

# MEC1210 - THERMODYNAMIQUE

Automne 2021

Bruno Savard

D'après les notes de cours de Pr. Huu Duc Vo et  
Pr. Étienne Robert

POLYTECHNIQUE  
MONTRÉAL



# AUJOURD'HUI - INTRODUCTION

## Présentations :

**Bruno Savard**

Bureau J-5065

Téléphone (514) 340-4711, #7449

Courriel [bruno.savard@polymtl.ca](mailto:bruno.savard@polymtl.ca)

Disponibilités à définir

## La thermodynamique :

- C'est quoi
- Exemples de systèmes thermodynamiques

## Le cours :

- Plan de cours
- Objectifs
- Méthodologie



# MÉTHODOLOGIE

## Enseignement:

- **Classe (3 hrs/semaine):** théorie sur diapositives, certains développements et exemples au tableau
- **Périodes de travaux dirigés (TD) (2 hrs/semaine)**
- **Périodes de projet (2 hrs/semaine)**
- **Outil de travail (projet): logiciel EES**
- **Heures de bureau: 2h par semaine - à définir**

## Évaluation:

- **Mini contrôles (10%)**
- **Contrôle périodique (30%) (lundi, 25 octobre 2021, en classe)**
- **Travail de TD (10%)**
- **Projet (15%)**
- **Examen final (35%) (pendant la période des examens finaux)**







# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Y. Çengel, M. Boles et M. Lacroix, “Thermodynamique, une approche pragmatique, 3<sup>e</sup> édition” Chenelière McGraw-Hill**
- Engines, Energy, and Entropy – A Thermodynamics Primer, John B. Fenn (2006), Global View Publishing
- Thermodynamics – Concepts and Applications, Stephen R. Turns (2006), Cambridge University Press
- Thermodynamique et énergétique, Lucien Borel, Presses Polytechniques Universitaires Romandes



# PRÉSENTATION

## Mon cheminement

- juin 2020 - ajd      Professeur adjoint – Polytechnique Montréal
- 2019 –juin 2020    Professeur adjoint – Université d'Ottawa
- 2017 - 2018        Postdoc – University of New South Wales 
- 2015 - 2016        Postdoc – Politechnika Warszawska 
- 2011 - 2015        M.Sc., Ph.D. – California Institute of Technology 
- 2007 - 2011        B. Ing., Dipl. Ing., Master recherche –  
Polytechnique Montréal  
ISAE-Supaéro 



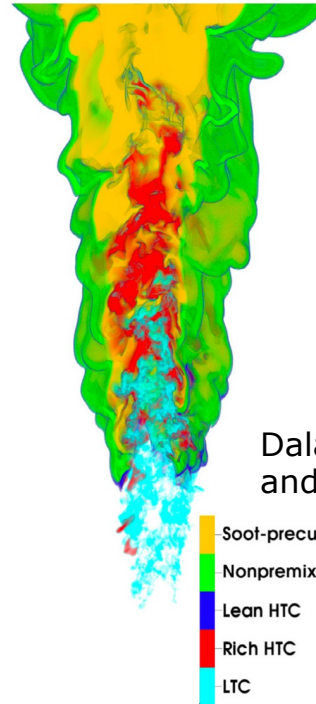
# PRÉSENTATION

## Mes activités de recherche

Simulations haute-fidélité de phénomènes de combustion :

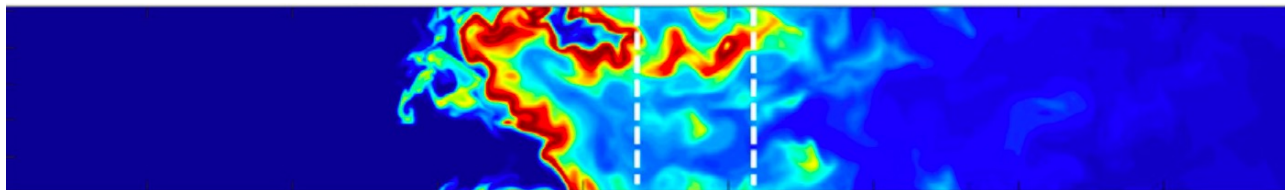
- Interaction turbulence-flamme
- Interaction flamme-paroi
- Mode de propagation (déflagration/auto-allumage)
- Combustion de carburants à faible teneur en carbone

+ méthodes numériques, théorie et modélisation



Niagara - UoT

Dalakoti et al. Combustion and Flame 2020



Savard et al. Combustion and Flame 2019



# PRÉSENTATION

**À propos de vous...**



# INTRODUCTION

## Thermodynamique

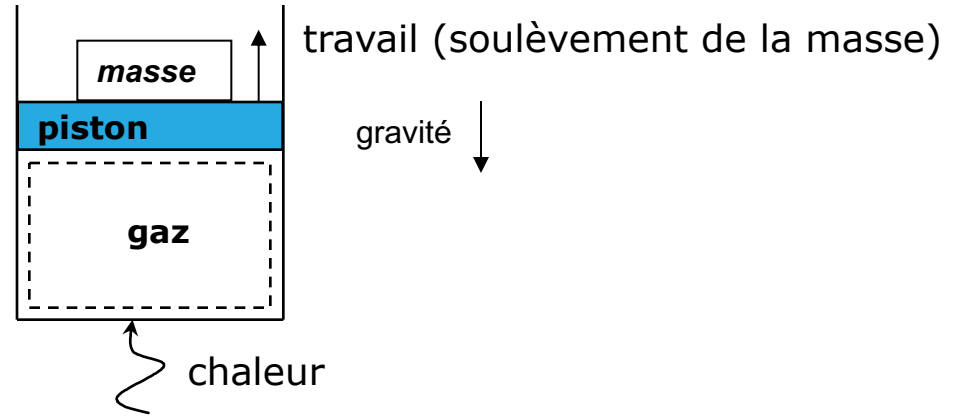
- Étymologie → chaleur + mouvement
- Définitions
  - **Wikipedia:** “Thermodynamics is the branch of natural **science** concerned with **heat** and its relation to other forms of **energy** and **work**.”
  - **Çengel & Boles:** “La science fondamentale de l’**énergie**”
  - Une **science** pour décrire les processus de **transformation** de l’énergie et de changement de propriétés de la matière.
  - Un **outil** d’ingénierie pour analyser/décrire la performance des systèmes comportant la production et la **transformation** de l’**énergie**.



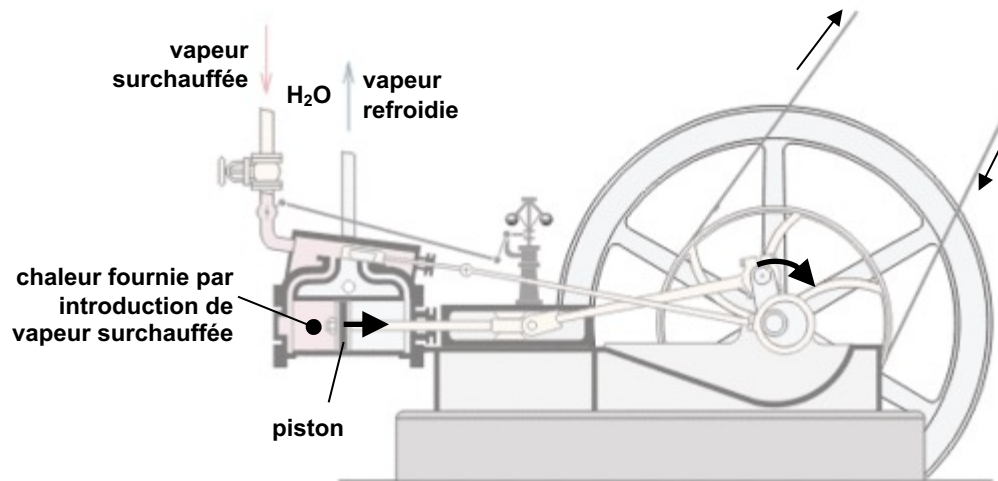


# QUELQUES EXEMPLES

## Exemple 1: Piston et cylindre

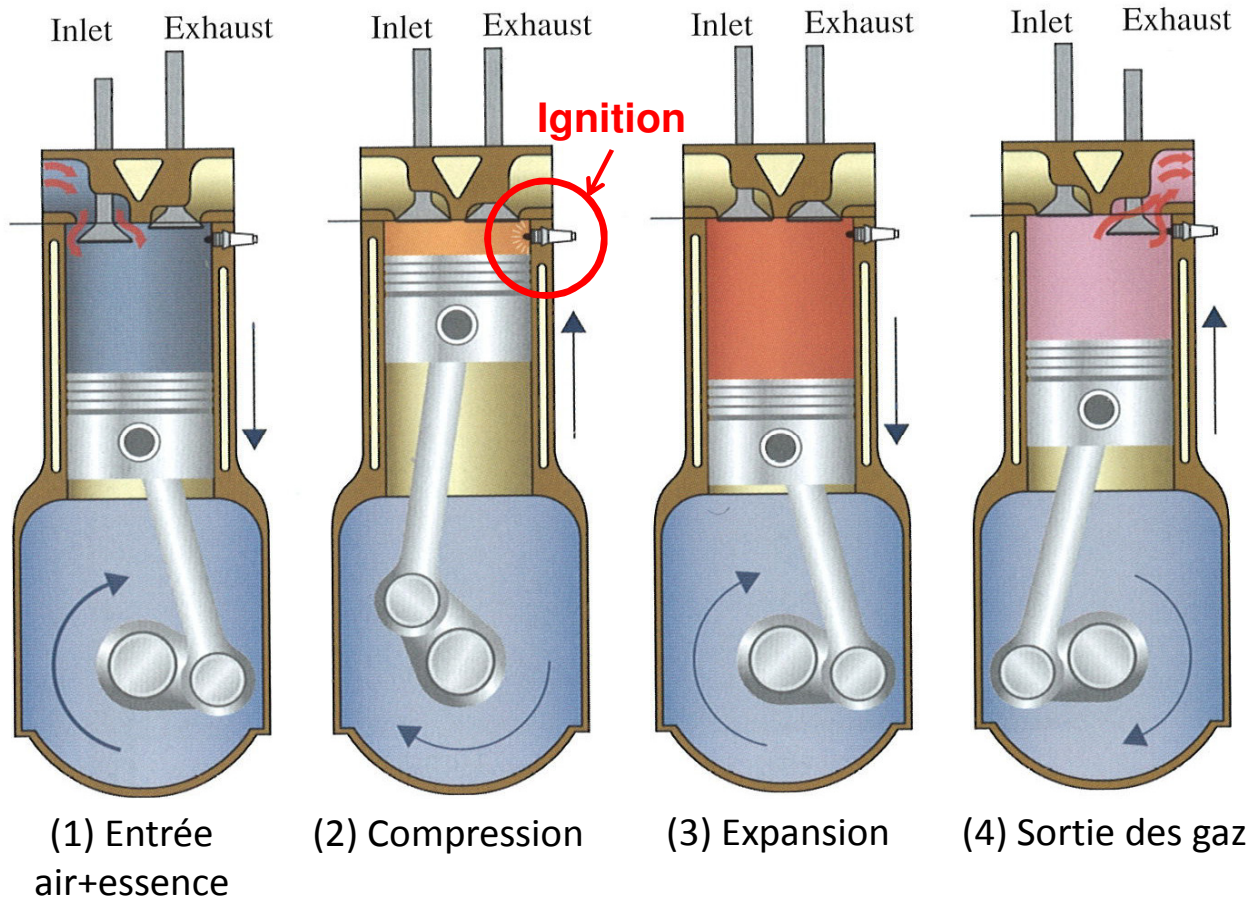


## Exemple 2: Moteur à vapeur



# QUELQUES EXEMPLES

## Exemple 3: Moteur à combustion interne (ex. : moteur 4 temps)

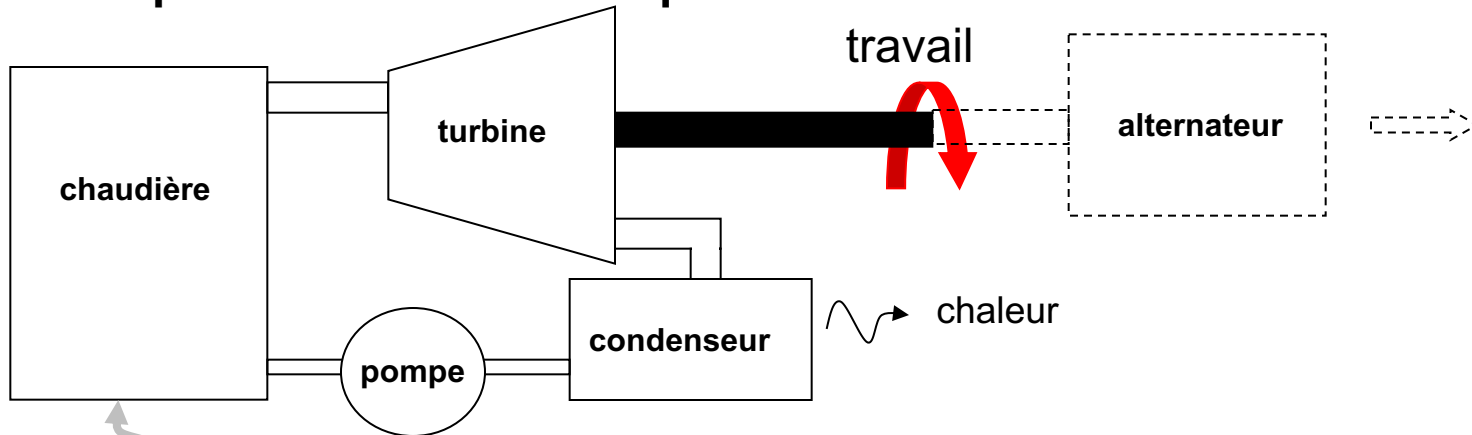


Source: *Thermodynamics – Concepts and Applications*, de Stephen R. Turns (2006)



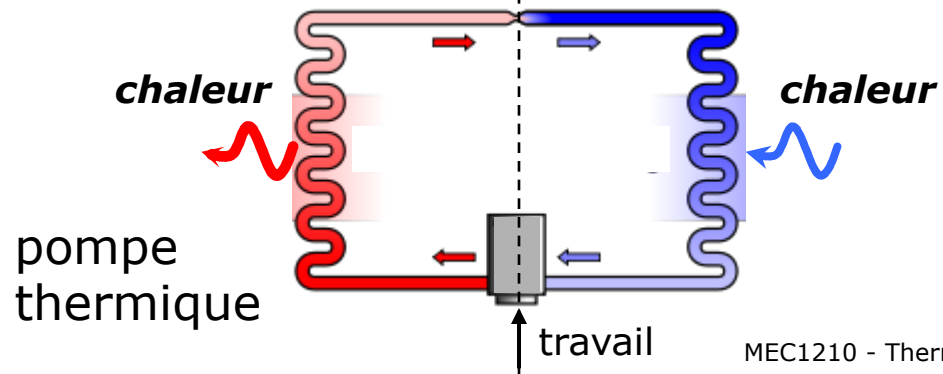
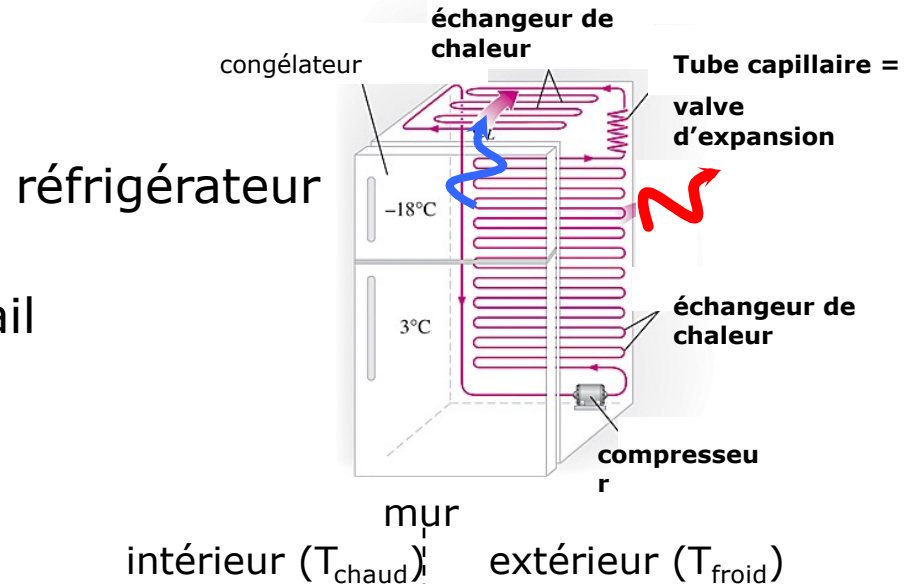
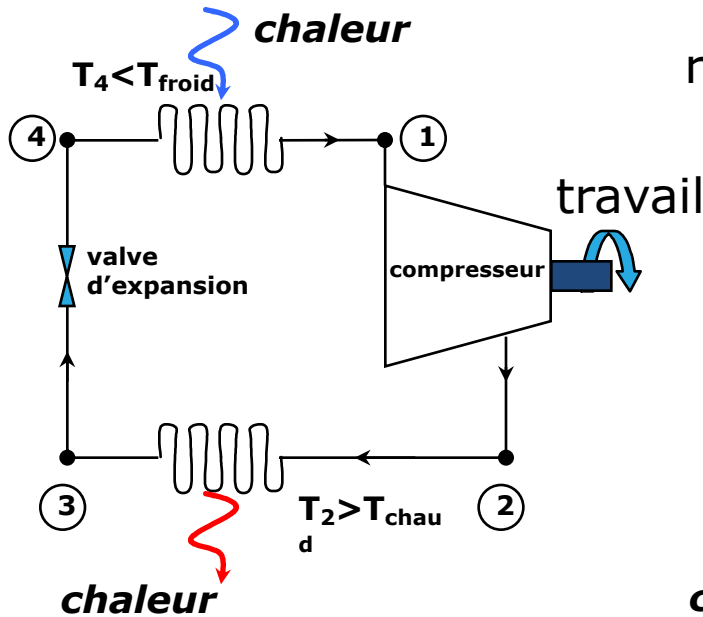
# QUELQUES EXEMPLES

## Exemple 4: Centrale thermique/nucléaire



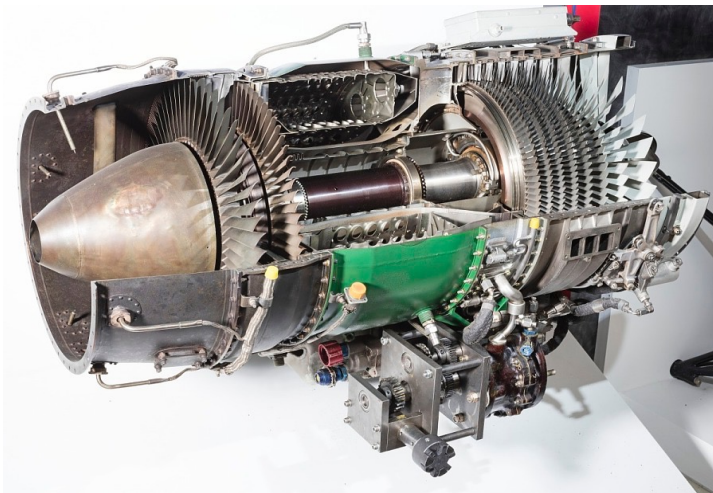
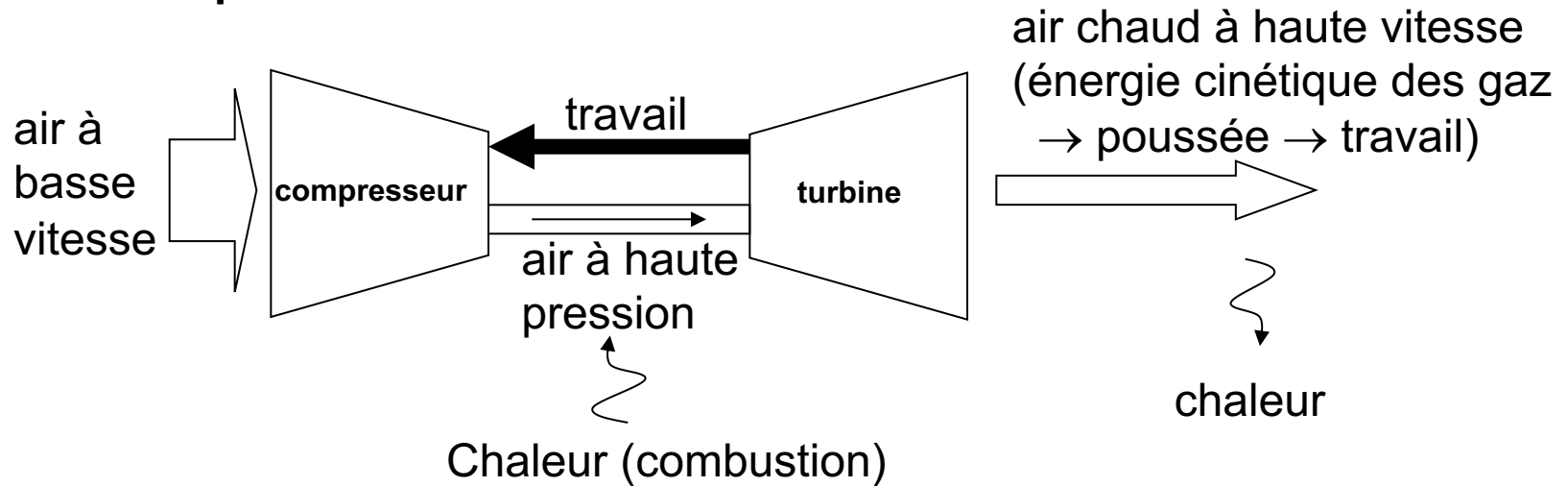
# QUELQUES EXEMPLES

## Exemple 5: Pompes thermiques



# QUELQUES EXEMPLES

## Exemple 6: Turboréacteur



J85-GE-17A

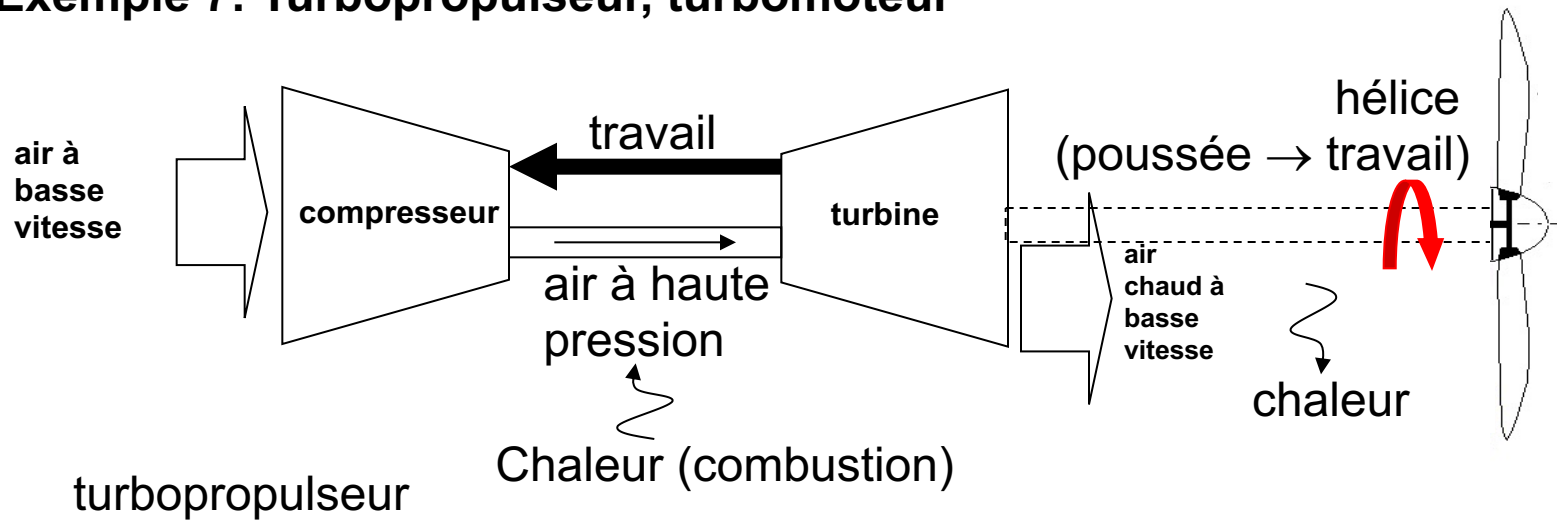


Northrop F-5

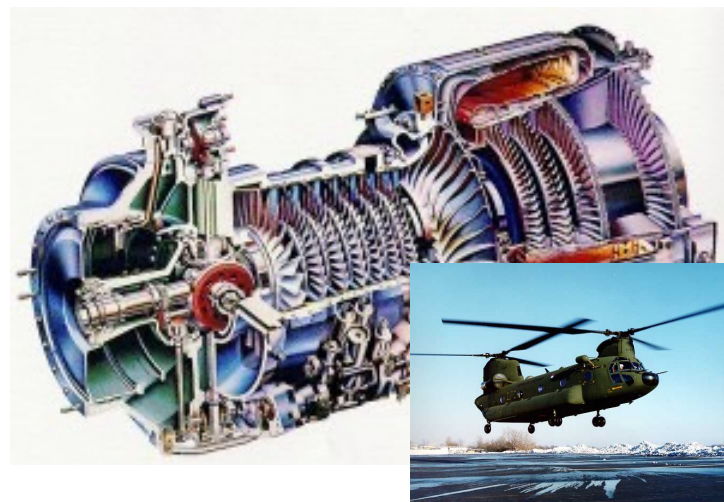
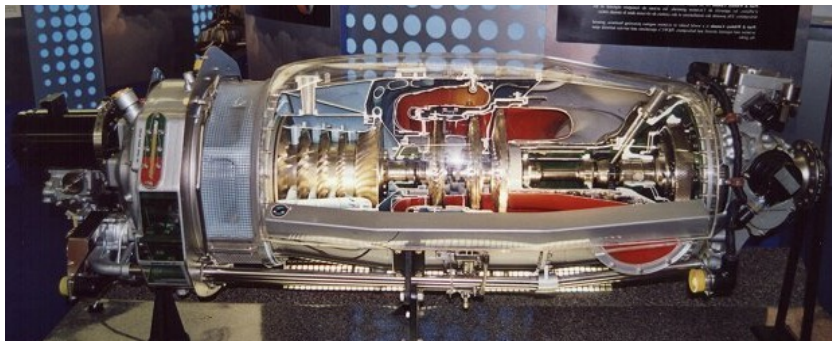


# QUELQUES EXEMPLES

## Exemple 7: Turbopropulseur, turbomoteur



turbopropulseur

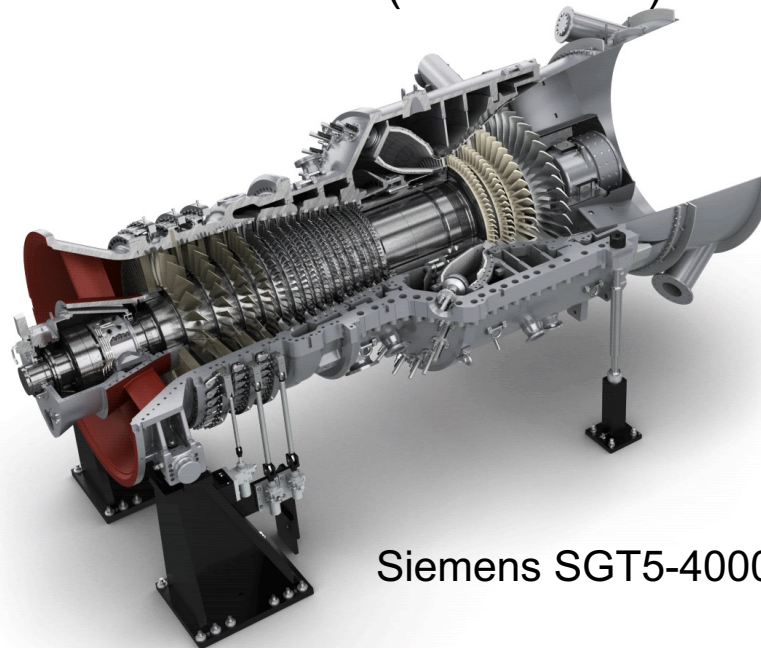
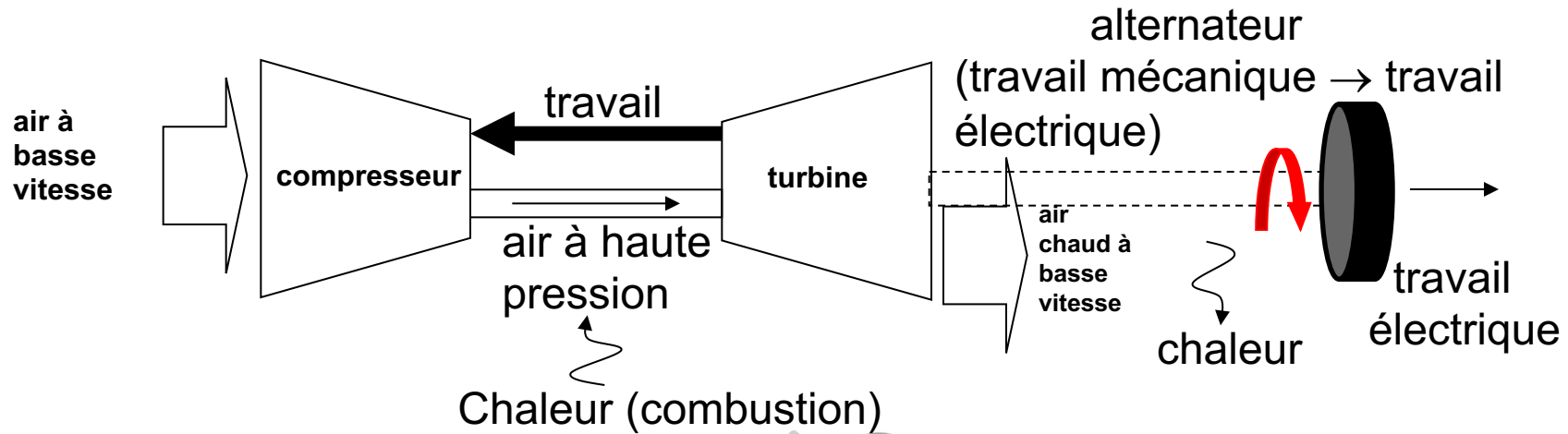


turbomoteur



# QUELQUES EXEMPLES

## Exemple 8: Turbine à gaz (turbo-alternateur)



Siemens SGT5-4000F



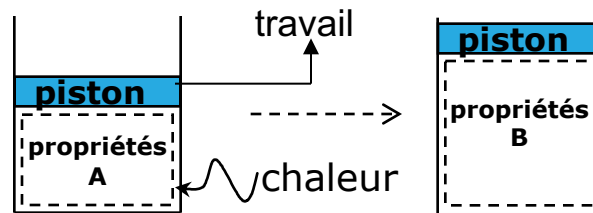
# PLAN DE COURS

## 1) Notions de base

Systemes, propriétés, évolution, énergie, travail, chaleur.

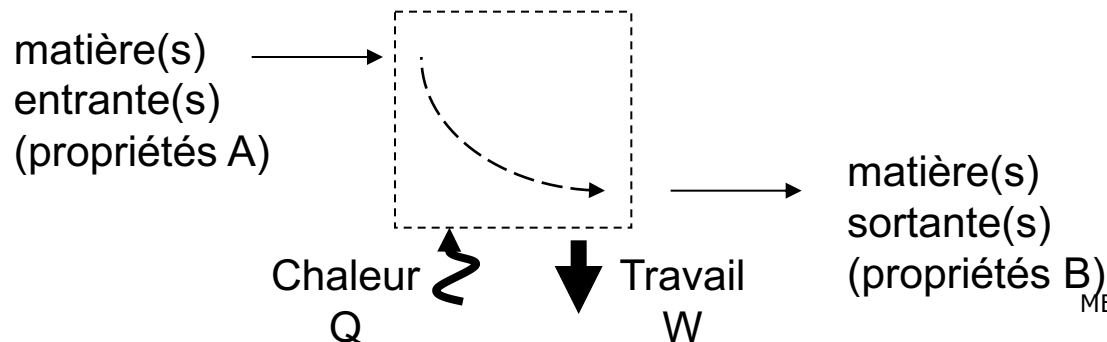
## 2) Premier principe de la thermodynamique (systemes fermés)

Bilan/conservation de l'énergie



## 3) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

## 4) Premier principe de la thermodynamique (systemes ouverts)





# PLAN DE COURS (SUITE)

## 5) Second principe de la thermodynamique Évolutions réversibles et irréversibles



## 6) Entropie

Bilan d'entropie, rendement

## 7) Cycles thermodynamiques communs

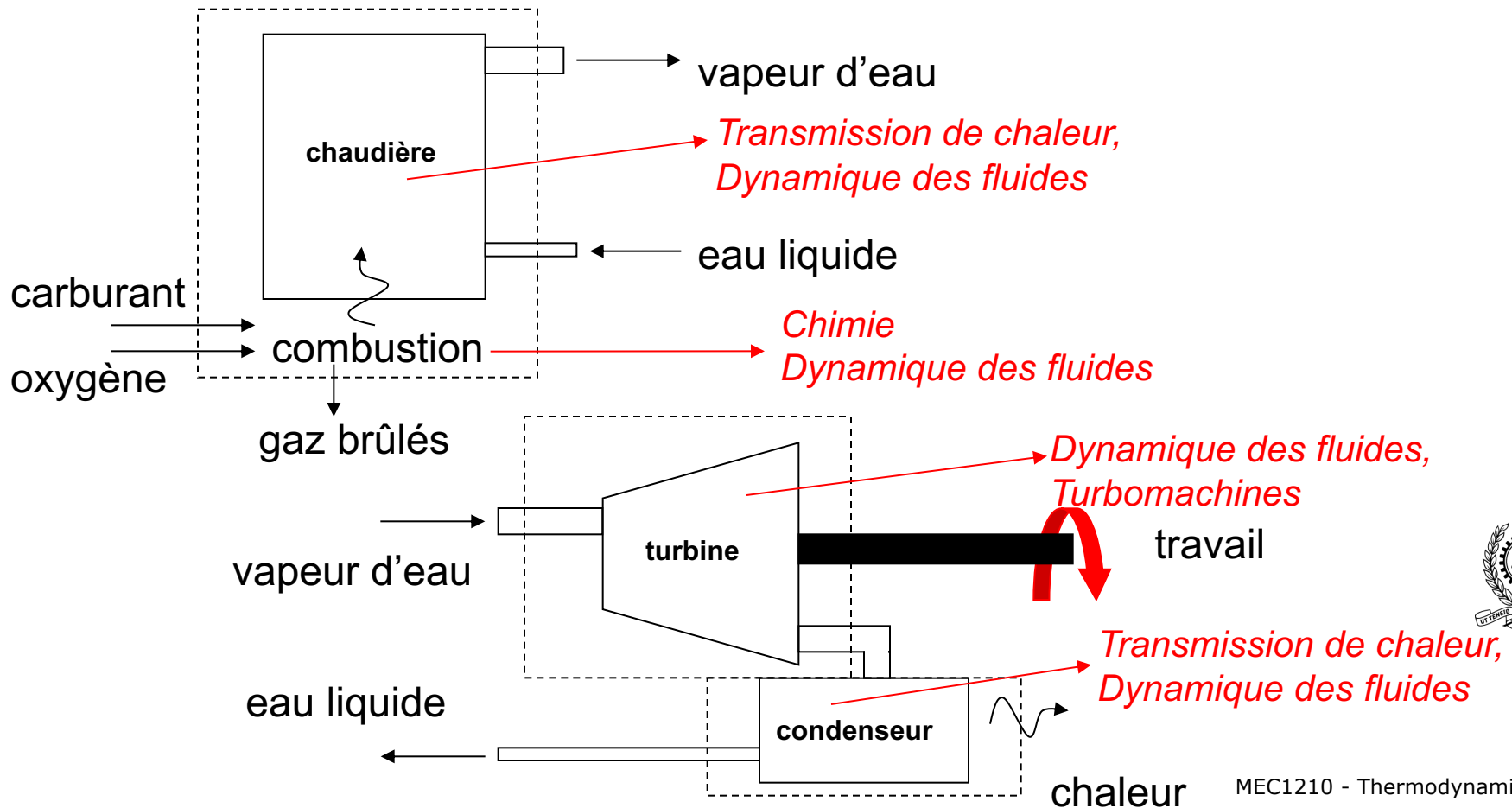
Centrales thermiques, réfrigération, turbines à gaz, moteurs à combustion interne (piston).



## 8) Mélanges non réactifs

# CONTEXTE DU COURS

- Thermodynamique** :
- premier cours de la chaîne thermo-fluide
  - concepts fondamentaux
  - point de vue global



# OÙ ON EN EST

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) **Notions de base et définitions**

heure 2



- **systeme thermodynamique**
- **propriété thermodynamique**
- **état et évolution**
- *unités de mesure*
- *propriétés importantes des fluides*

III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs

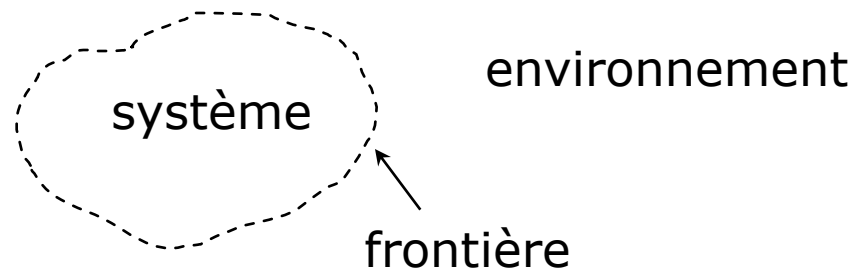


# NOTIONS DE BASE

## 1) Système thermodynamique:

Une quantité de matière ou une région dans l'univers clairement identifiée par une frontière **réelle** ou **imaginaire**

- a) Environnement: tout ce qui est en dehors du système thermodynamique
- b) Frontière: surface fermée qui délimite le système et le sépare de l'environnement. Cette surface peut être **fixe** ou **déformable**.



- c) Univers: système+ environnement



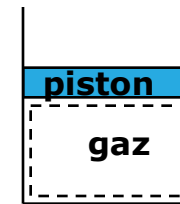
# SYSTÈME THERMODYNAMIQUE

## d) Types de systèmes thermodynamiques

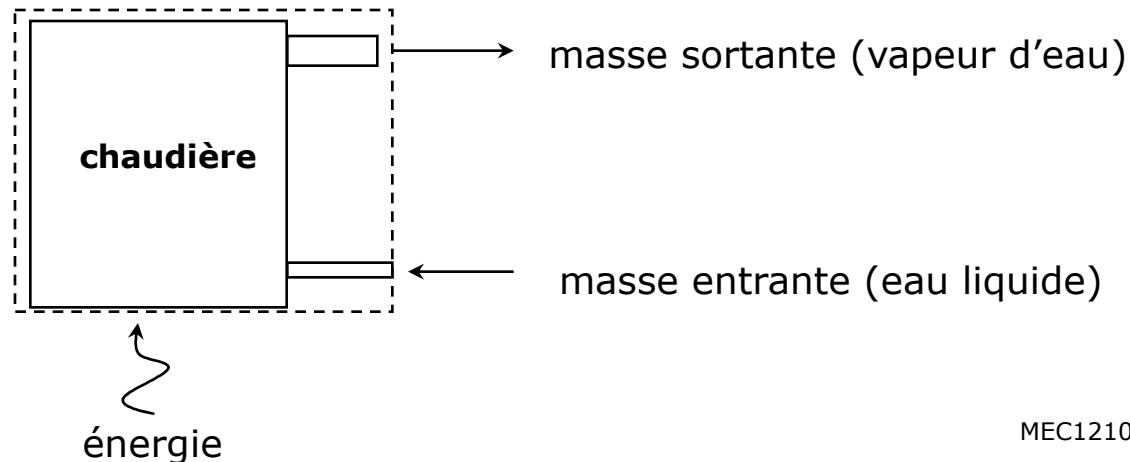
i) **Isolé**: aucun échange de matière, de chaleur ou de travail avec l'environnement

ii) **Fermé**: quantité de matière fixe, frontière *imperméable* à la masse, mais perméable à l'énergie (chaleur ou travail)

iii) **Ouvert**: frontière perméable à la masse et l'énergie



énergie (chaleur ou travail)



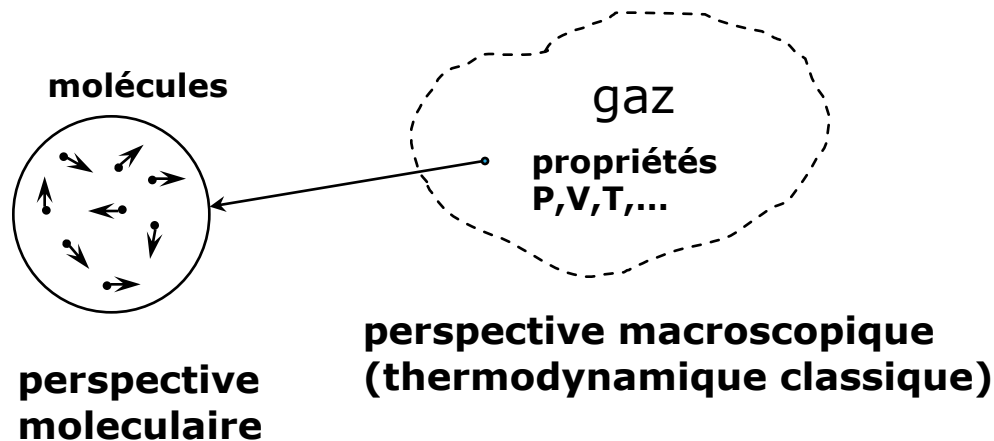
# NOTIONS DE BASE

## 2) Propriété thermodynamique

Une caractéristique *macroscopique* quantifiable d'un système.

**exemples:** pression, température, volume, masse, masse volumique, ...

a) **Continuum**: un modèle considérant la matière comme étant continue et homogène et non fait d'atomes ou de molécules distinctes.

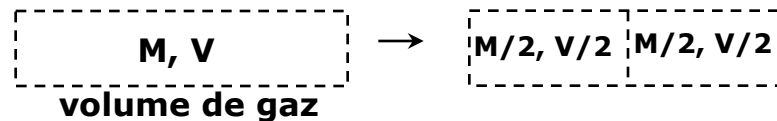


# PROPRIÉTÉ THERMODYNAMIQUE

## b) 2 types de propriétés:

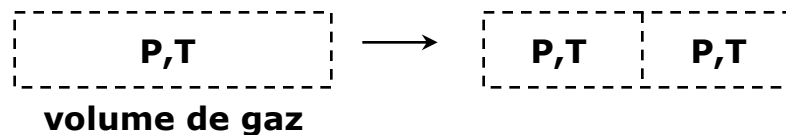
i) propriété extensive: propriété qui dépend de la taille du système

exemples: masse (M), volume (V)



ii) propriété intensive: propriété indépendante de la taille du système

exemples: pression (P), température (T)



**propriété spécifique** =  $\frac{\text{propriété extensive}}{\text{masse}}$  → propriété intensive  
(dénotée en lettre minuscule)

exemples: volume spécifique ( $v$ )= $V/M$ ,  
masse volumique (densité) ( $\rho$ )= $M/V=1/v$



# NOTIONS DE BASE

## 3) État et évolution:

a) État: l'état d'un système thermodynamique est défini par la valeur de ses propriétés.

note: les propriétés ne sont pas toutes indépendantes les unes des autres. Donc, un état peut être spécifié par un nombre défini (limité) de propriétés

exemple: l'état d'un gaz parfait peut être spécifié par seulement deux propriétés car  $PV=nRT$

b) Équilibre thermodynamique: état stable où les propriétés du système ne changent pas avec le temps.

Implique qu'à l'intérieur du système, il y a:

- équilibre thermique (pas de changement de température avec temps)
- équilibre mécanique (pas de changement de force/pression avec le temps)
- équilibre chimique (pas de changement de concentration chimique avec le temps)

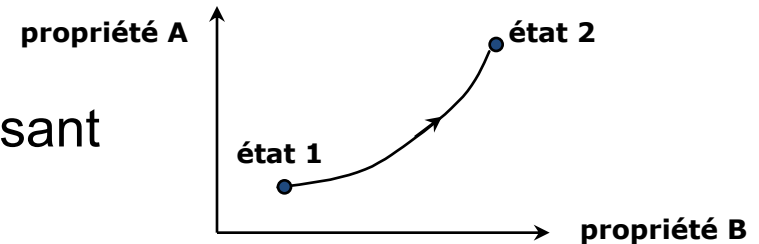




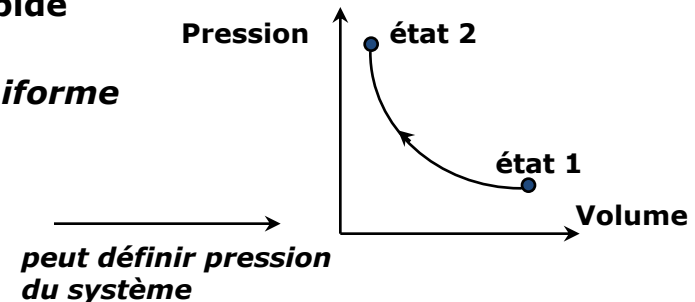
# EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE

c) **Évolution**: processus de changement (de propriété(s)) d'un système d'un équilibre thermodynamique à un autre

i) **Évolution quasi-statique** : évolution passant par une succession d'équilibres thermodynamiques intermédiaires.



exemple: compression d'un gaz par un piston

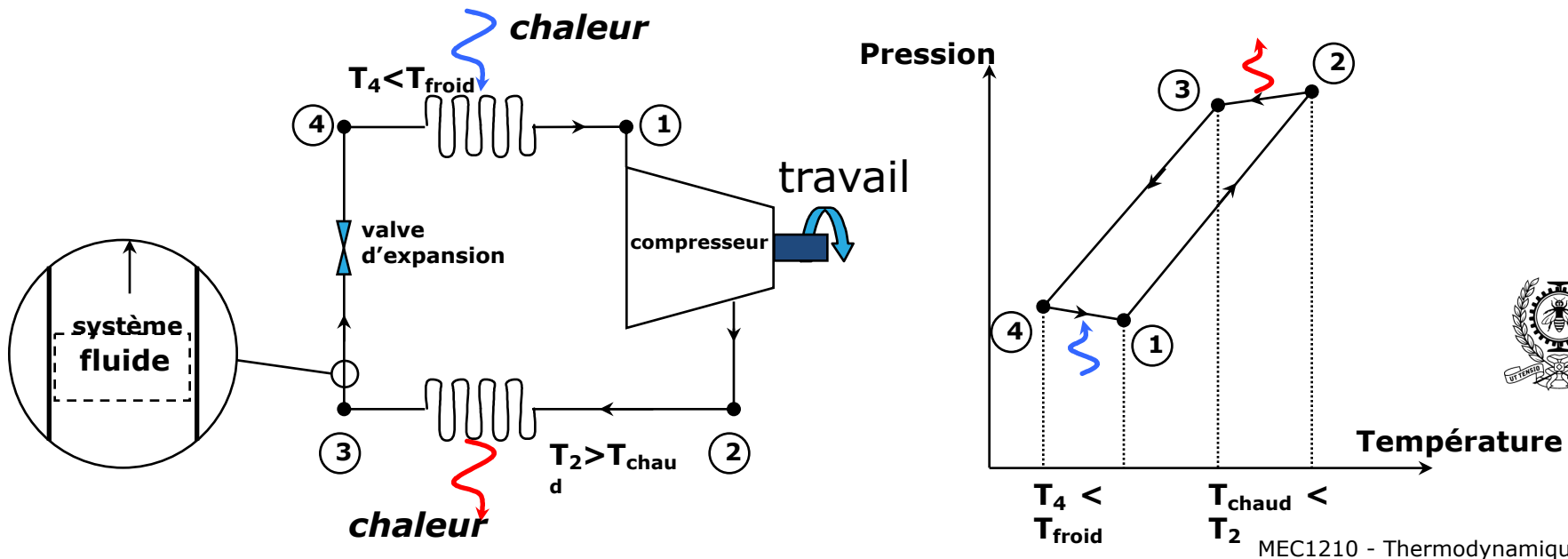


# ÉVOLUTION

**note:** l'évolution quasi-statique est souvent utilisée comme hypothèse pour modéliser les systèmes en thermodynamique

- bonne approximation pour plusieurs processus
- facilite l'analyse

ii) **cycle:** évolution où le système revient à son état de départ.  
exemple: cycle de réfrigération (simplifié)



# NOTIONS DE BASE

d) **Phase**: quantité de matière physiquement homogène (liquide, solide, gaz,...), de composition chimique uniforme

exemple: eau, huile: phases liquides  
air, vapeur d'eau: phases gazeuses

e) **Substance pure**: Possède une composition chimique homogène et invariable. Elle peut exister sous plus d'une phase, mais la composition chimique est la même dans toutes les phases.

Substance pure	Pas une substance pure
Eau	Eau + huile
Air (mélange uniforme de différents gaz)	Air + air liquide (mélange à la composition chimique non-uniforme)
Eau + vapeur d'eau + glace	



# OÙ ON EN EST

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) **Notions de base et définitions**

- *système thermodynamique*
- *propriété thermodynamique*
- *état et évolution*
- **unités de mesure**
- *propriétés importantes des fluides*

Heure 3



III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs



# EXEMPLES

## Masse(m), volume(V), masse volumique( $\rho$ ), volume massique(v) et densité ( $\rho$ ) :

1. La **quantité de matière** se mesure en terme de :
  - Masse (g, kg, lbm, etc.)
  - Moles (g-mole) ou lb-mole, etc. ( $N_A = 6.022 * 10^{23}$ )
2. Le **volume** de matière se mesure en terme de :
  - ml, L, cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, gal, pi<sup>3</sup>, etc.
  - Propriété extensive
3. La **masse volumique** et le **volume massique** (ou **molaire**) :
  - $\rho = \text{masse/volume [ = ] g/ml, kg/m}^3, \text{ lbm/ft}^3, \text{ etc.}$  (Masse volumique)
  - $\rho_{\text{mol}} = \text{moles/volume [ = ] (masse/M)/volume}$  (Molarité)
  - $v = \text{volume/masse [ = ] ml/mg, l/kg, in}^3/\text{lbm, etc.}$  (Volume massique)
  - $v_{\text{mol}} = \text{volume/(masse/M) [ = ] m}^3/\text{mole, pi}^3/\text{lb-mole, etc.}$  (Volume molaire)
4. La **densité relative** :
  - Est le rapport entre la masse volumique d'une substance et celle d'une substance de référence (souvent l'eau liquide à 4°C)
  - Ne possède donc pas d'unités



# UNITÉS DE MESURE

“Une grandeur arbitraire donnée à une quantité physique pour la mesurer”

a) **Unités primaires**: unités pour mesurer des quantités fondamentales, dont

- masse [M]
- longueur [L]
- temps [T]
- température [ $\theta$ ]
- (autres: courant électrique, luminosité, quantité de matière)

b) **Unités secondaires**: unités pour mesurer des quantités dérivées, telles que:

- volume [ $L^3$ ]
- vitesse [ $LT^{-1}$ ]
- pression [Pa,  $ML^{-1}T^{-2}$ ]
- force [N,  $MLT^{-2}$ ],
- énergie, travail [J,  $ML^2T^{-2}$ ]
- etc...



# SYSTÈMES D'UNITÉS

## c) Systèmes d'unités usuels

### i) Système International d'Unités (SI):

Système décimal (base de dix) utilisé dans la grande majorité des pays.

Unités primaires		Unités secondaires	
Grandeur	Unité	Grandeur	Unité
Masse	Gramme [g]	Force	Newton [N]=[kg*m/s <sup>2</sup> ]
Longueur	Mètre [m]	Travail	Joule [J]=[N*m]
Temps	Seconde [s]	Énergie	Joule [J]
Température	Kelvin [K]	Puissance	Watt [J/s]

Préfixes			
pico [p]	10 <sup>-12</sup>	kilo [k]	10 <sup>3</sup>
nano [n]	10 <sup>-9</sup>	mega [M]	10 <sup>6</sup>
micro [μ]	10 <sup>-6</sup>	giga [G]	10 <sup>9</sup>
milli [m]	10 <sup>-3</sup>	tera [T]	10 <sup>12</sup>



# SYSTÈMES D'UNITÉ

## ii) Système Impérial (EES: English Engineering System):

Système arbitraire d'origine britannique, principalement en utilisation aux États-Unis, mais encore en utilisé dans beaucoup d'industries en Amérique du Nord.

Unités primaires	
Grandeur	Unité
Masse	Livre-masse [lbm]
Longueur	Pied [ft]
Temps	Seconde [s]
Température	Rankine [R]
Force	Livre-force [lbf]
Énergie	British thermal unit [Btu]

1 lbf est la force exercée par  
1 lbm sous la gravité terrestre  
de  $32.174 \text{ ft/s}^2$   
 $1 \text{ lbf} = 4.448 \text{ N}$

1 calorie est la quantité  
d'énergie nécessaire  
pour augmenter la  
température de 1g  
d'eau de  $1^\circ\text{C}$

1 Btu est l'énergie requise pour augmenter la  
température de 1 lbm d'eau à  $68^\circ\text{F}$  de  $1^\circ\text{F}$ .  
 $1 \text{ Btu} = 1055.056 \text{ J}$





# AUTRES UNITÉS

Unités secondaires	
Grandeur	Unité
Puissance	Cheval-vapeur [hp], 1 hp = 746 W
Puissance	Btu/h, 1000 Btu/h = 293.07 W
Volume	Galon [gal], 1 gal US = 3.78 L 1 gal Imp. = 4.55 L Once liq. [fl.oz.], 1 fl.oz. US = 1/16 pint = 1/128 gal. US 1 fl.oz. Imp. = 1/20 pint = 1/160 gal. Imp.
Volume	Pied cube [ft <sup>3</sup> ], 1 ft <sup>3</sup> = 28.32 L

## Incidents liés aux erreurs de conversion

- Mars Climate Orbiter (N\*s vs lbf\*s)
- Air Canada vol 143, « Gimli Glider » (kg/L vs lb/L)
- Korean air cargo vol 6316 (m vs ft)

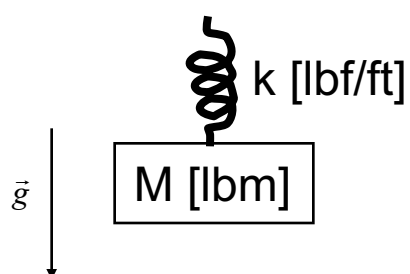


# HOMOGÉNÉITÉ DIMENSIONNELLE

On ne peut additionner et soustraire que des quantités physiques équivalentes, c'est-à-dire qui sont exprimées en unités équivalentes.

Donc tous les termes d'une équation doivent avoir les mêmes unités.

Très pratique en génie pour vérifier vos dérivations durant la résolution des problèmes


$$\sum F = k\Delta L - Mg$$

$\left[\frac{lbf}{ft}\right] [ft] [lbm] \left[\frac{ft}{s^2}\right]$

manque:  $\frac{1}{g_c} \left[\frac{lbm \ ft}{lbf \ s^2}\right]$

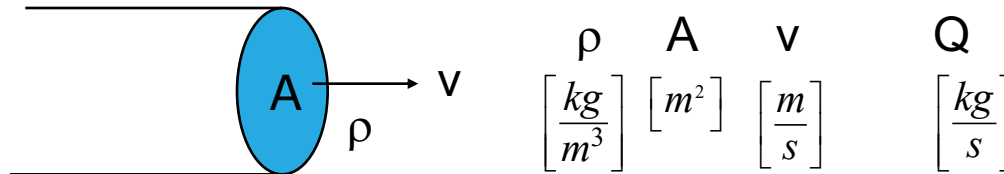


# HOMOGÉNÉITÉ DIMENSIONNELLE

Peut être exploitée pour dériver des relations entre différentes quantités physiques reliées entre elles

**Exemple:** trouver le débit massique d'eau ( $Q$ ) en  $[\text{kg/s}]$  à partir de la densité ( $\rho$ ), de l'aire ( $A$ ) d'un tuyau et de la vitesse moyenne ( $v$ ) de l'écoulement

$$Q = f(\rho, A, v)$$



$$Q = \rho Av$$

**Analyse dimensionnelle** : technique pour réduire le nombre de variables affectant un phénomène physique.



# ANALYSE DIMENSIONNELLE

## Théorème de Buckingham $\pi$

- Si une équation physique existe entre  $n$  variables, totalisant  $k$  dimensions, l'équation originale peut être remplacée par une équivalente comportant  $p = n - k$  paramètres adimensionnels

$$\mathcal{F}(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \mathcal{F}(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_p)$$



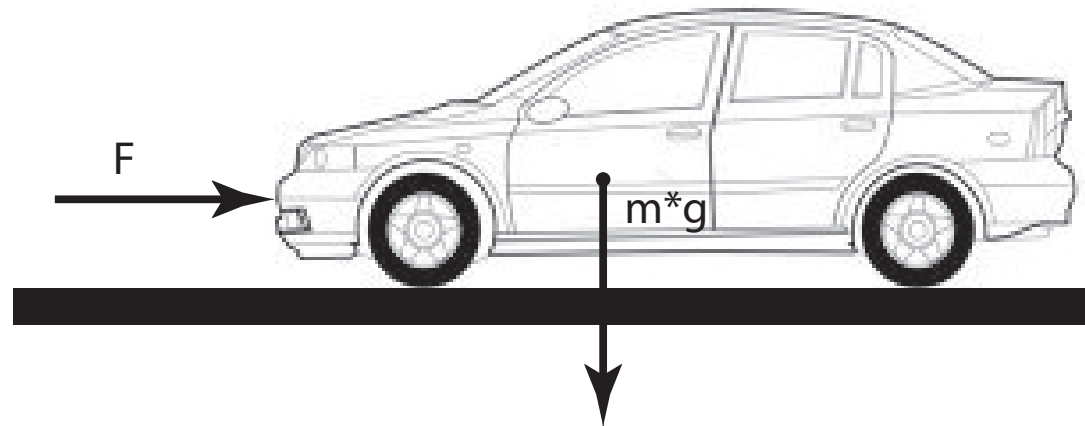
# QUESTION CONCEPTUELLE

## UNITÉS & ÉNERGIE

Une auto ayant une masse de 1.75 tonne consomme 2.8 L d'essence pour parcourir (à vitesse constante) une distance de 25 km. Le moteur doit vaincre une force  $F$  s'opposant à son avancée de 750 N pour garder sa vitesse constante. Le pouvoir calorifique de l'essence est de 10 215 kcal/kg.

Sachant que la masse volumique de l'essence est de  $702 \text{ kg/m}^3$ , déterminer le rendement énergétique de ce déplacement en voiture.

On donne  $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$



- A. 22.3%
- B. 56.5%
- C. 44.6%
- D. 2.3%



# OÙ ON EN EST

I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique

II) **Notions de base et définitions**

- *système thermodynamique*
- *propriété thermodynamique*
- *état et évolution*
- *unités de mesure*
- **propriétés importantes des fluides**

Heure 4



III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs



# NOTIONS DE BASE

## 5) Propriétés importantes des fluides – P v T

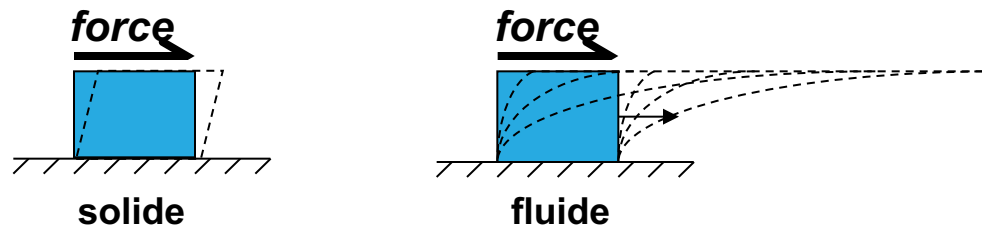
Les fluides sont au cœur de la majorité des systèmes thermodynamiques pour le transport de la chaleur et de la masse.

a) Un **fluide** (définition s'appliquant aux liquides et aux gaz) est une matière qui:

- prend la forme du contenant dans lequel il se trouve



- se déforme continuellement lorsque soumise à une force de cisaillement



Pour décrire **l'état** d'un fluide, on utilise souvent les propriétés suivantes: le volume spécifique ( $v$ , 1/densité), la pression ( $P$ ) et la température ( $T$ ).



# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

## b) Volume spécifique et masse volumique (densité)

i) volume spécifique ( $v$ ): volume ( $V$ ) occupé par unité de masse ( $M$ ) d'une matière

$$v = \frac{V}{M}$$

$$\text{unité: } [v] = \left[ \frac{m^3}{kg} \right] = \left[ \frac{ft^3}{lbm} \right]$$

(SI)      (EES)

ii) masse volumique (densité) ( $\rho$ ): masse ( $M$ ) d'une matière par unité de volume ( $V$ ), c'est-à-dire l'inverse du volume spécifique

$$\rho = \frac{M}{V}$$

$$\text{unité: } [\rho] = \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \left[ \frac{lbm}{ft^3} \right]$$

(SI)      (EES)

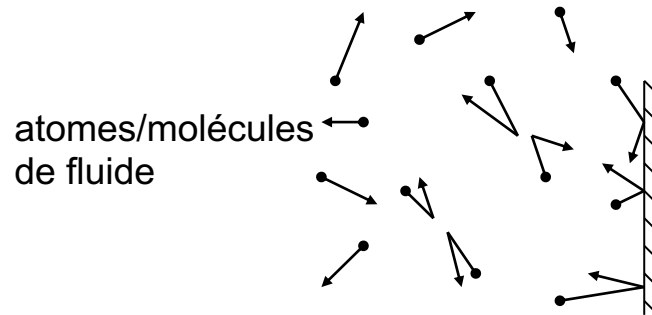




# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

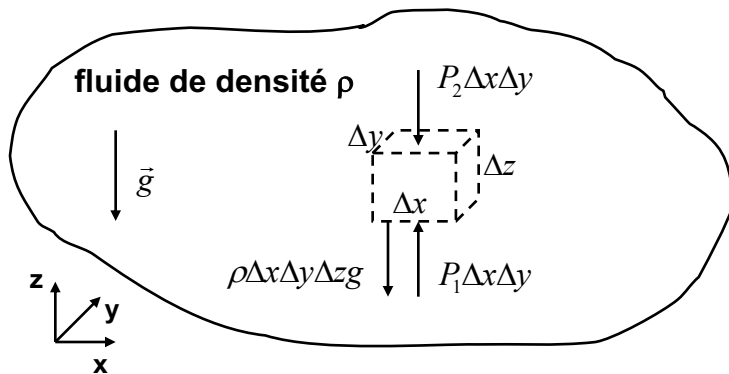
c) **Pression**: force par unité d'aire exercée par un fluide sur une surface, normale (perpendiculaire) à la surface

i) **Perspective moléculaire**: la pression découle du rebondissement des atomes/molécules du fluide entre eux ou avec une surface



ii) **Variation de la pression dans un champ de gravité**

balances des forces, direction z (physique 101):



$$\sum F_z = P_1\Delta x\Delta y - P_2\Delta x\Delta y - \rho\Delta x\Delta y\Delta z g = \rho\Delta x\Delta y\Delta z \overset{0}{a} = 0$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\Delta z} \equiv \frac{\Delta P}{\Delta z} = -\rho g$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta z} = -\rho g \longrightarrow$$

$$\boxed{\frac{dP}{dz} = -\rho g}$$



# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

## ii) Variation de la pression dans un champ de gravité (cont.)

$$\int_{P_{ref}}^P dP = - \int_{z_{ref}}^z \rho g dz$$

*note: par le même raisonnement, la pression ne varie pas avec x et y*

En théorie  $\rho=f(x,y,z)$ , cependant:

- les liquides sont en général presque incompressibles
- pour les gaz sur une petite variation de hauteur ( $\Delta z$  **petit**), la densité ne varie pas beaucoup

Donc pour ces deux cas:  $\rho \cong \text{constant}$

**donc**  $\int_{P_{ref}}^P dP = -\rho g \int_{z_{ref}}^z dz \quad \longrightarrow \quad \boxed{P = P_{ref} + \rho gh} \quad \text{où} \quad \boxed{h \equiv z_{ref} - z}$

***h*** est la *profondeur* de fluide dans la *direction de la gravité*



# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

Pour les liquides ( $\sim$ incompressible) et les gaz sur une petite variation de hauteur ( $\Delta z$  *petit*):  $\rho \cong \text{constant}$ .

Dans ce cas, pour relier la pression entre deux points **connectés par un même fluide**

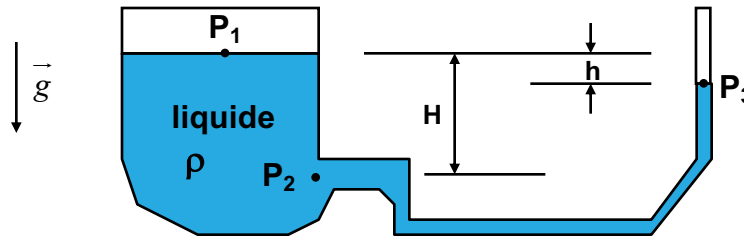
$$P = P_{ref} + \rho gh$$

où

$$h \equiv z_{ref} - z$$

$h$  est la **profondeur** de fluide dans la **direction de la gravité**

ex.1:



Trouver les pressions  $P_2$  et  $P_3$  en terme de  $P_1$ , et  $P_3$  en terme de  $P_2$

$$P_2 = P_1 + \rho g H$$

$$P_3 = P_1 + \rho g h$$

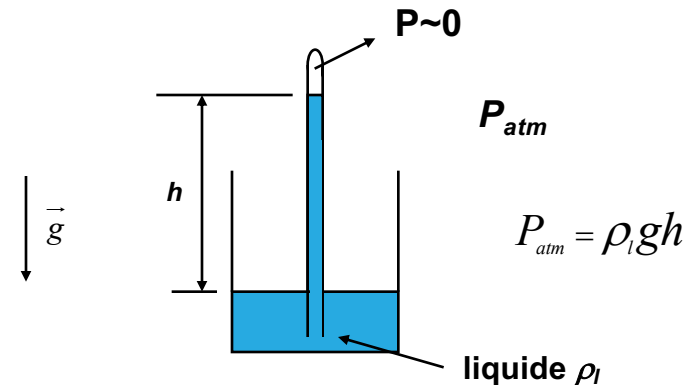
$$P_3 = P_2 - \rho g (H - h)$$



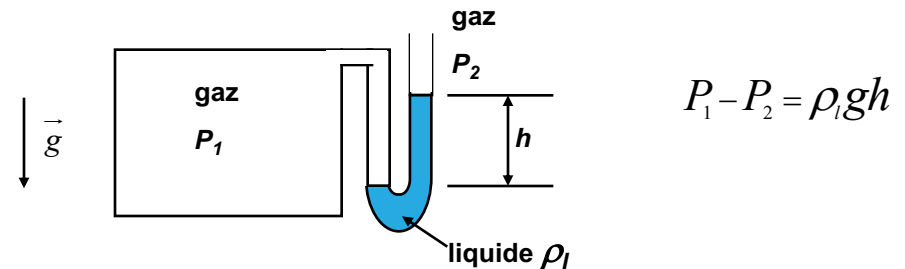
# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

## iii) Instruments de mesure de pression

- baromètre: pression atmosphérique



- manomètre: pression différentielle



'pression manométrique': pression différentielle par rapport à la pression atmosphérique

- capteurs de pression: mesure la force exercée par la pression

- Déformation d'un solide (changement de résistance électrique)
- Matériaux piézo-électriques (force  $\rightarrow$  voltage)

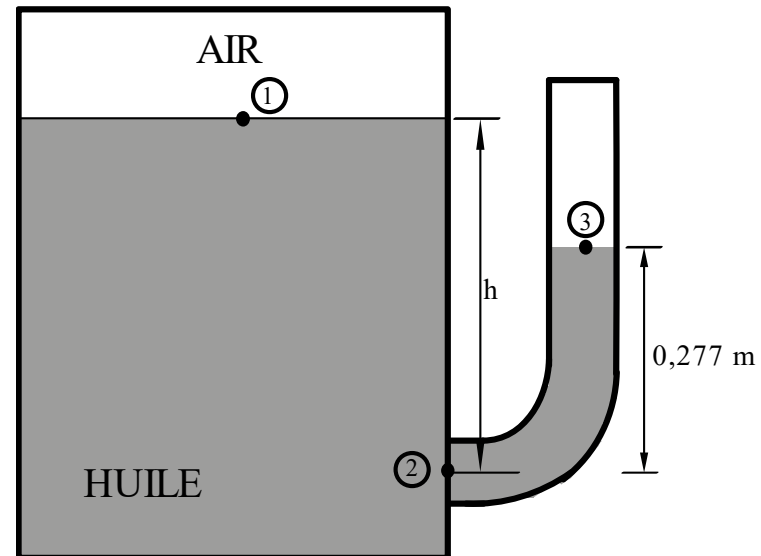


# QUESTION CONCEPTUELLE

## VARIATION DE LA PRESSION DANS UN FLUIDE

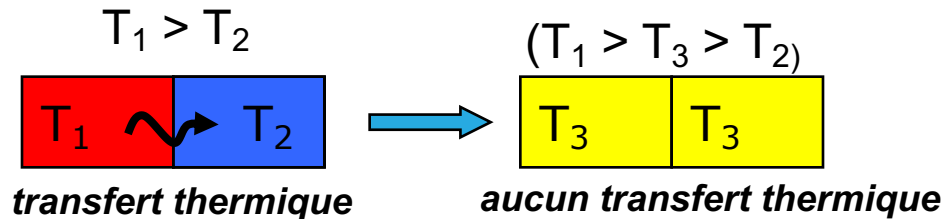
Un bassin fermé contient de l'air et de l'huile. Des mesures de pression sont prises aux points 1 et 2 indiqués sur la figure et donnent respectivement 25 kPa et 30 kPa. La densité de l'huile étant de  $920 \text{ kg/m}^3$ , calculer la variation de hauteur entre les points 1-2 ainsi que la pression dans l'air au point 3.

- A. 0.554 m et 32.5 kPa
- B. 0.554 m et 27.5 kPa
- C. 0.322 m et 28.3 kPa
- D. 0.554 m et 25.0 kPa



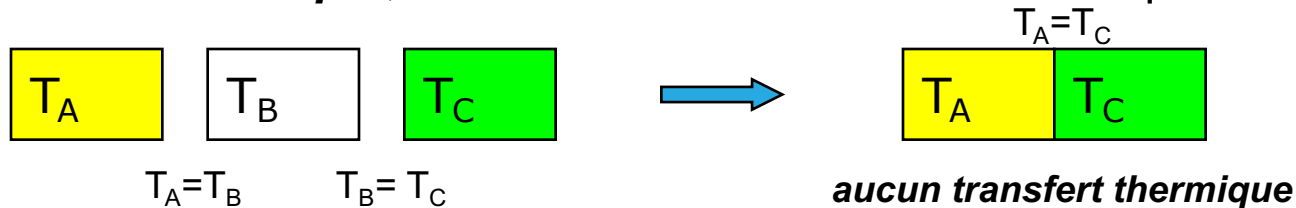
# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

## d) Température



## i) Principe zéro de la thermodynamique

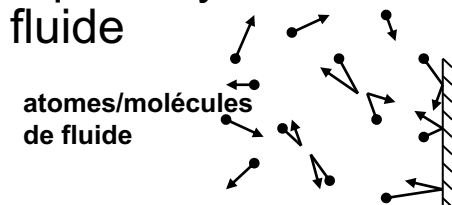
- pour chaque système, il existe une propriété qui s'appelle **température**
- l'égalité de la température est une condition nécessaire et suffisante pour l'**équilibre thermique**, c'est-à-dire aucun transfert thermique



## ii) Perspective moléculaire

La **température** est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des atomes/molécules (qui vibrent et/ou bougent) du fluide

(la pression est liée à la fréquence des collisions entre les atomes/molécules en mouvement)



# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

## iii) Échelles de température

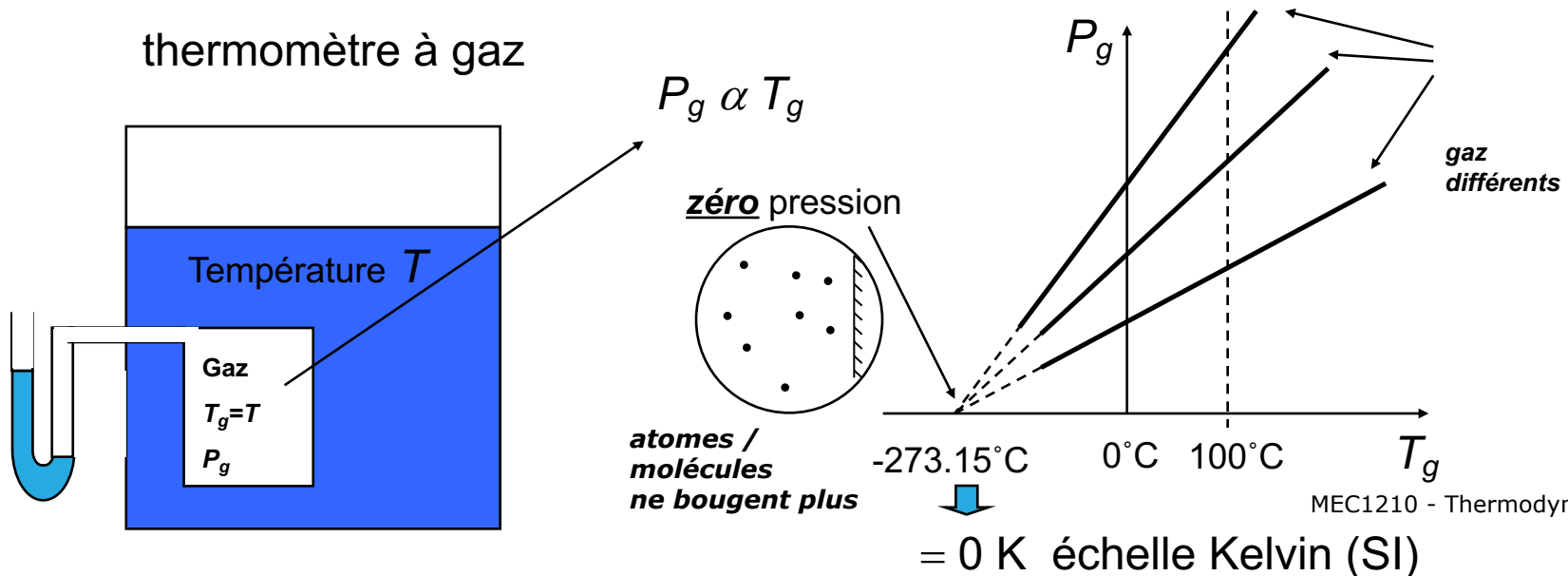
**Communes:** basées sur des phénomènes facilement reproductibles

- SI : Celsius [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- EES : Fahrenheit: [ $^{\circ}\text{F}$ ] = [ $^{\circ}\text{C}$ ]x1.8 + 32

**Thermodynamique:** indépendante des propriétés de la matière.

Échelle Celsius (SI), basée sur les points de congélation et d'évaporation de l'eau, définis comme  $0^{\circ}\text{C}$  et  $100^{\circ}\text{C}$

Pour les gaz à basse pression, la pression est proportionnelle à la température lorsque le volume est constant.



# PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

## Échelles thermodynamiques :

- SI : Kelvin (SI):  $[K] = [^{\circ}C] + 273.15$  ( $\Delta T$  of 1K =  $\Delta T$  of  $1^{\circ}C$ )
- EES : Rankine:  $[R] = [^{\circ}F] + 459.67 = [K] \times 1.8$

## iv) Instruments de mesure

- **Thermomètre à gaz**
- **Thermomètre:** mesure le changement du volume d'un liquide (ex. mercure, alcool,...) en fonction de la température
- **Thermocouple:** mesure le voltage généré par le contact de deux métaux différents et qui est fonction de la température
- **Thermistor:** Composante faite d'un matériau (en général céramique ou polymère) dont la résistance électrique est fonction de la température
- **Thermomètre optique:** mesure la température d'une surface par rayonnement électromagnétique





# MÉTHODE DE RÉOLUTION

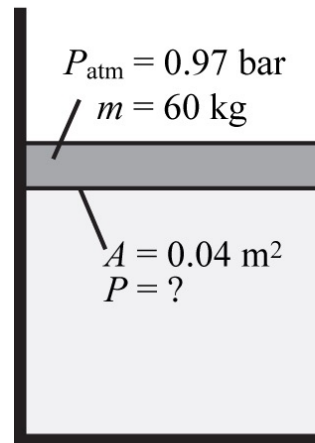
Approche systématique pour résoudre des problèmes en génie en général et en thermodynamique en particulier:

- 1) Résumez le problème dans vos propres mots: pour vous assurer de le comprendre et de savoir ce qui est demandé.
- 2) Faites un schéma physique du système, incluant les informations connues et dessinez les interactions avec l'environnement.
- 3) Écrivez une liste des hypothèses/suppositions que vous allez faire pour simplifier le problème. Justifiez au besoin.
- 4) Définissez le système et y appliquez les principes physiques, utilisant les hypothèses/suppositions en (3) pour les simplifier.
- 5) Obtenir les propriétés manquantes par les équations d'état ou tables (indiquez la source)
- 6) Remplacer les valeurs en (2) et (5) dans les équations dérivées en (4) pour calculer la solution. Utiliser le principe d'homogénéité des unités pour vérifier les équations.
- 7) Assurez-vous que les résultats sont raisonnables, et s'ils le permettent, vérifiez certaines des hypothèses

**Note sur les chiffres significatifs**: Faites attention de ne pas utiliser trop de décimales, ce qui suggérerait par erreur qu'une solution est plus précise qu'elle ne l'est en réalité.



# EXEMPLE #1 – PRESSION DANS UN CYLINDRE



- Quelle est la pression dans le cylindre?
- Changement de pression si un apport de chaleur fait doubler le volume du gaz?

