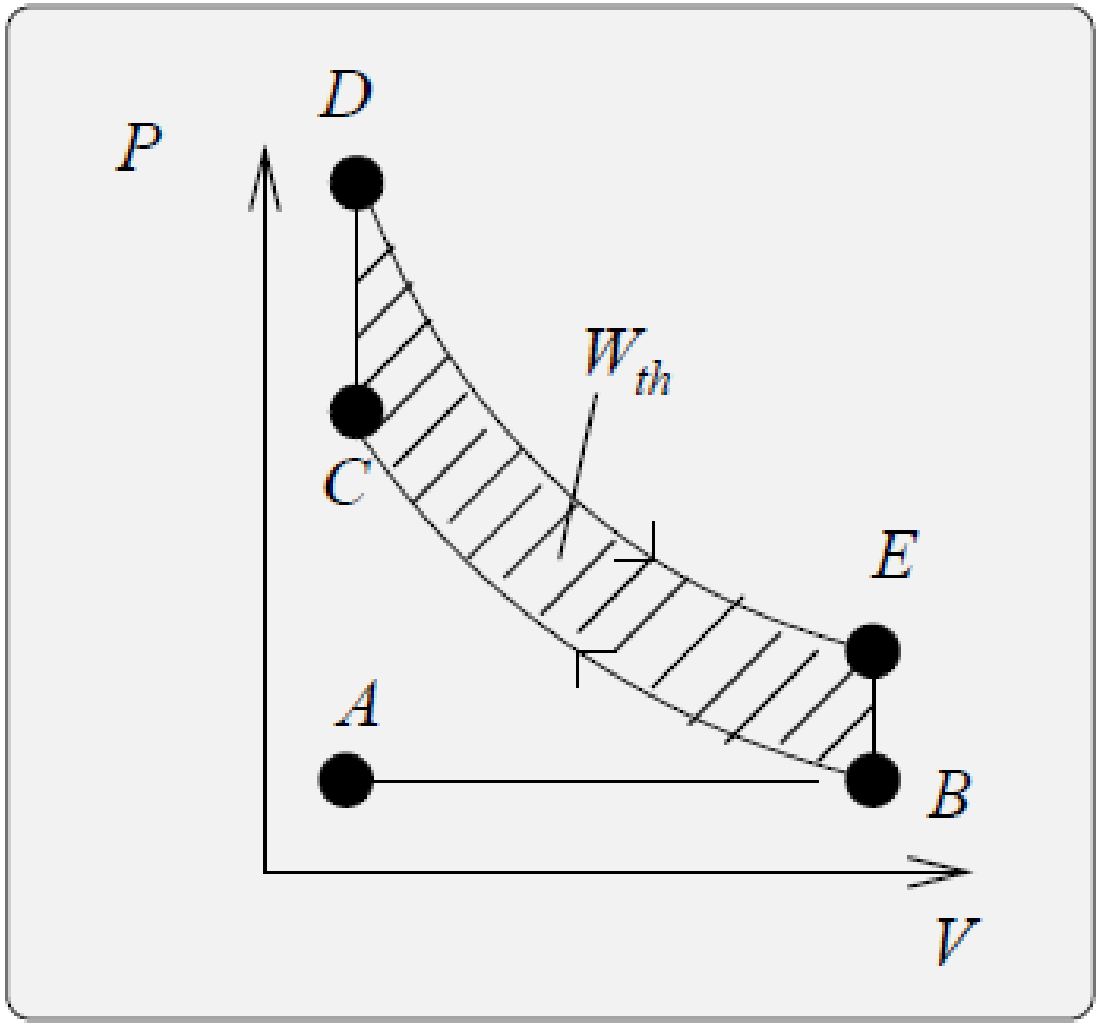
La combustion étant très rapide, le volume n'a pas le temps de varier : la pression augmente rapidement de C en D. Puis la combustion est suivie d'une détente adiabatique de D en E.



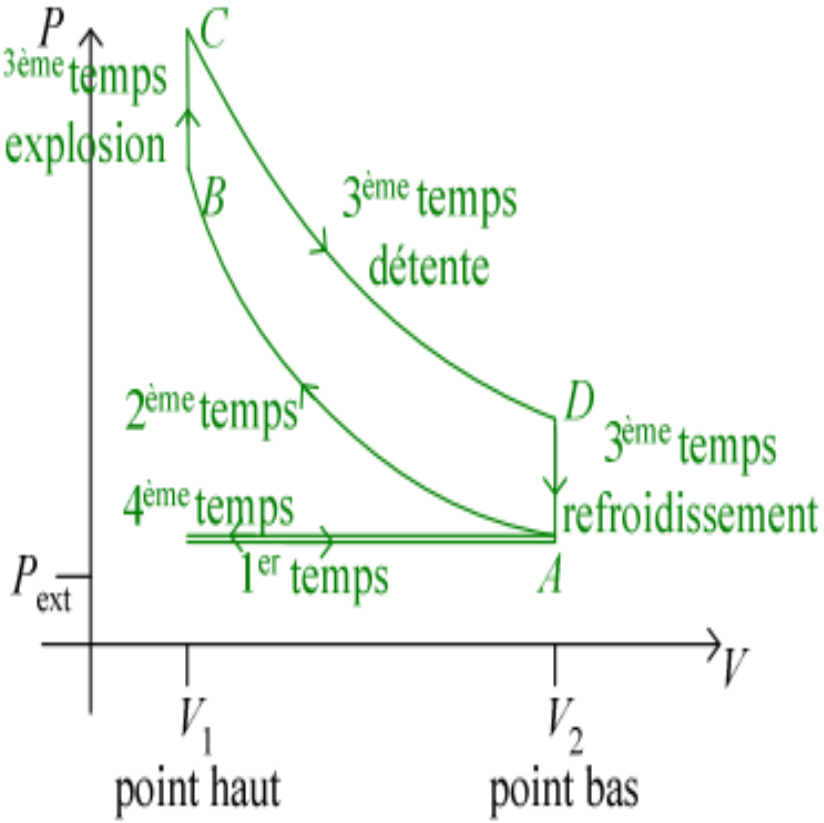
Le piston se déplace en chassant à pression constante les produits de combustion jusqu'au moment ou il revient au point de départ du cycle.

Cycle de Beau de Rochas : description

Ce cycle se compose de deux transformations **isentropiques** et de deux transformations **isochores**.



Le système est le gaz situé à l'intérieur de la chambre de combustion



Cycle de Beau de Rochas (fonctionnement idéalisé du moteur à quatre temps)

1) admission à P constante

2) compression adiabatique, réversible (pour pouvoir la représenter)

3) explosion instantanée isochore puis détente adiabatique réversible

4) évacuation à P constante

Bilan énergétique

Seul le cycle *ABCDA* participe aux échanges énergétiques.

On considère le système air+essence dans la chambre de combustion, fermé (pendant le cycle) ; on considère ce mélange comme un gaz parfait, avec γ indépendant de T

$$AB : Q_{AB} = 0 \text{ (adiabatique)} \quad W_{AB} = \Delta U_{AB} = nC_{m,V}(T_B - T_A) = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_B - T_A)$$

$$BC : Q_{BC} = \Delta U_{BC} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_C - T_B) \quad \text{(isochore)} \quad W_{BC} = 0$$

$$CD : Q_{CD} = 0 \text{ (adiabatique)} \quad W_{CD} = \Delta U_{CD} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_D - T_C)$$

$$DA : Q_{DA} = \Delta U_{DA} = \frac{nR}{\gamma - 1}(T_A - T_D) \quad W_{DA} = 0$$

Pour le cycle :

$W = W_{AB} + W_{CD}$

$Q = Q_{BC} + Q_{DA}$

Q_{BC} : chaleur libérée par l'explosion de l'essence (payé)

Q_{DA} : chaleur cédée à la source froide (atmosphère extérieure)

$$r = \frac{-W}{Q_{BC}} = \frac{-\frac{nR}{\gamma - 1}\left(T_B - T_A + T_D - T_C\right)}{\frac{nR}{\gamma - 1}\left(T_C - T_B\right)} = 1 + \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B}$$

Les transformations AB et CD sont adiabatiques réversibles.
Donc, d'après la loi de Laplace, on a :

$$TV^{\gamma-1} = cte$$

$$\frac{T_A}{T_B} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} = a^{1-\gamma} \quad (a : \text{rapport de compression volumétrique} = \frac{V_{max}}{V_{min}})$$

$$\frac{T_D}{T_C} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} = a^{1-\gamma}$$

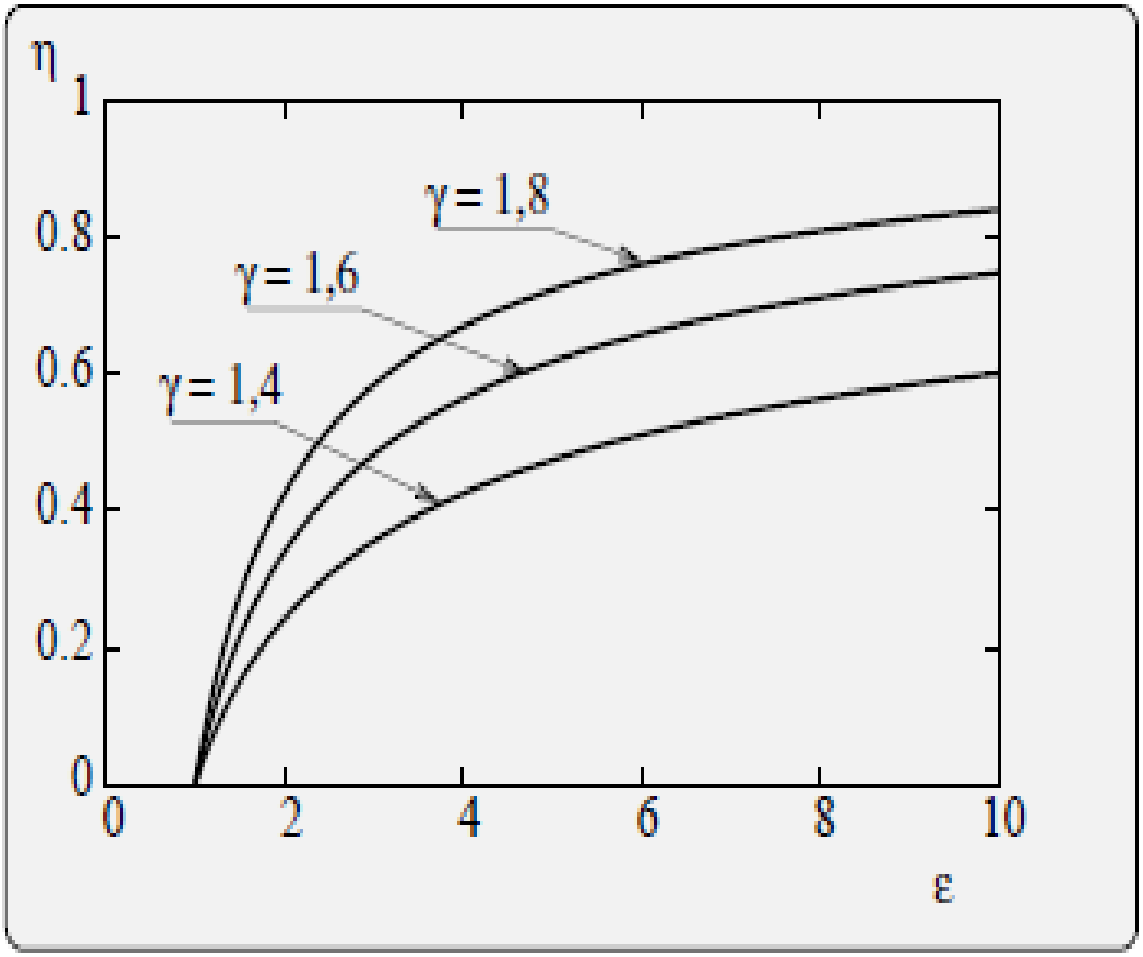
$$\Rightarrow \quad \frac{T_A - T_D}{T_B - T_C} = a^{1-\gamma} \Rightarrow \frac{T_A - T_D}{T_C - T_B} = -a^{1-\gamma}$$

Donc $\boxed{r = 1 - a^{1-\gamma}}$

Application numérique :
Pour $a = 9$ et $\gamma = 1{,}4$ on a $r = 58{,}5\%$

Évolution du rendement en fonction du rapport volumétrique ε

$$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$



Conclusion :

Le rendement de ce cycle croît avec :

- le rapport volumétrique,
- le rapport γ.

Le rapport γ du mélange varie entre $1,4$ pour l'air et $1,28$ pour le mélange air-carburant. Lorsque la richesse du carburant décroît, γ augmente. Cette augmentation de γ provoque une augmentation du rendement. Si l'on souhaite augmenter le rendement, on a donc intérêt à diminuer la richesse du carburant.

Cycle diésel

Description

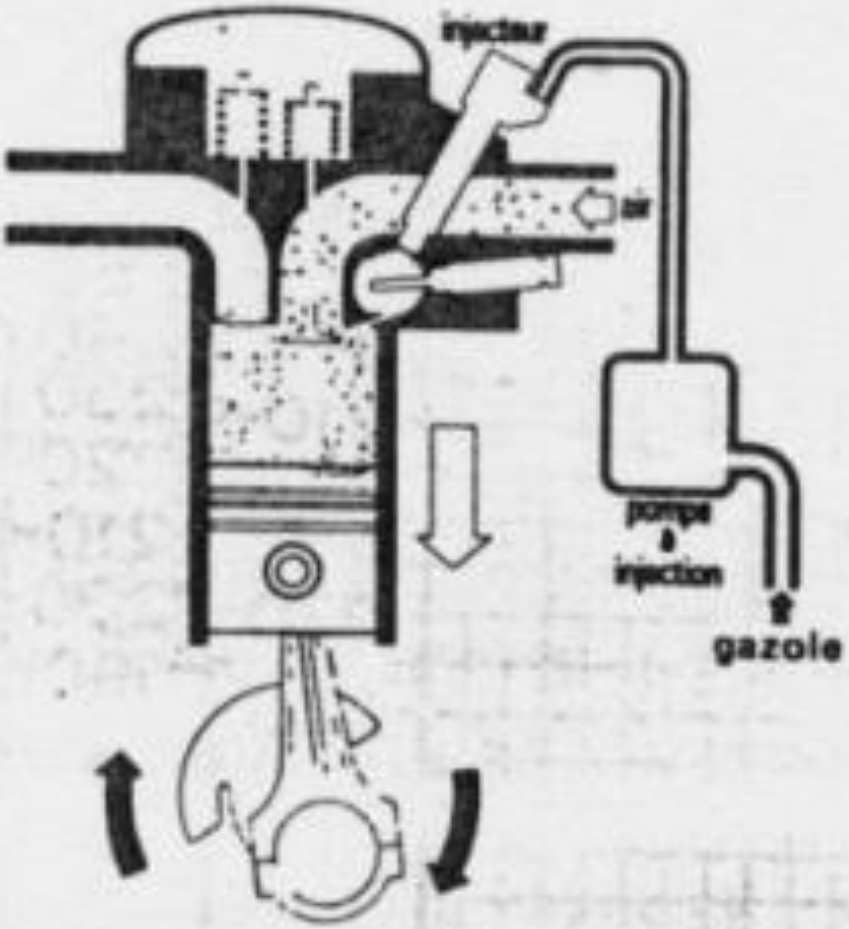
Ce moteur à combustion interne fonctionne par allumage spontané du gazole injecté dans l'air préalablement comprimé, sous pression élevée. Cette forte compression appliquée à l'air seul ne présente aucun risque d'inflamation. Le taux de compression peut atteindre la valeur de 20. Le carburant nécessite un raffinage moins poussé que celui de l'essence.

Moteurs Diesel

Les moteurs Diesel, dont la combustion est déclenchée par l'injection de gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé (T° élevée) ; il se produit alors une auto-inflammation, ce qui signifie que le mélange s'enflamme spontanément.

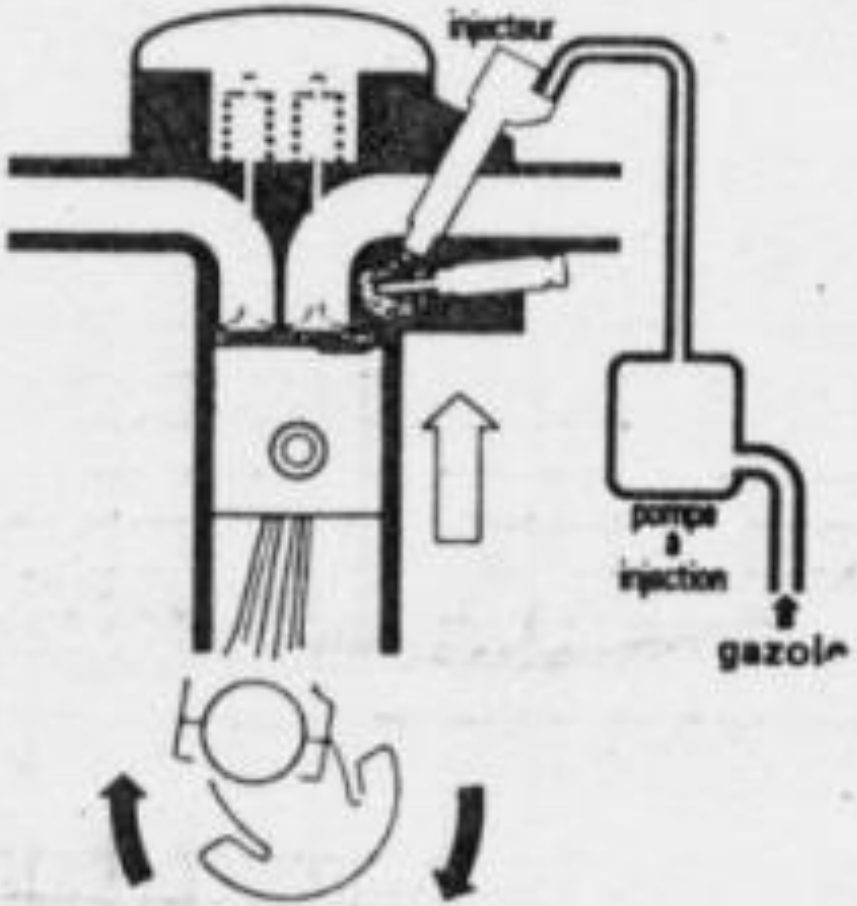
Cycle à 4 temps d'un moteur Diesel

Aspiration d'air



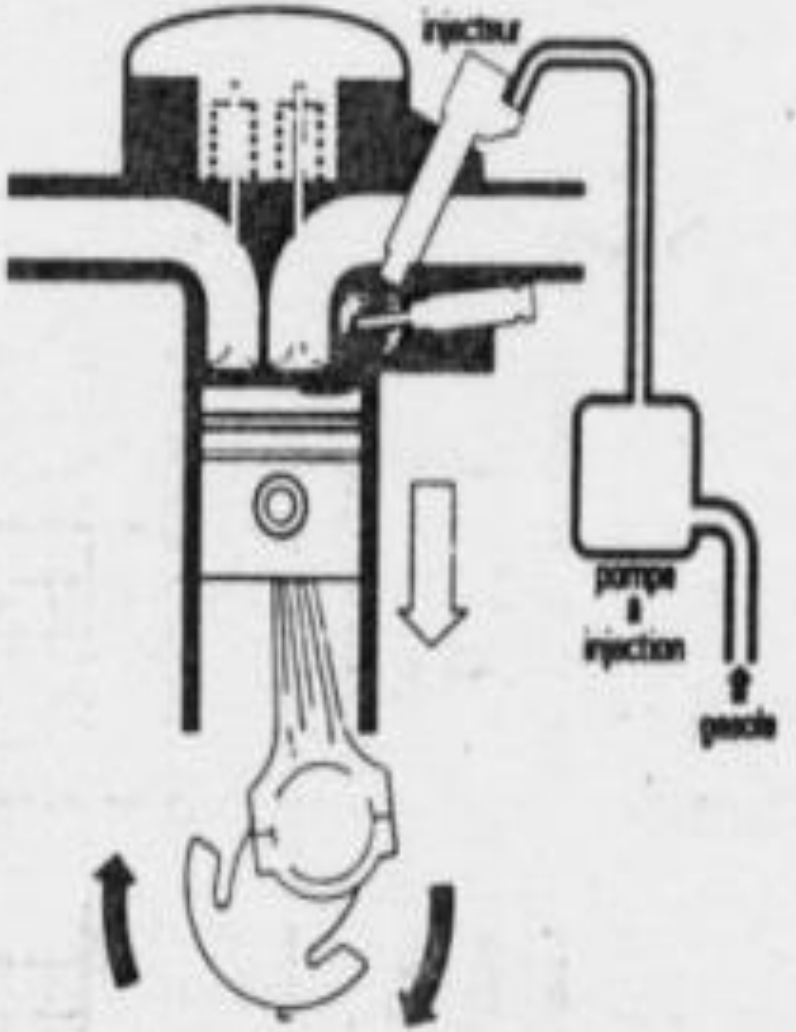
ADMISSION

Compression élevée de l'air
(30 à 40 bars température 600°C environ)
Rapport volumétrique de 18 à 22

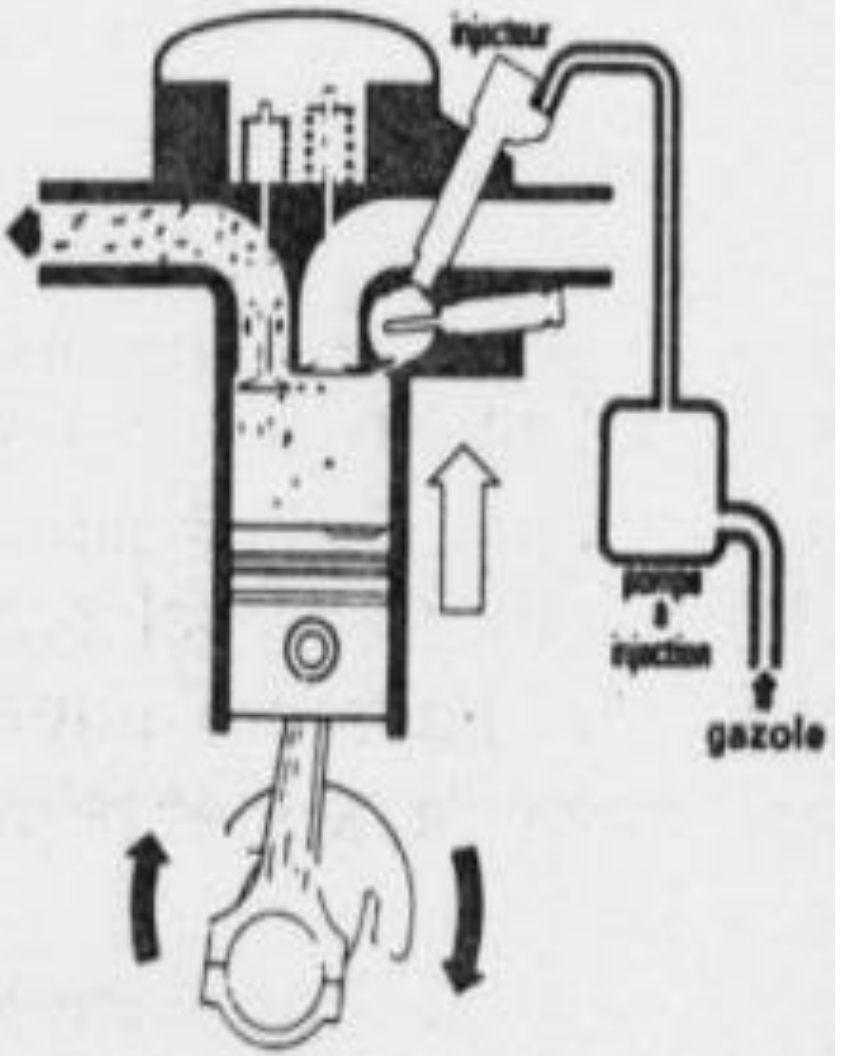


COMPRESSION

Injection de gazole sous forte pression (100 à 175 bars) qui s'enflamme au contact de l'air surchauffé



Evacuation des gaz brûlés

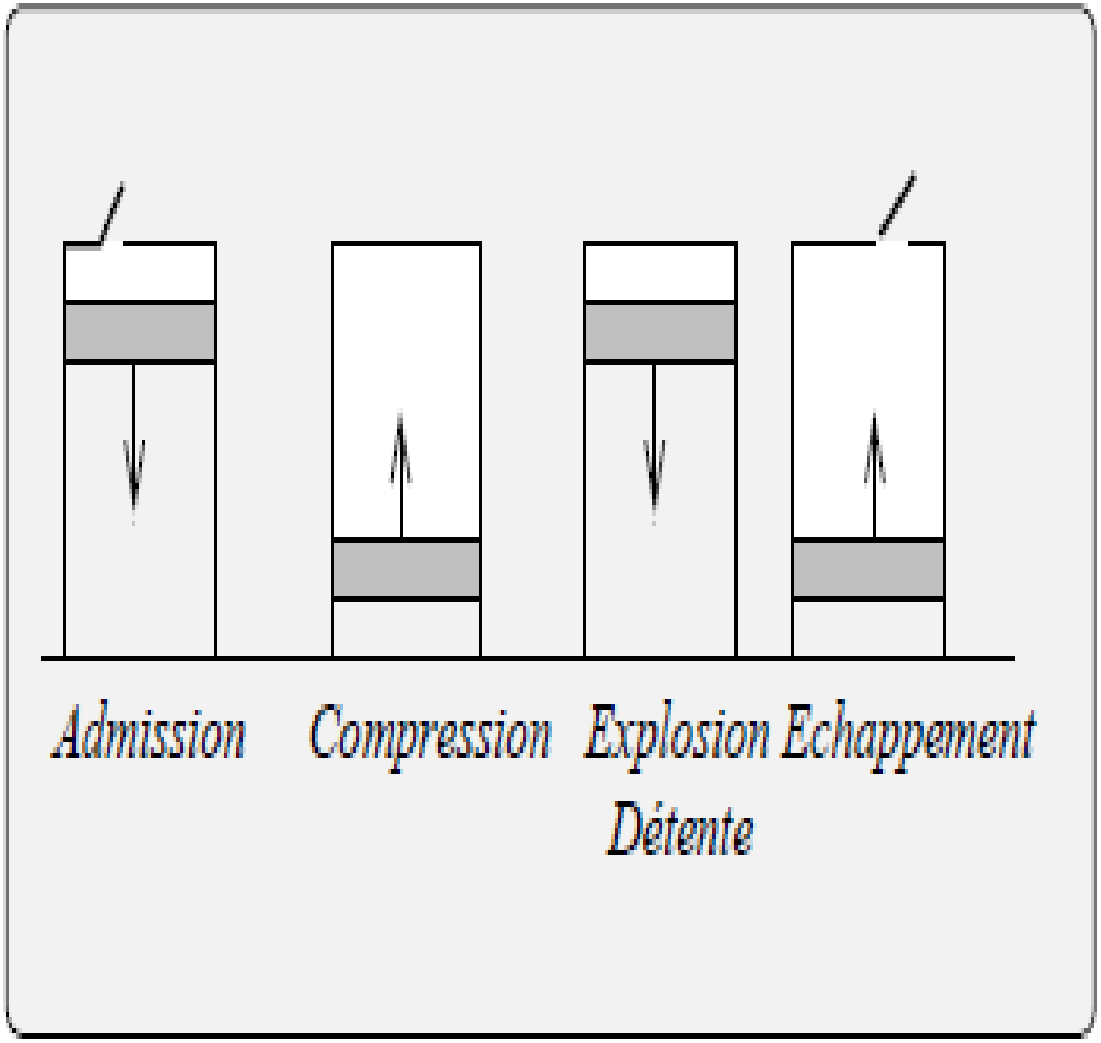


cycle de Diesel - : moteur à essence Diesel (essence plus lourde, moins raffinée et moins chère) mais au pouvoir calorifique plus important (plus de carbone) , allumage par compression sans bougies. Le carburant est injecté sous pression dans la chambre de combustion contenant l'air préalablement comprimé et chaud au contact duquel il s'enflamme spontanément.

Le cycle est limité par deux isentropiques, une isochore et une isobare, le contact avec la source froide se faisant le long de l'isochore .
Injection en 2 ; Dans un diesel il y a une portion isobare à la place de l'isochore du moteur à essence car le carburant est injecté progressivement sous pression constante

Les moteurs à explosion ou les moteurs diesels peuvent être turbocompressés dans ce cas l'énergie cinétique des gaz d'échappement est récupérée pour faire tourner une turbine qui comprime le comburant air (on parle de suralimentation)

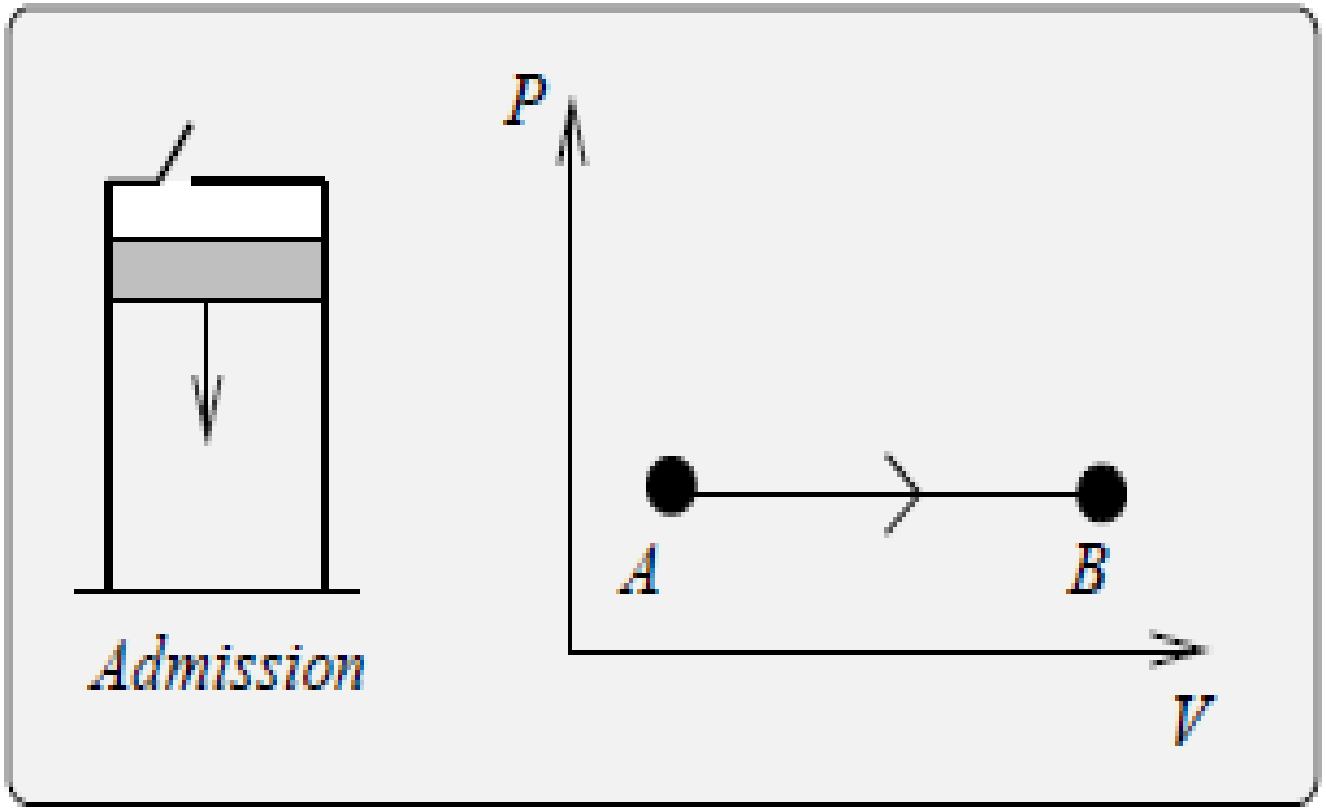
Comme le moteur à essence le moteur Diésel est un moteur à quatre temps :



Le moteur à 4 temps - Diesel

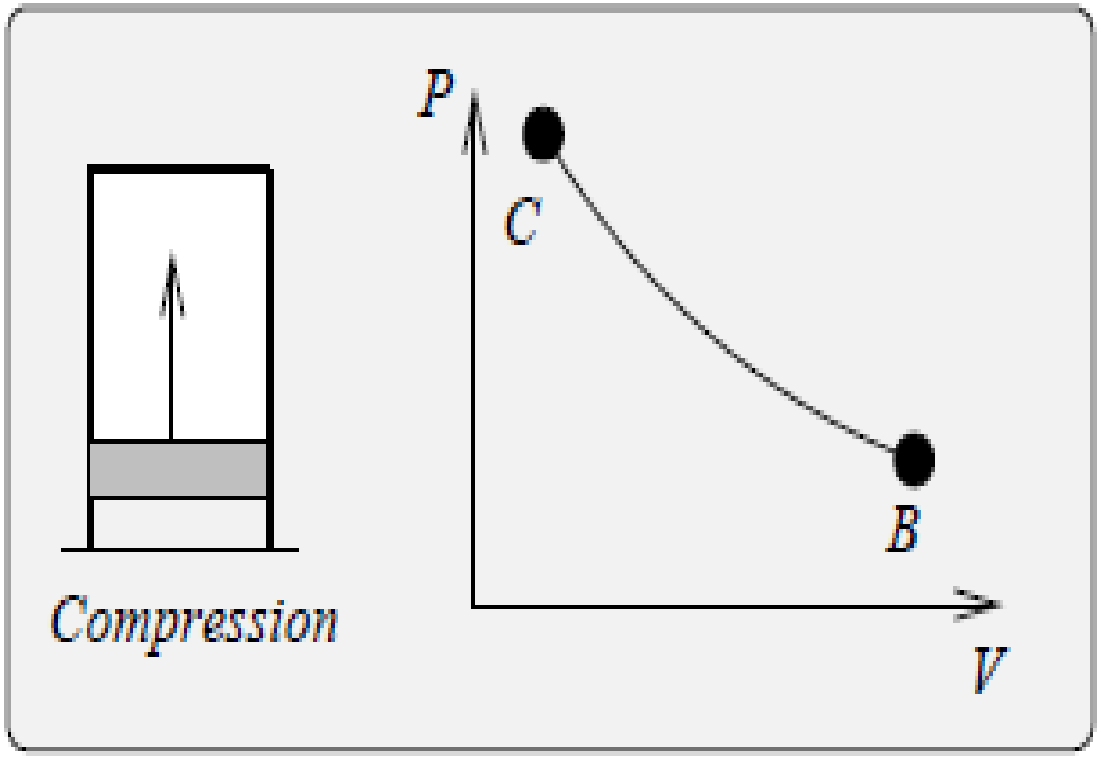
1er temps : admission

L'air seul est admis dans le cylindre



Le moteur à 4 temps - Diesel

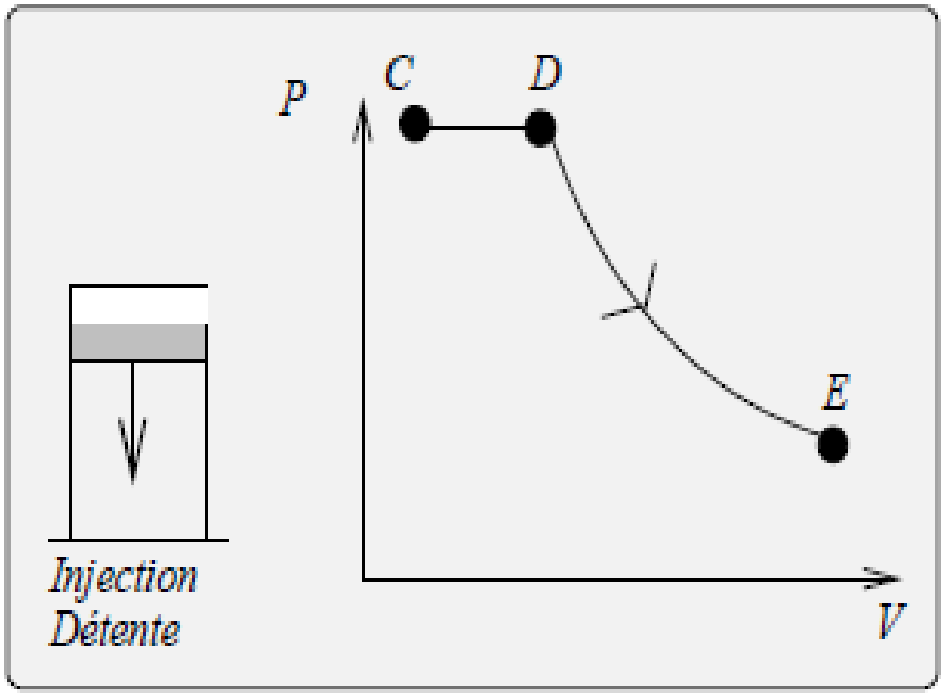
2e temps : compression



Le piston comprime l'air de façon **adiabatique**. La température s'élève jusqu'à 600 $^{\circ}C$ et la pression peut atteindre 20 à 25 bars.

Le moteur à 4 temps - Diesel

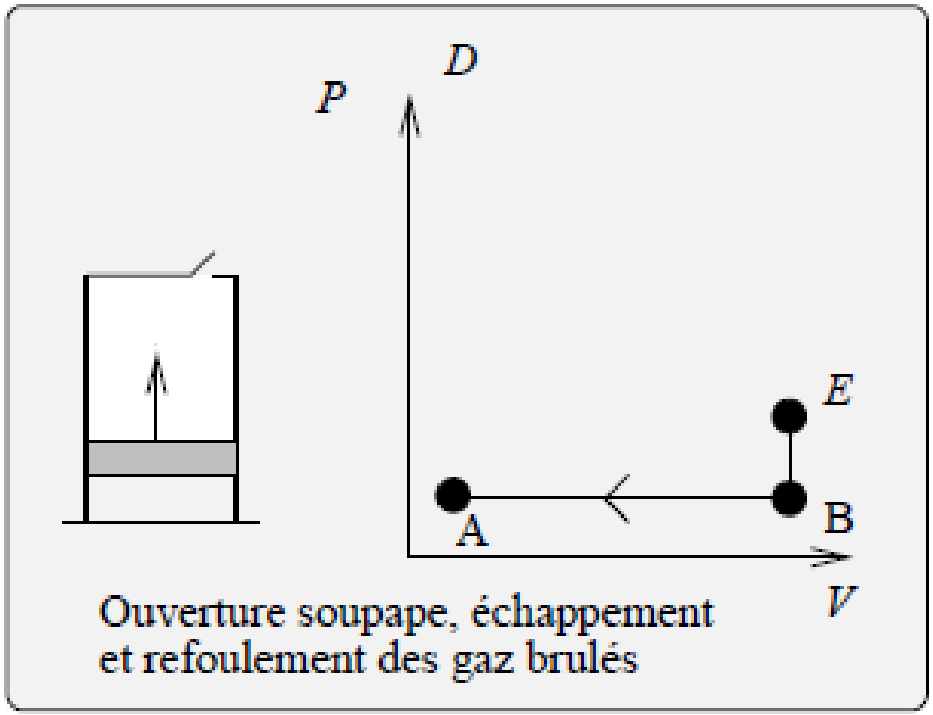
3e temps : Explosion-détente



Quand le volume est minimal, le combustible est injecté finement pulvérisé. Il s'enflamme spontanément et continue de brûler pendant que le piston commence à descendre. La pression se maintient à sa valeur maximale malgré l'augmentation de volume. Après l'inflamation la détente se poursuit de façon isentropique.

Le moteur à 4 temps - Diesel

4e temps : Échappement

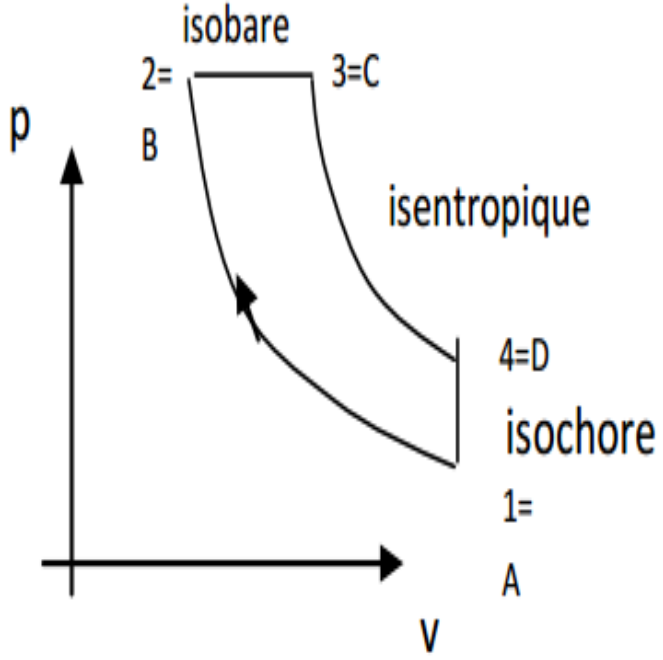


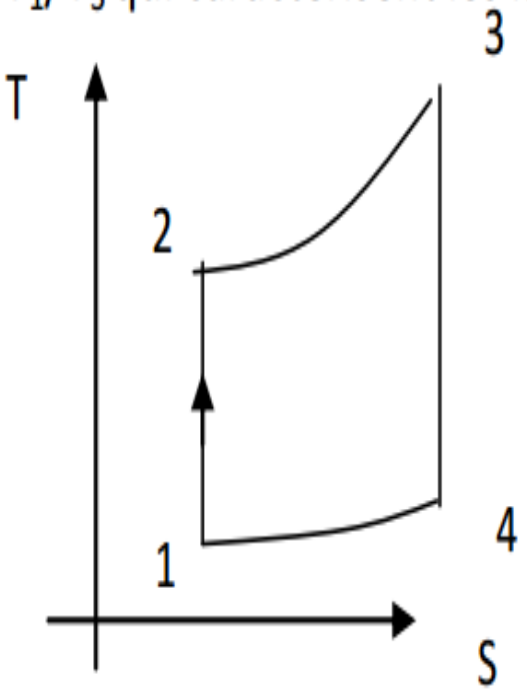
Le piston se déplace en chassant à pression constante les produits de combustion jusqu'au moment ou il revient au point de départ du cycle.

Ce cycle se compose de deux transformations **isentropiques** d'une transformation **isobare** et d'une transformation **isochore**. Ce cycle dépend de deux paramètres :

le rendement

Exprimer le rendement en fonction de $\alpha = V_1/V_2$ et de $\beta = V_1/V_3$ qui caractérisent les isentropiques





$$\eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_{DA}}{Q_{BC}} = 1 + \frac{c_V(T_A - T_D)}{c_P(T_C - T_B)} = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{(T_D - T_A)}{(T_C - T_B)}$$

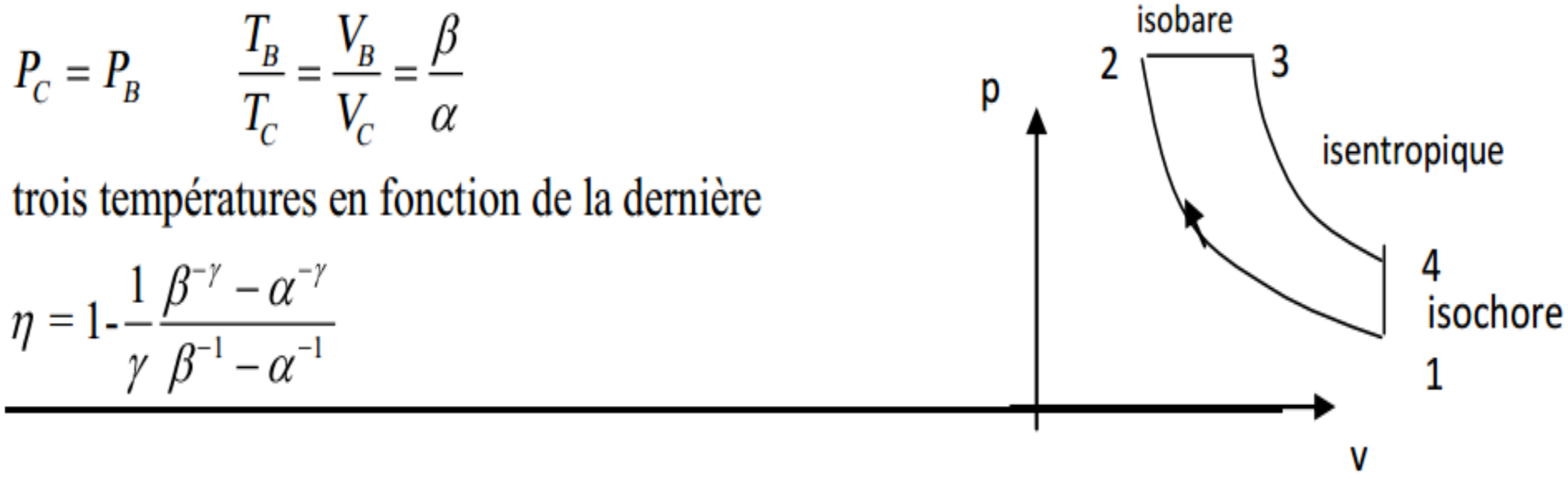
$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1} \qquad T_C V_C^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$$

$$T_A \alpha^{\gamma-1} = T_B \quad \text{car } \alpha = \frac{V_A}{V_B} \qquad T_C = \beta^{\gamma-1} T_D \quad \text{car} \quad \beta = \frac{V_A}{V_C}$$

$$P_C = P_B \qquad \frac{T_B}{T_C} = \frac{V_B}{V_C} = \frac{\beta}{\alpha}$$

trois températures en fonction de la dernière

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{\beta^{-\gamma} - \alpha^{-\gamma}}{\beta^{-1} - \alpha^{-1}}$$



Le cycle est déterminé par P_2 T_2 α P_4 (ou T_4) β

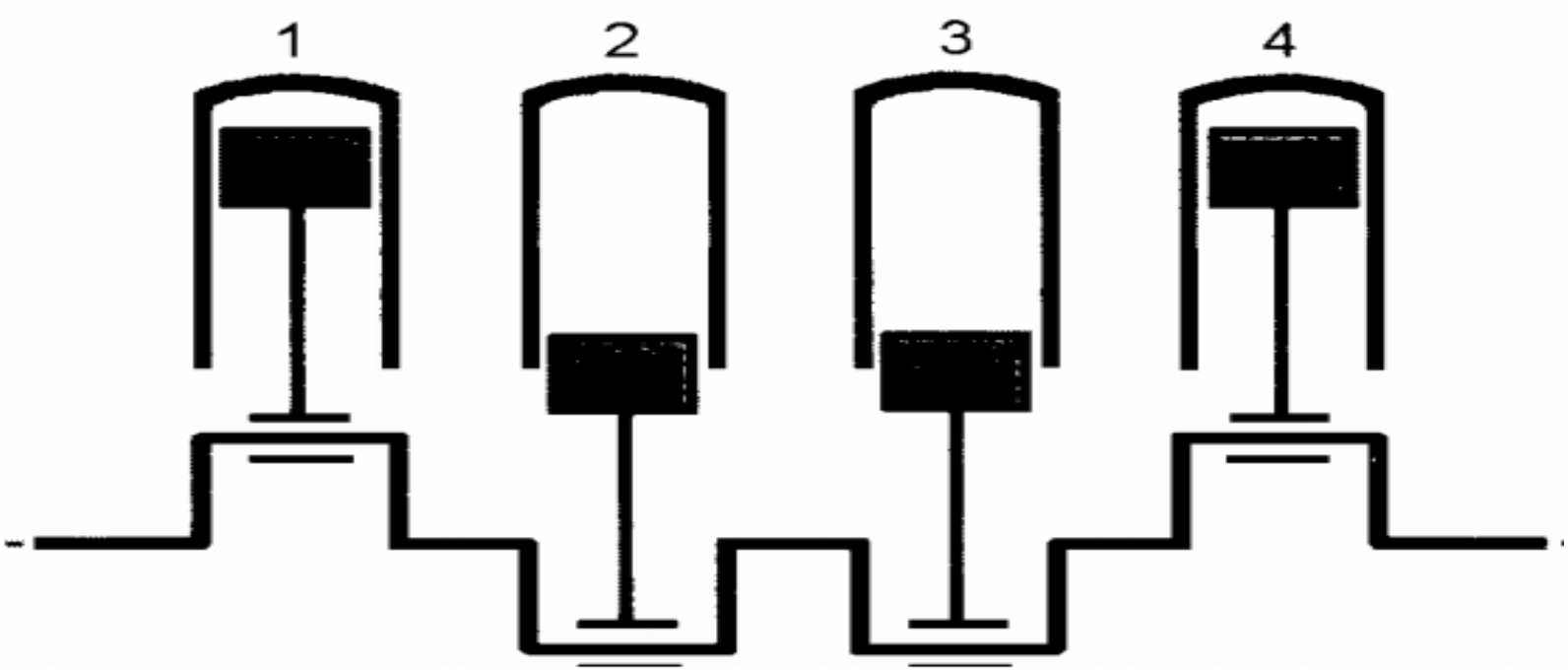
	Q	W	ΔU	ΔH
12	0	ΔU	$nC_V(T_2-T_1)$	$nC_P(T_2-T_1)$
23	ΔH	$\Delta H-\Delta U=\Delta(nRT)$ $= nR(T_2-T_1)$	$nC_V(T_3-T_2)$	$nC_P(T_3-T_2)$
34	0	ΔU	$nC_V(T_4-T_3)$	$nC_P(T_4-T_3)$
41	ΔU	0	$nC_V(T_1-T_4)$	$nC_P(T_1-T_4)$

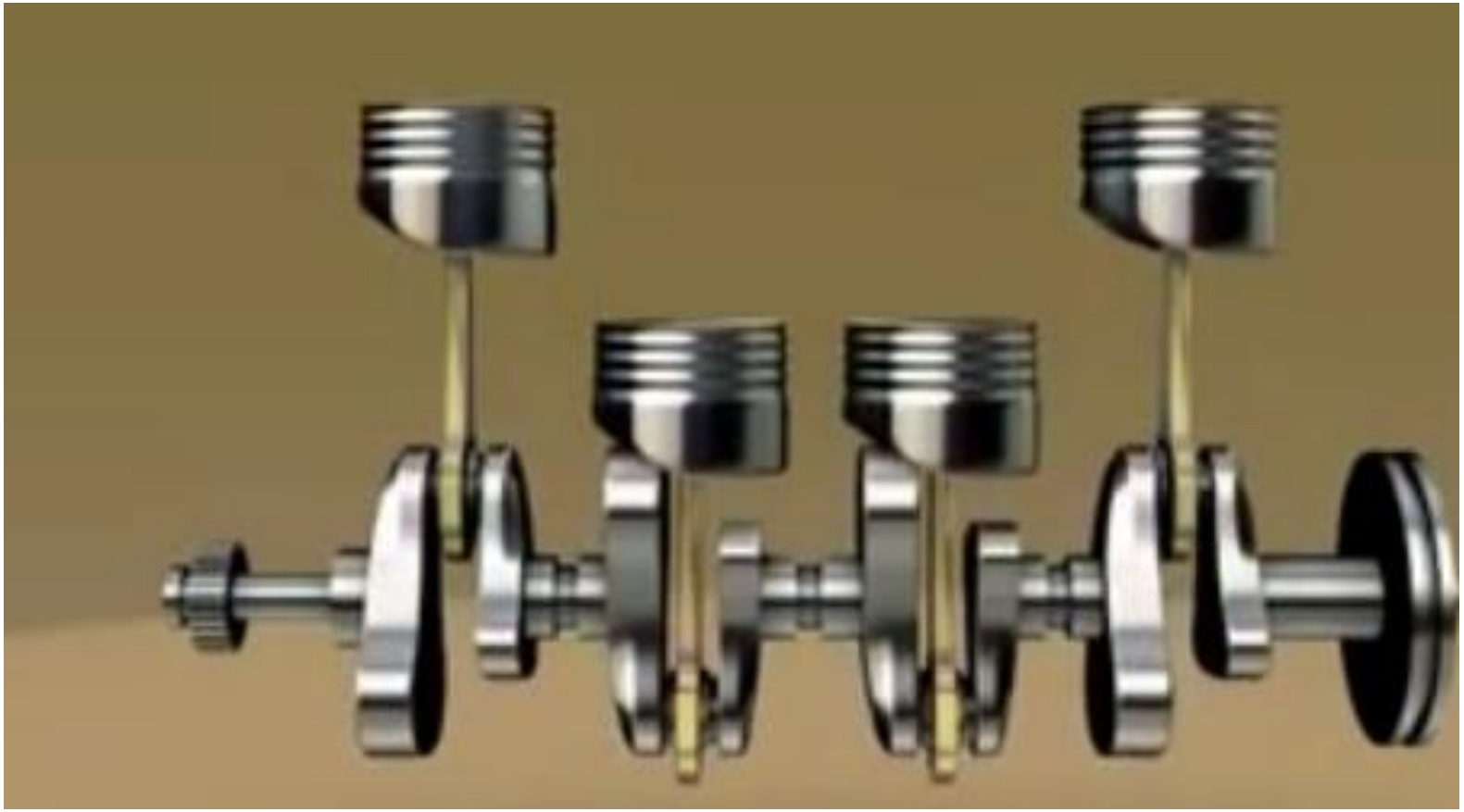
Comme on sait exprimer T_3 T_4 et T_1 en fonction de T_2

- Essence rendement 25 à 30%, diesel voiture 30 à 35%, Diesel camion ou bateau 40%
- le diesel est moins puissant à masse égale de moteur et demande plus d'entretien, le moteur diesel est d'autre part plus complexe. 1L de cylindrée donne 35ch en Diesel et 50ch en essence (1ch=736Watts)
- Le Diesel tourne moins vite
- 1500 à 1800 tours /min pour un essence moyen le moteur est dans le rouge à 7000tours/min, 1300 pour un Diesel dans les mêmes conditions, le moteur est dans le rouge à 5000tours/mn.
- Taux de compression essence 9 , Diesel 20
- Diesel 600°C 40bars Essence 12 bars 350°C Les cylindres d'un moteur diesel sont plus gros .

ORDRE DE FONCTIONNEMENT

On présente ci-dessous le schéma très simplifié du système bielle manivelle d'un moteur quatre cylindres

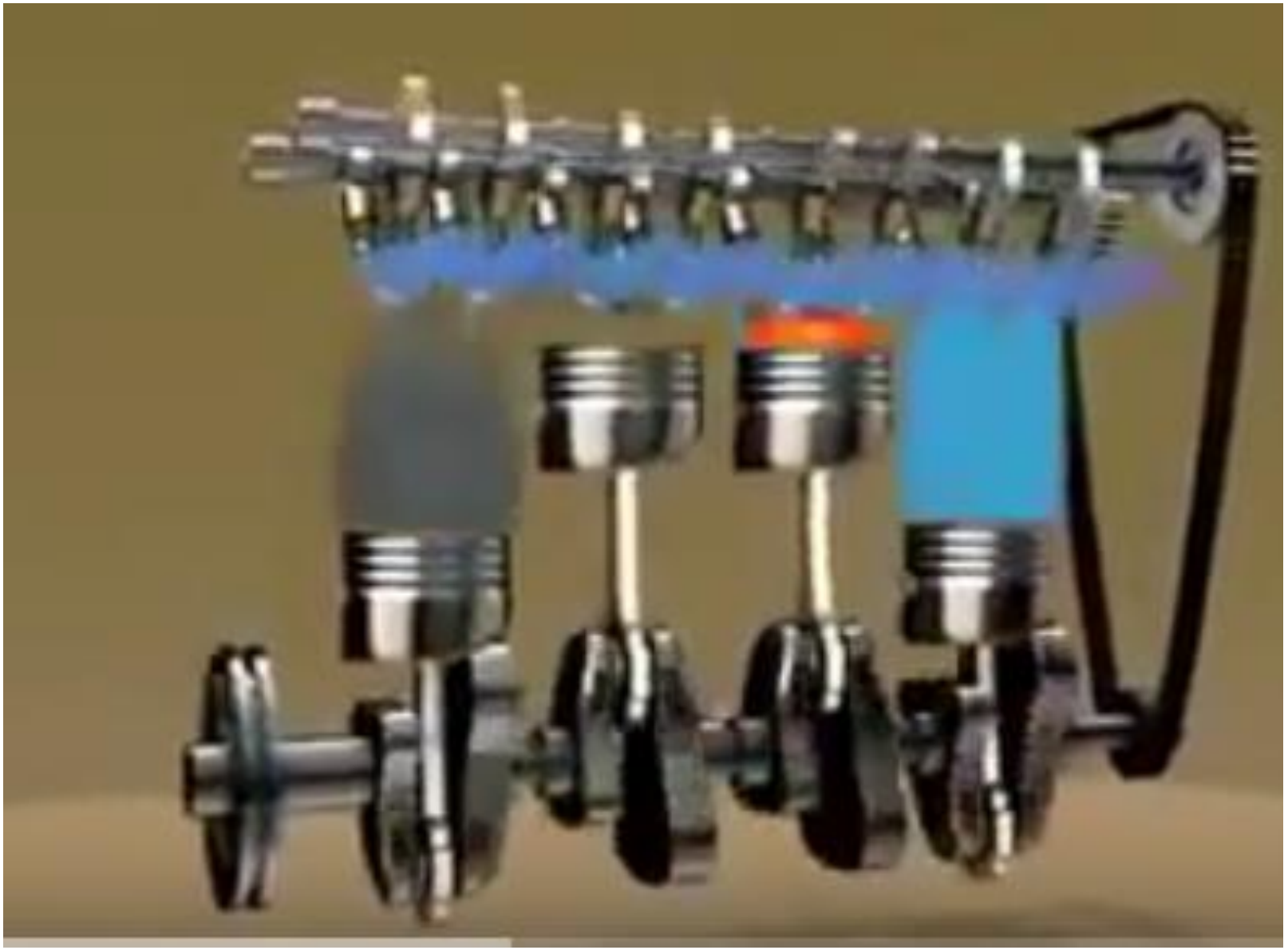


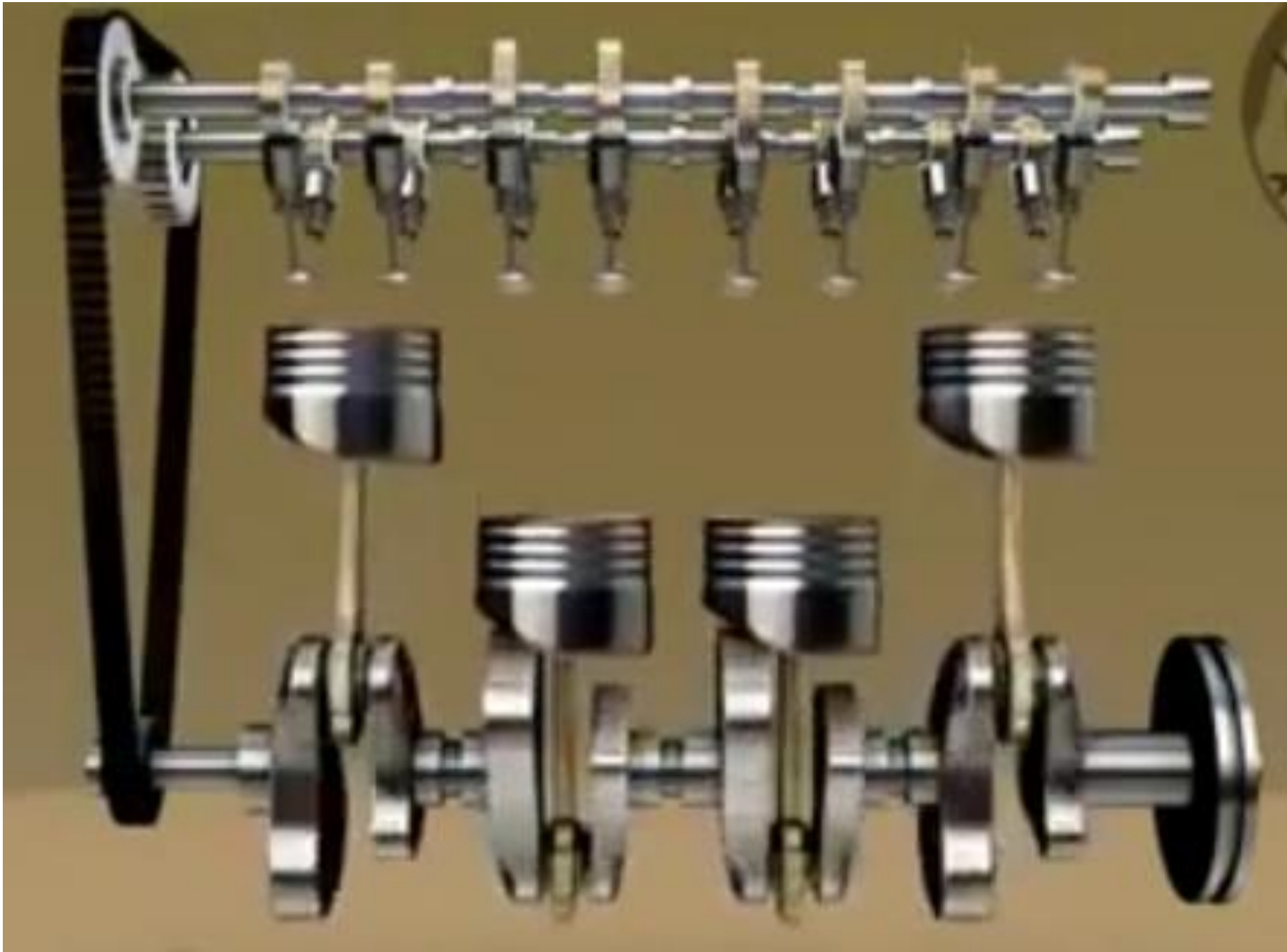


Les pistons des deux cylindres **1** et **4** se trouvent ensemble au **PMH**. Si le cylindre 1 est en fin de compression, l'autre cylindre 4 est en fin **d'échappement**. Où si le cylindre **4** est en fin de compression. l'autre cylindre 1 est en fin **d'échappement.**

Les pistons des deux autres cylindres **2** et **3** se trouvent ensemble au **PMB.** Si le cylindre **2** est en fin **d'admission** l'autre cylindre 3 est en fin **de combustion détente.** Lorsque le cylindre 1 descend pour le temps admission, le cylindre opposé **4** descend pour le temps **combustion détente.** C'est le temps **MOTEUR.**

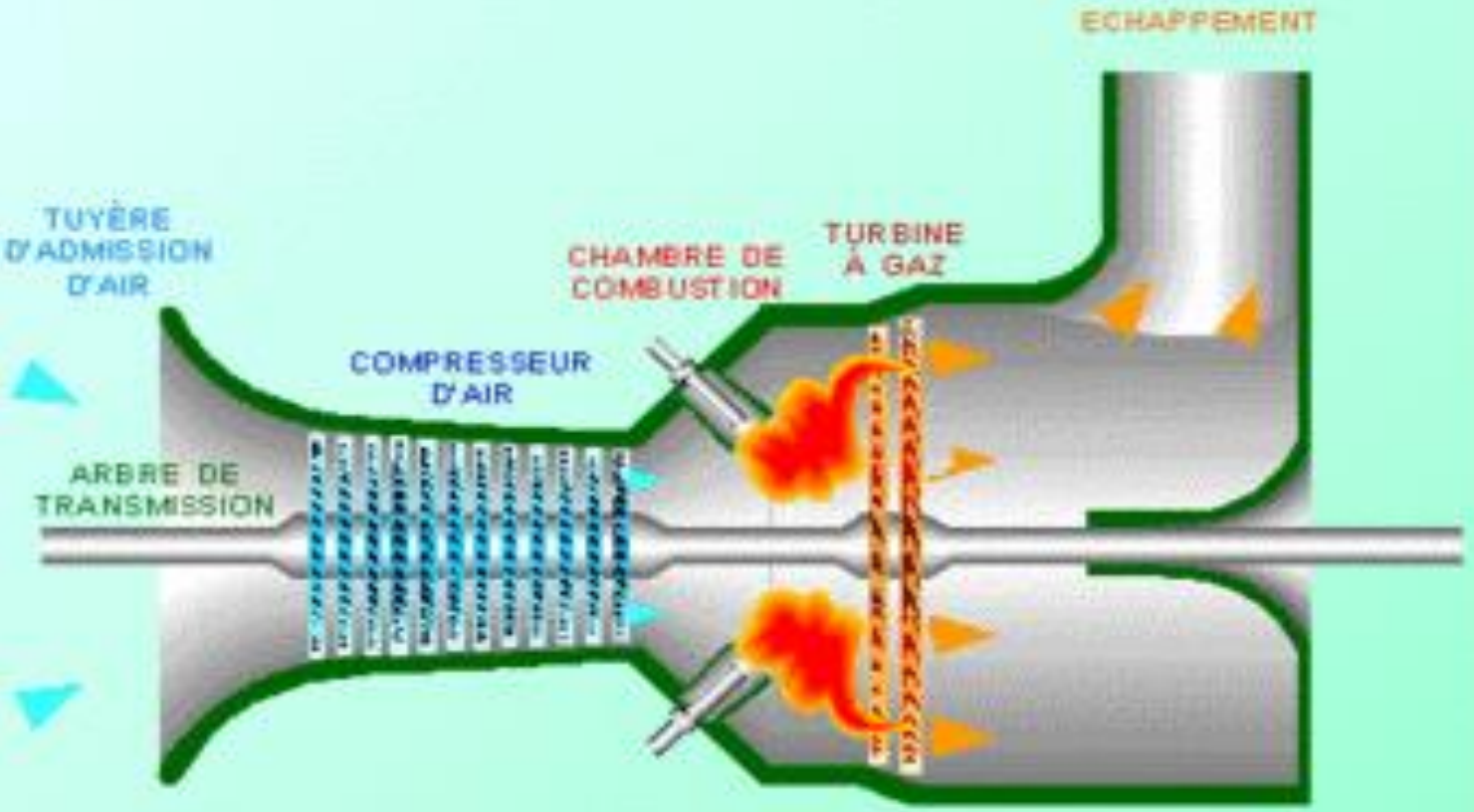
Lorsque le cylindre 2 monte pour le temps compression, le cylindre opposé **3** monte pour le temps **échappement**. C'est un temps **MORT**





turbine à gaz

PRINCIPE D'UNE TURBINE À GAZ



Turbine à gaz

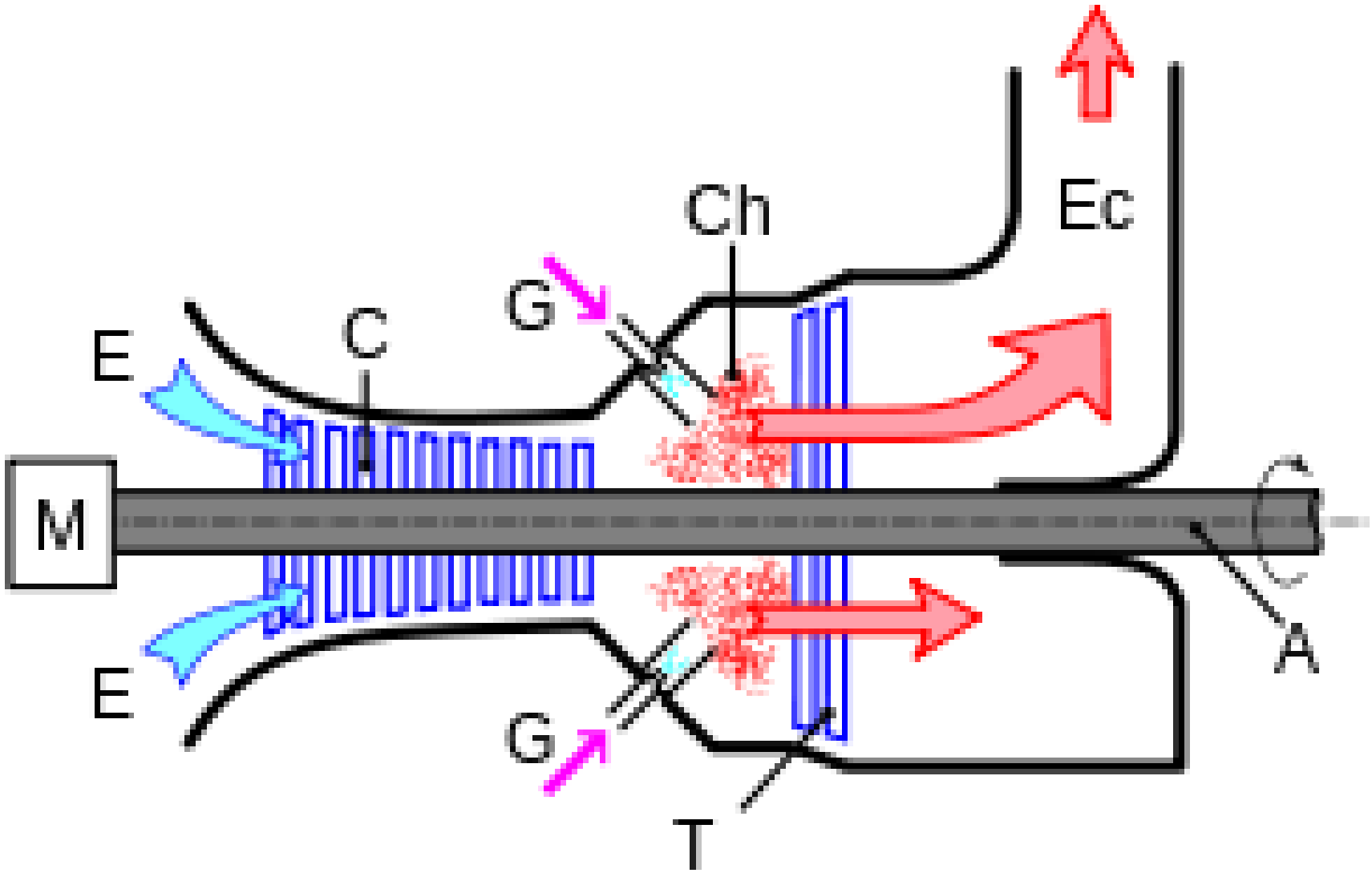
Une **turbine à gaz** (dénomination historique, abrégée en TG), appelée aussi **turbine à combustion** (TAC) ou parfois **turbine à gaz de combustion** (dénomination la plus précise), est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire :
soit de l'énergie mécanique par l'entrainement en rotation d'un arbre lui-même couplé à une machine industrielle ou à une hélice
ou bien de l'énergie cinétique par détente des gaz en sortie de turbine dans une tuyère

Dans sa forme la plus simple, la turbine à combustion fonctionne selon le cycle dit de Joule comprenant successivement et schématiquement :

- une compression adiabatique qui consomme de l'énergie mécanique ;
- un chauffage isobare comme pour un moteur Diesel ;
- une détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante qui produit de l'énergie mécanique ;
- un refroidissement isobare.

- **Principe :**
- Un compresseur constitue d'un ensemble de roues munies d'ailettes comprime l'air extérieur. Du gaz est injecte dans la chambre de combustion ou il se mélange a l'air compresse et s'enfamme. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine transformant l'energie thermique en energie mécanique.
- Le turboréacteur est une turbine a gaz utilisant le principe de réaction comme propulseur.
- Une turbine a gaz est souvent a cycle ouvert, c'est-a dire que le refroidissement s'effectue a l'exterieur de la machine.

Principes

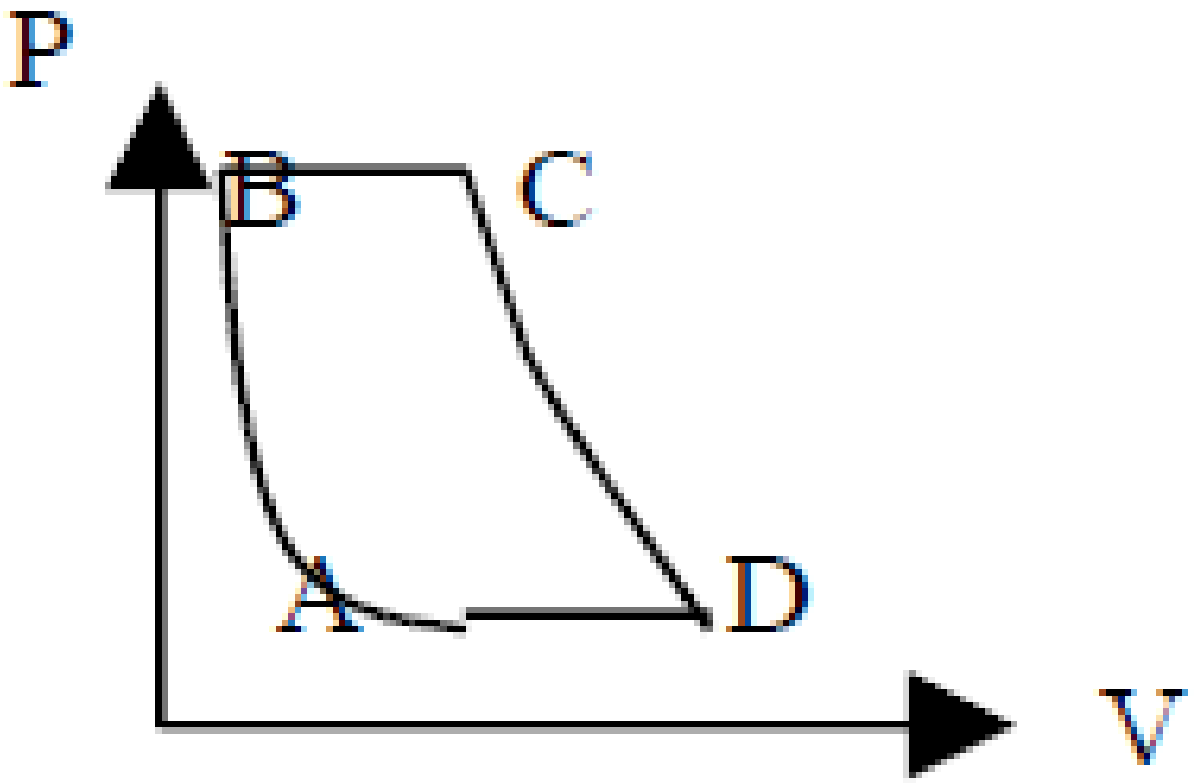


- Le compresseur (« **C** »), constitué d'un ensemble d'ailettes fixes (stator) et mobiles (rotor), comprime l'air extérieur (« **E** »), simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars. Du combustible (« **G** ») , est injecté dans la (les) chambre(s) de combustion (« **Ch** ») où il se mélange à l'air comprimé pour entretenir une combustion continue.

- Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (« **T** »), où l'énergie thermique et cinétique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique. Les gaz de combustion s'échappent par la cheminée (**Ec**) à travers un diffuseur. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre (« **A** ») qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part une charge qui n'est autre qu'un appareil (machine) récepteur(ice) (pompe, alternateur, compresseur…) accouplé à son extrémité.

ETUDE THERMODYNAMIQUE

- **Cycle de Joule :**



AB Compession isentropique → $T2/T1 = (P2/P1)^{(\gamma-1/\gamma)}$

BC Combustion à P = cst

CD Détente isentropique

DA Échappement à P = cst

Rendement

$$\eta = 1 - 1/\pi\text{^}(\gamma\text{-}1/\gamma) \text{ avec } \pi = P2/P1$$

Turbine à vapeur

Turbines à vapeur

Les cycles des turbines à vapeur utilisent un fluide compressible, qui change d'état au cours du cycle. Le changement d'état de la vapeur génère des variations importantes de l'enthalpie[1] qui permet de transformer de grandes quantités de chaleur en travail. Dans une turbine la vapeur est détendue de façon continue dans un système de roues à aubes. Cette propriété permet de fonctionner avec des débits importants et de pousser la détente sans l'effet de troncature, comme dans les machines alternatives.

Généralités

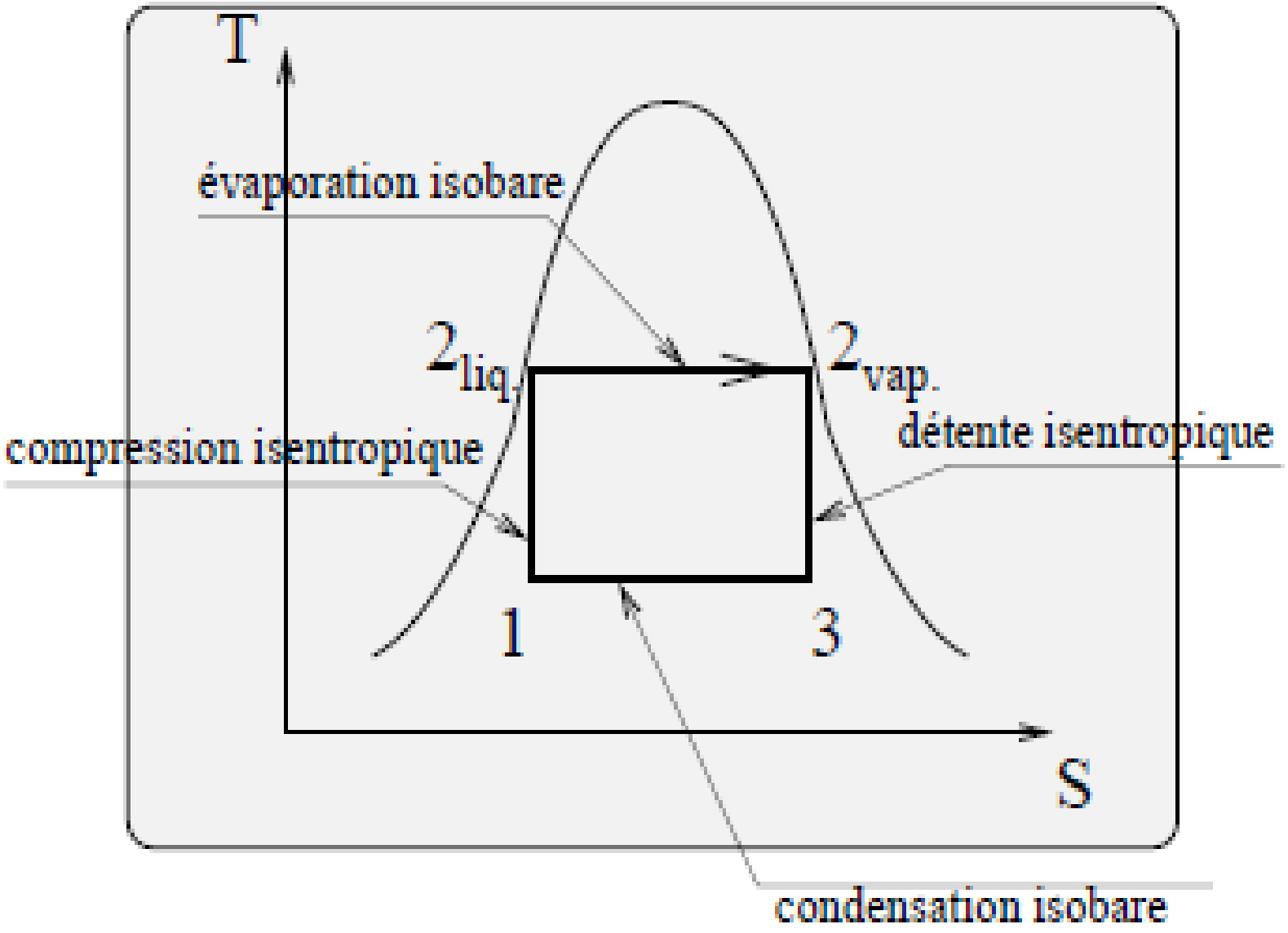
- Utilisation
  - Production d'électricité
  - Propulsion des navires et sous-marins
- Avantages
  - Rendement > 45% > cycles à gaz
  - Compression par des pompes de faibles puissances
- Inconvénients
  - Flexibilité : mise en route > 12 heures
  - Grosses installations
  - Problème de sécurité (Centrales nucléaires)

Cycle théorique d'une machine à vapeur : cycle de Rankine

Le cycle de base d'une turbine à vapeur (cycle théorique comportant un changement d'état) est un cycle de **Rankine** qui se déroule totalement en vapeur humide. Ce cycle comporte :

1. deux isobares (changement d'état isotherme)
2. deux adiabatiques ;

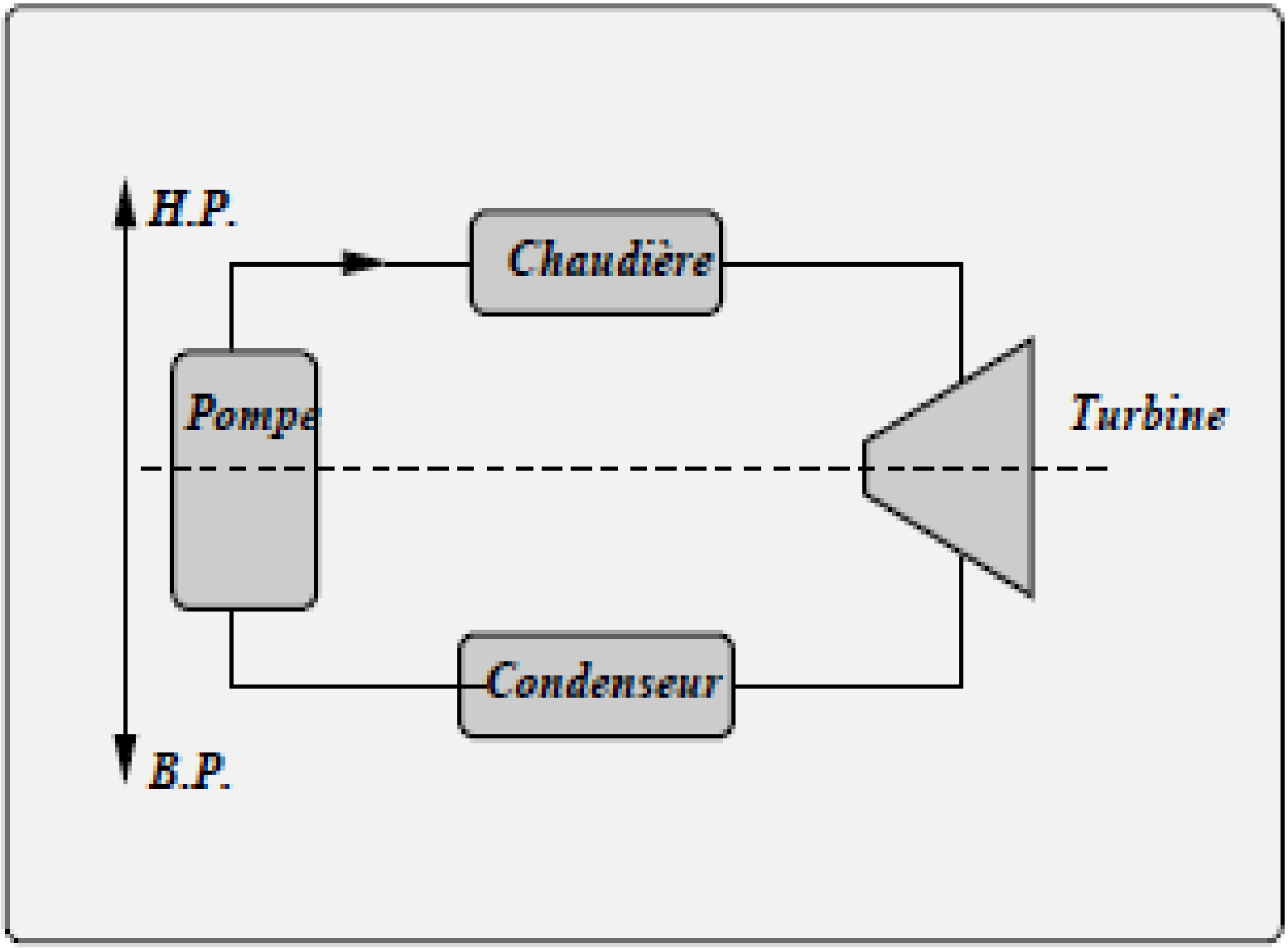
C'est un cycle de Carnot (rectangle dans le diagramme $(T-S)$), appliqué aux vapeurs condensables :



– Cycle de Rankine en vapeur humide

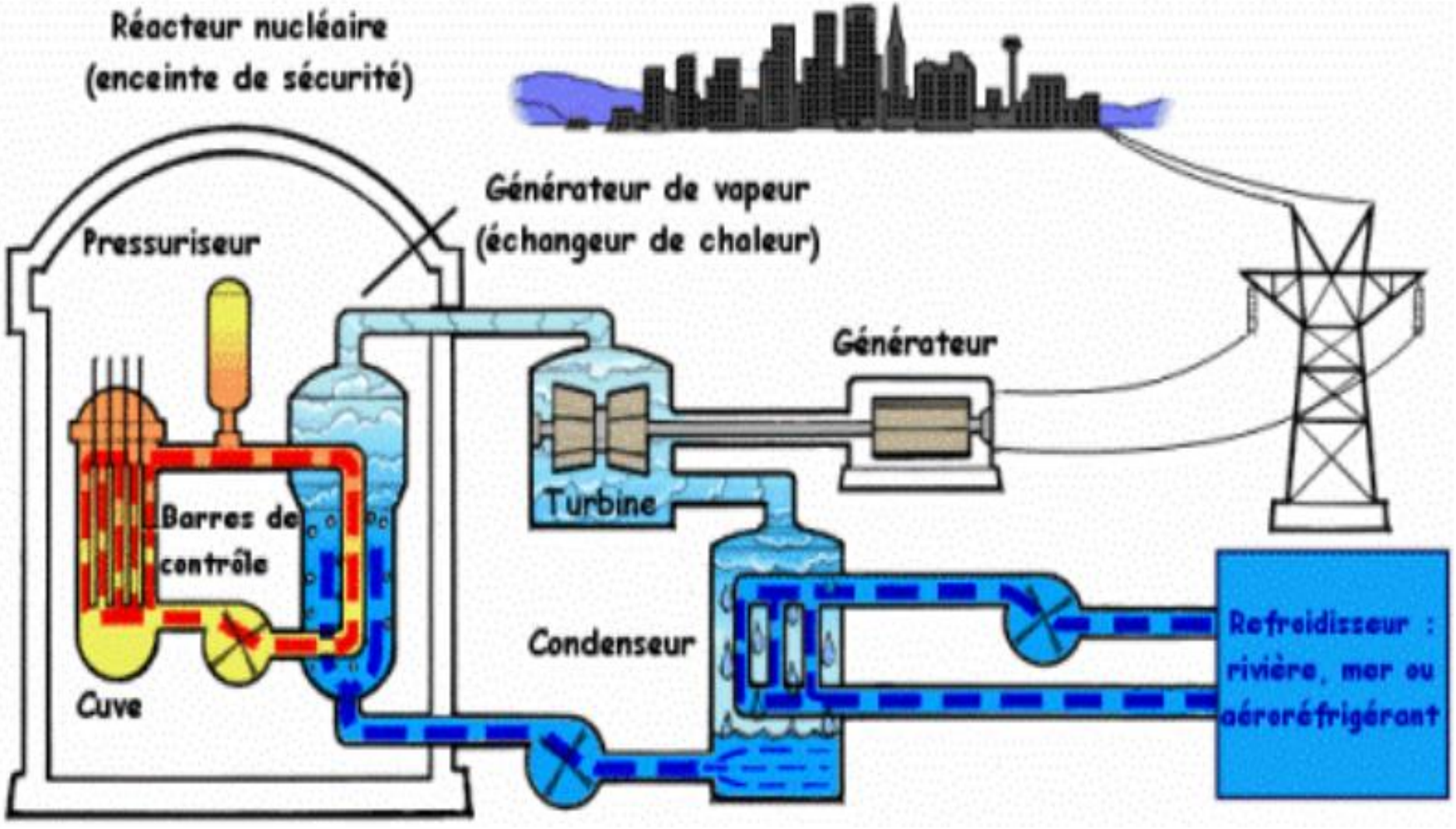
Les éléments constitutifs d'une machine à vapeur sont :

- une chaudière
- une turbine
- un condenseur
- une pompe de circulation

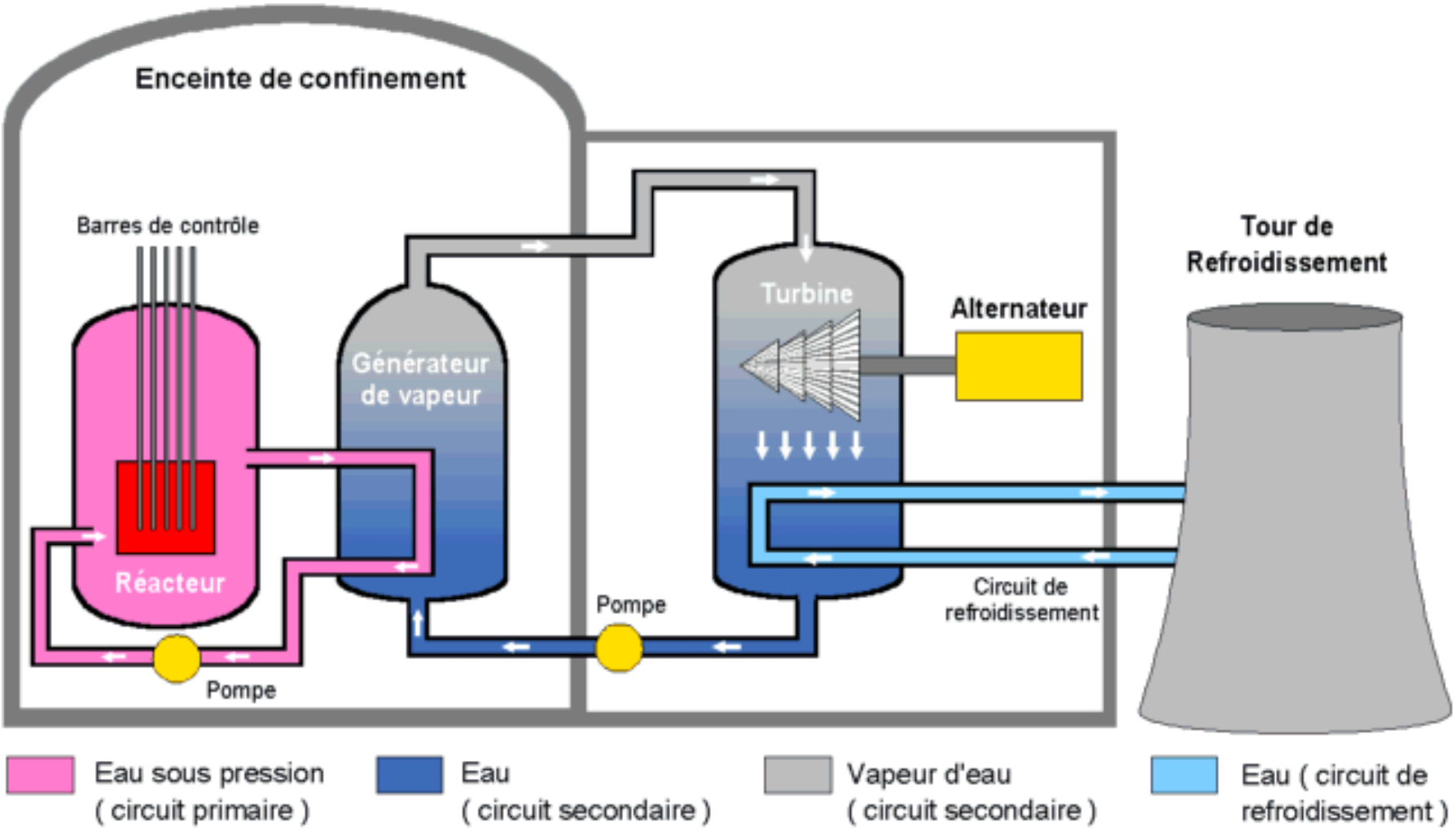


– Cycle d'une turbine à vapeur

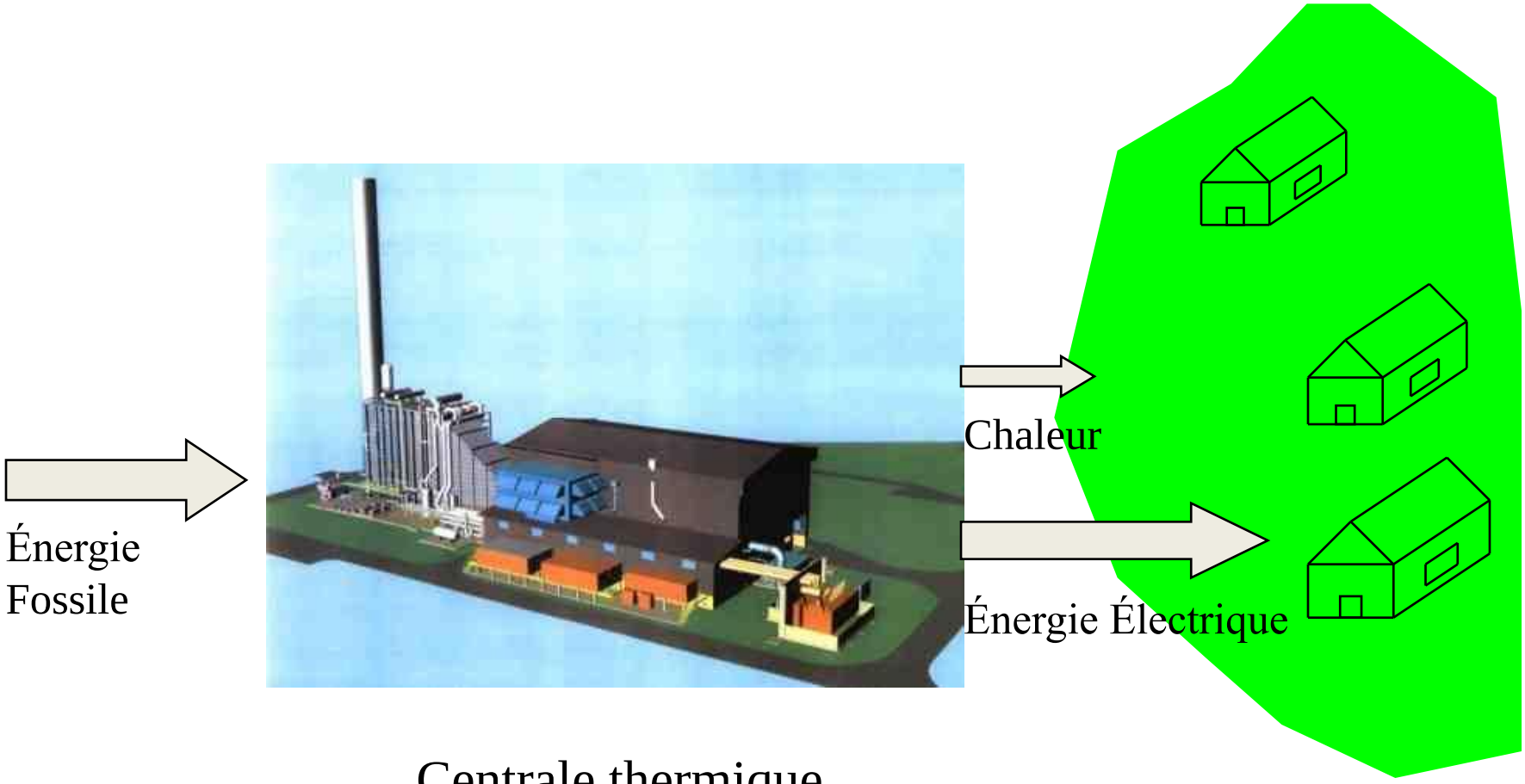
Centrale nucléaire



Centrale nucléaire

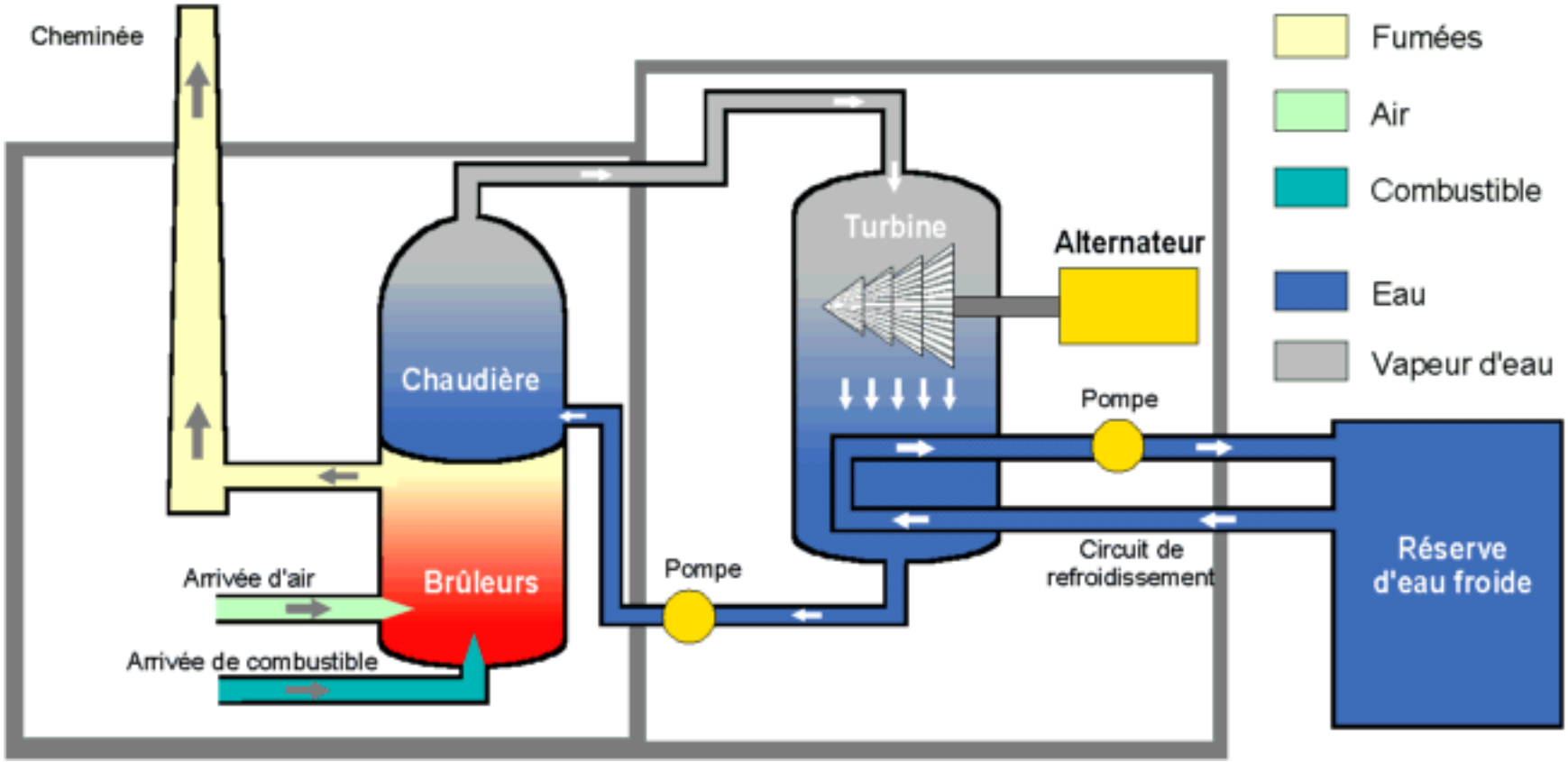


Conversion d´énergie

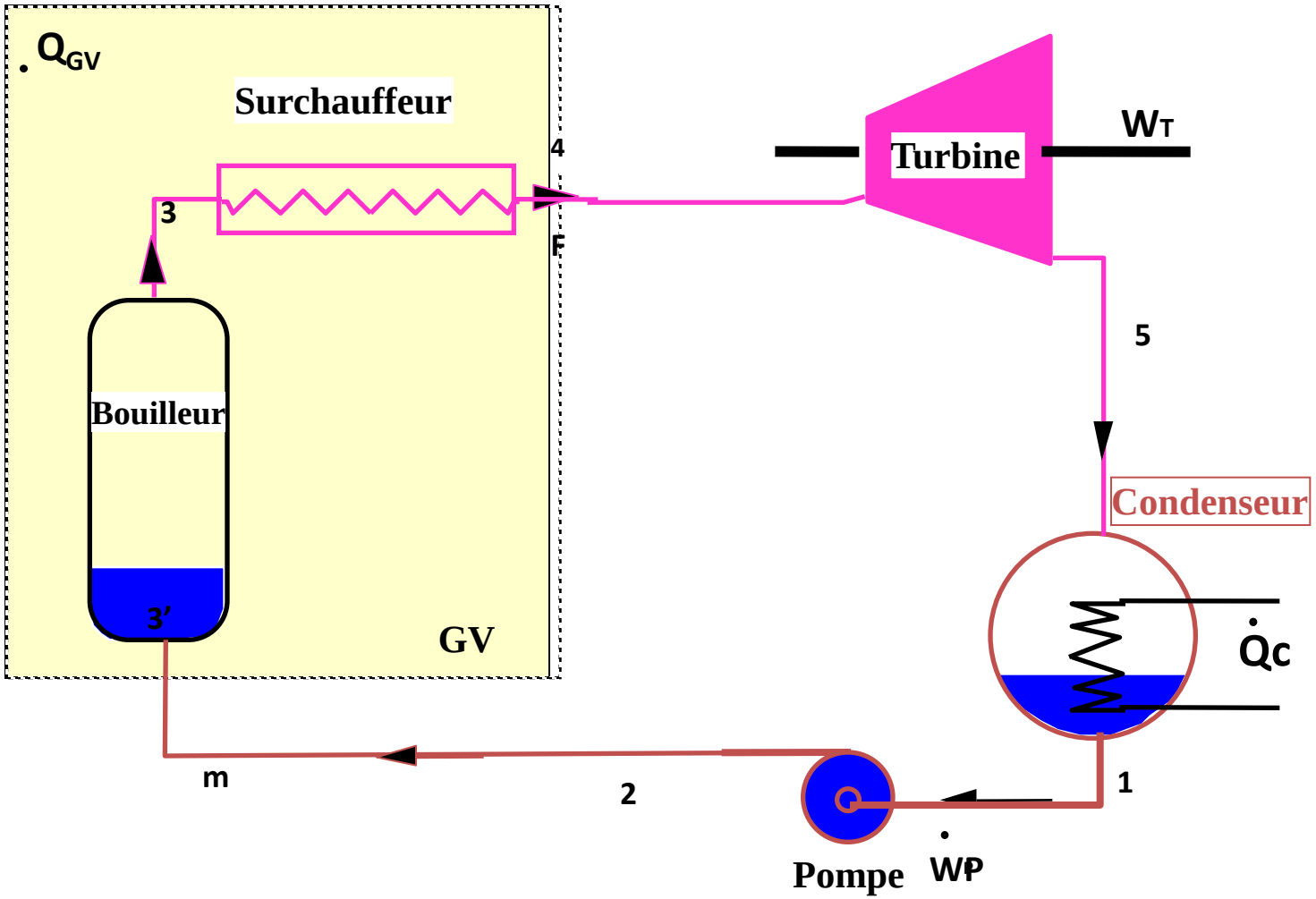


Centrale thermique

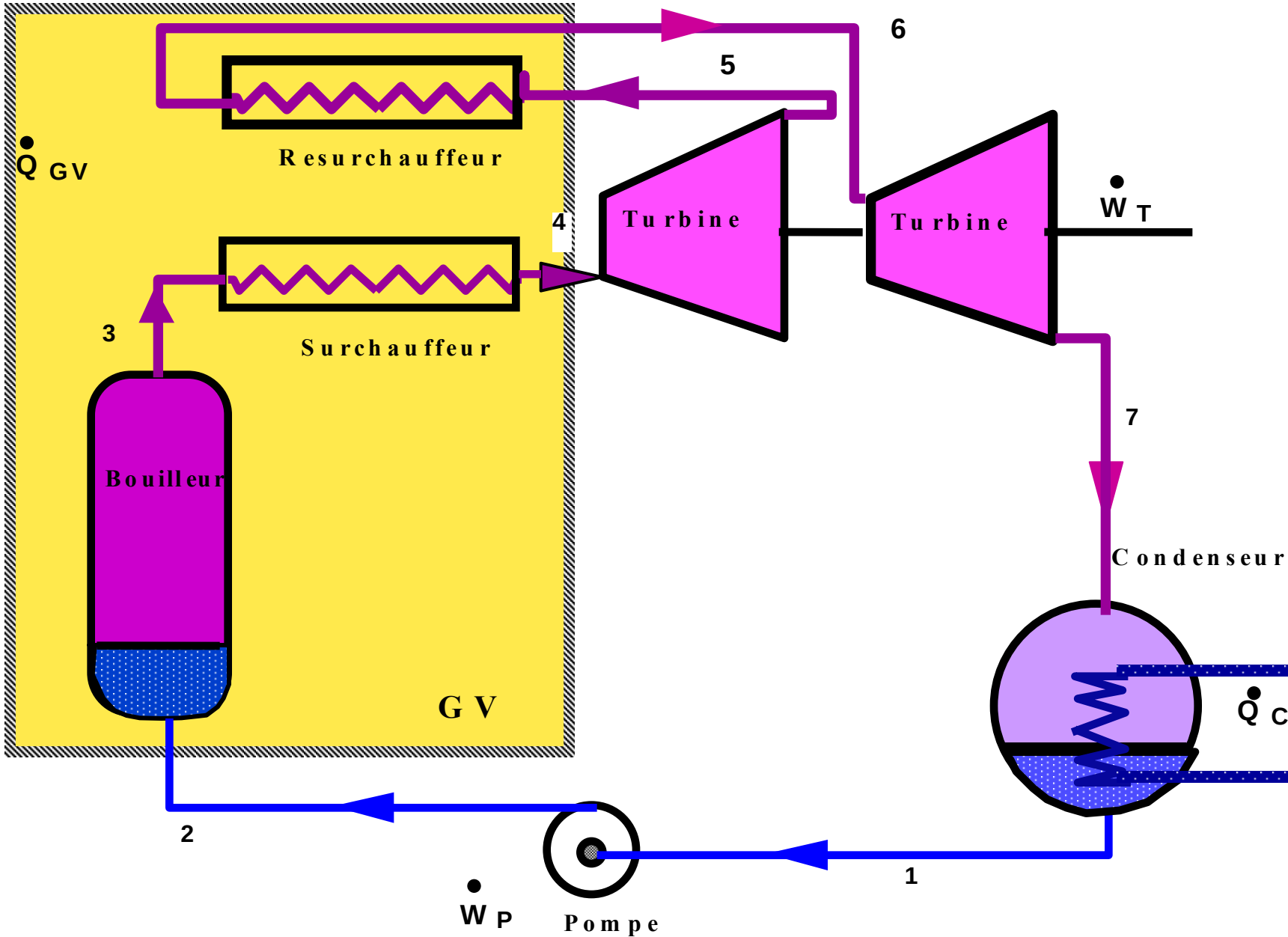
Centrale thermique



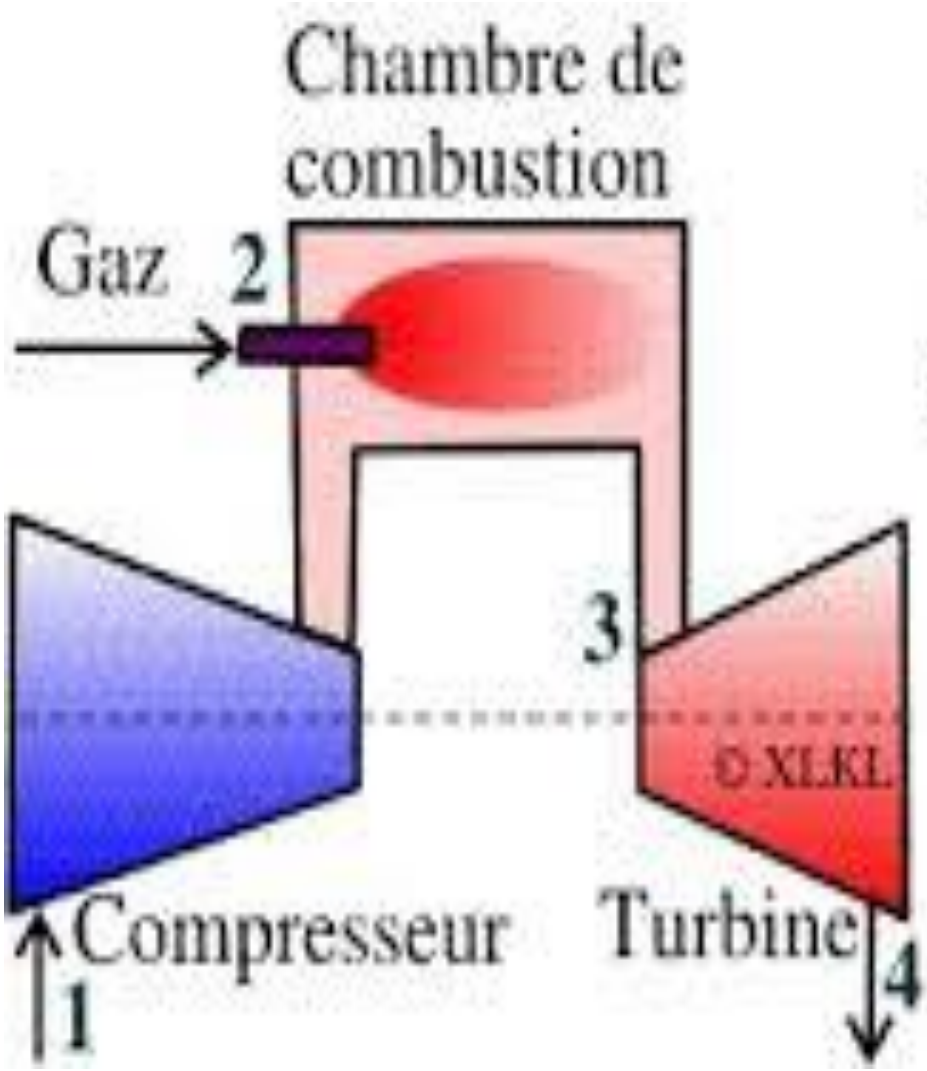
Cycle de RANKINE ou HIRN



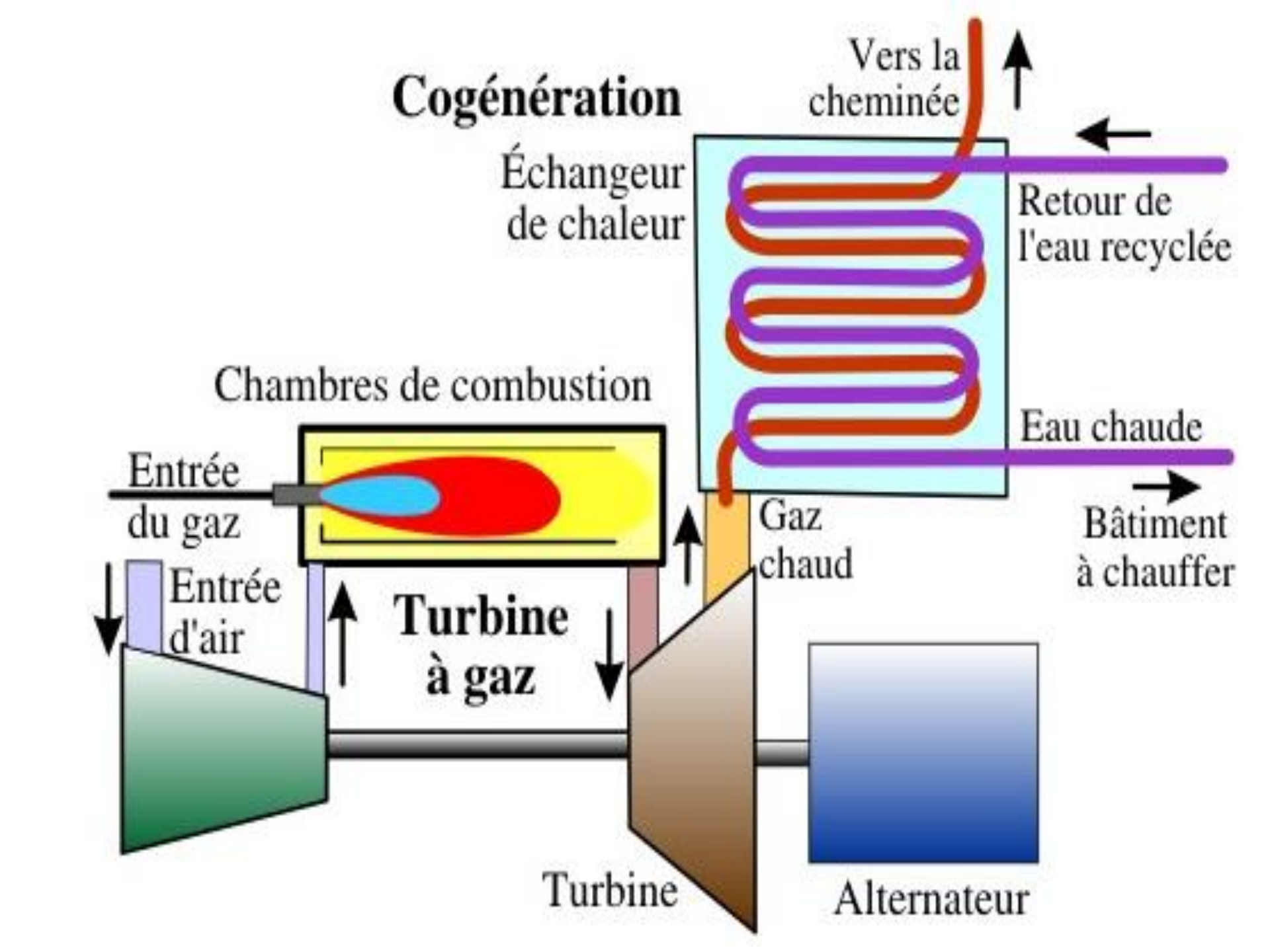
Cycle à resurchauffe



Pierre-Paul Feyte 2005


Chambre de
combustion
Gaz
2
3
© XLKL
Compresseur
Turbine
1
4

Pression
Addition
de calories
2
3
Pompage
Turbinage
1
4
Elimination
de calories
Volume


Cogénération
Vers la cheminée
Échangeur de chaleur
Retour de l'eau recyclée
Chambres de combustion
Eau chaude
Entrée du gaz
Gaz chaud
Bâtiment à chauffer
Entrée d'air
Turbine à gaz
Turbine
Alternateur

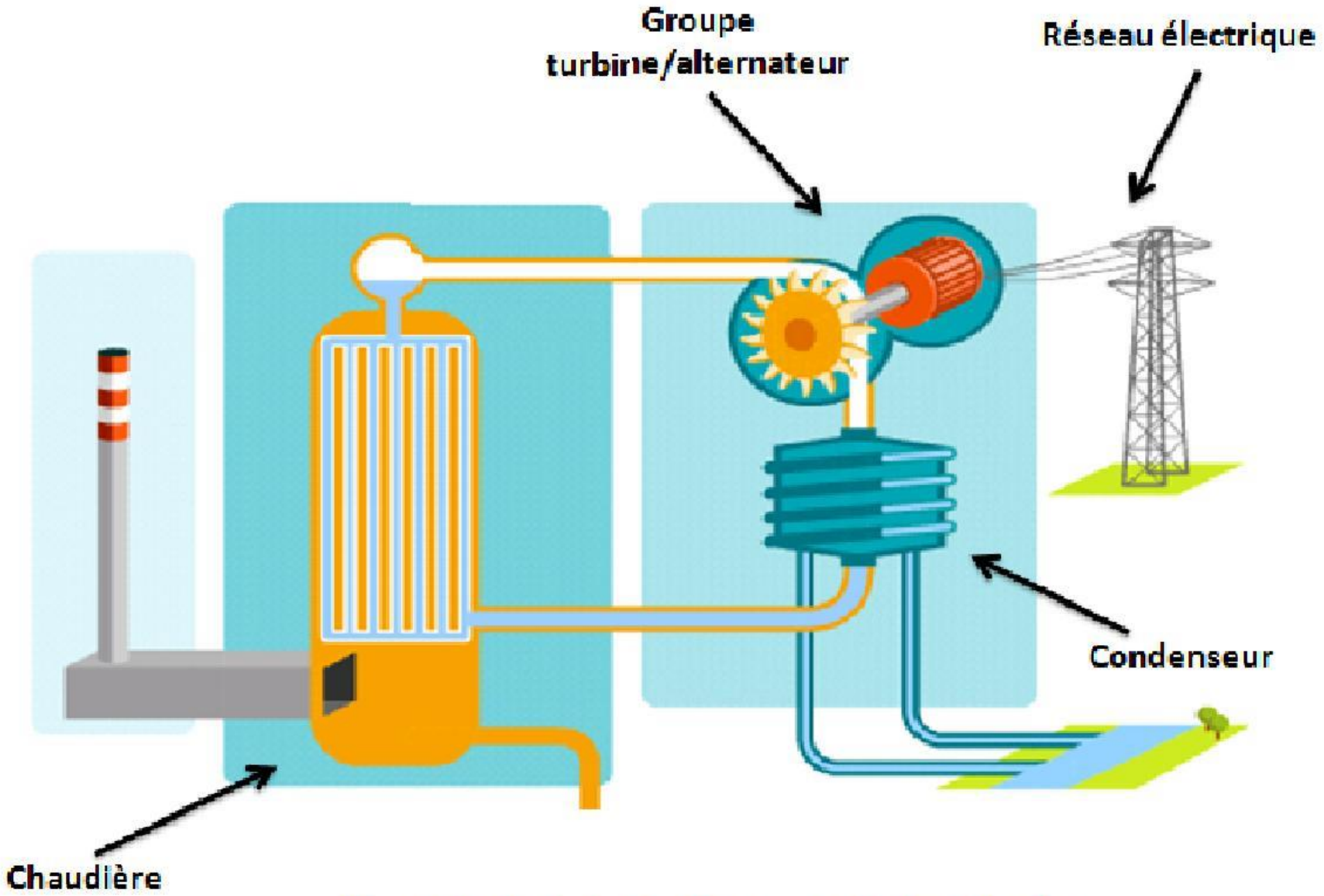


Figure 1 : Mode de fonctionnement et production d'électricité