

MEC1210 - THERMODYNAMIQUE

Hiver 2024

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

Disponibilités à définir

La thermodynamique :

- C'est quoi
- Exemples de systèmes thermodynamiques

Le cours :

- Plan de cours
- Objectifs
- Méthodologie



PARCOURS – BRUNO SAVARD

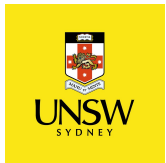
↑ juin 2020 – ajd. Professeur adjoint – Polytechnique Montréal, CAN



2019 – juin 2020 Professeur adjoint – Université d'Ottawa, CAN



2017 - 2018 Postdoc – University of New South Wales, AUS



2015 - 2016 Postdoc – Politechnika Warszawska, POL



2011 - 2015 M.Sc., Ph.D. – California Institute of Technology, USA



2007 - 2011 B. Ing., Dipl. Ing., Master recherche –
ISAE-Supaéro, FRA
Polytechnique Montréal, CAN

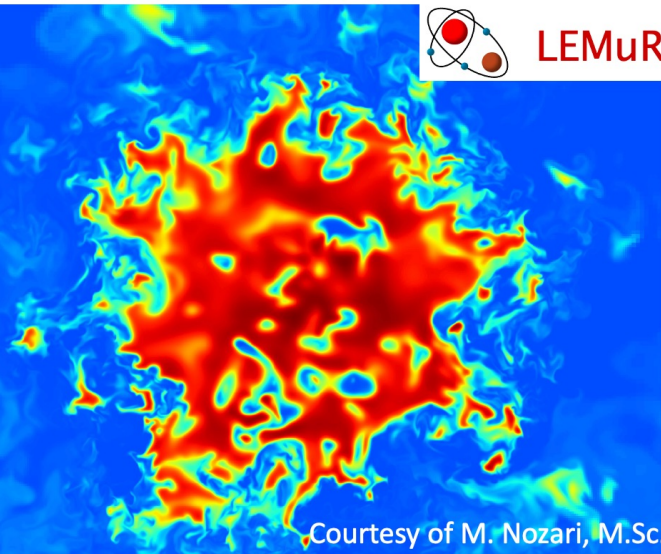


Simulation haute-fidélité de phénomènes de combustion

Temperature field through a 70% H₂ / 30% CH₄ model gas turbine swirling flame

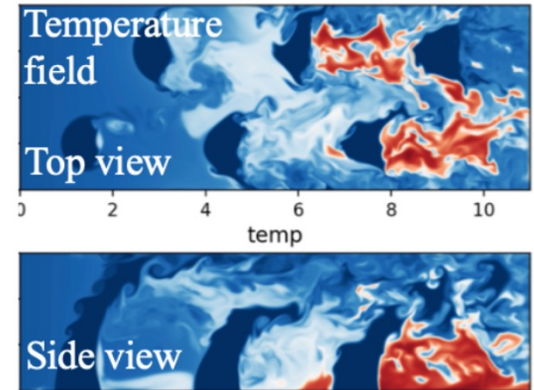
Obtained through direct numerical simulation

Computed over several days on 20,000+ CPUs

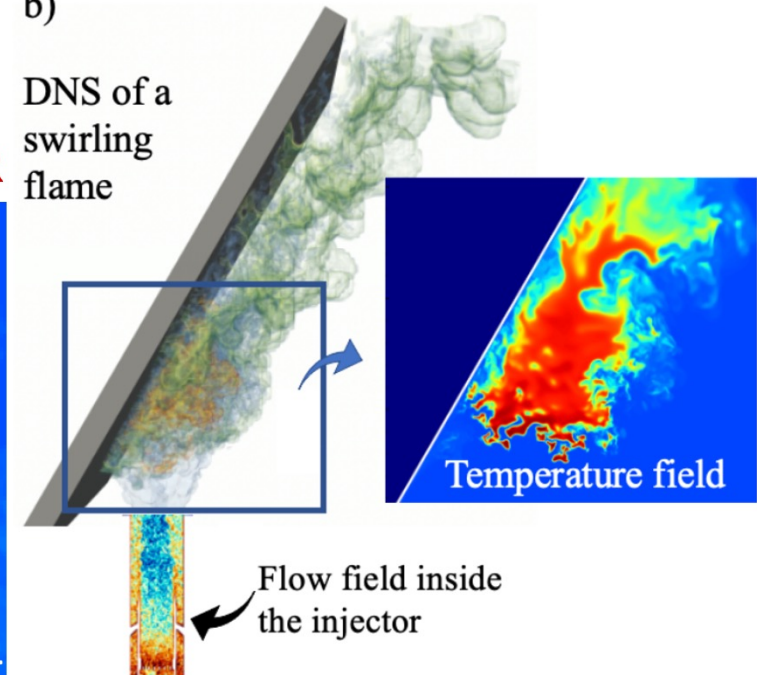


Courtesy of M. Nozari, M.Sc.

a)
DNS of micromix combustion



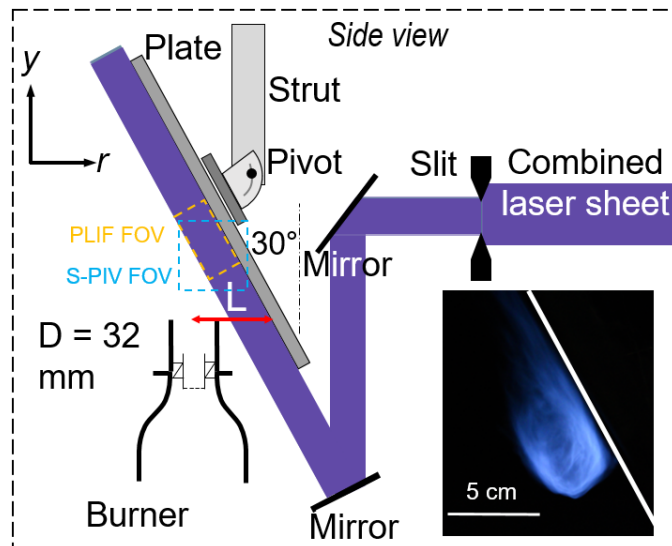
b)
DNS of a swirling flame



INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD

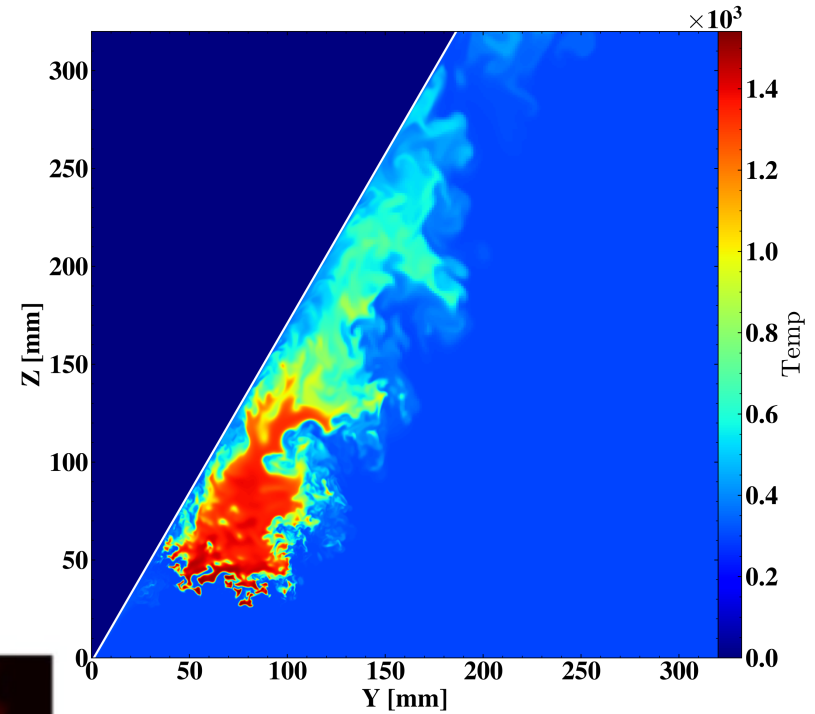
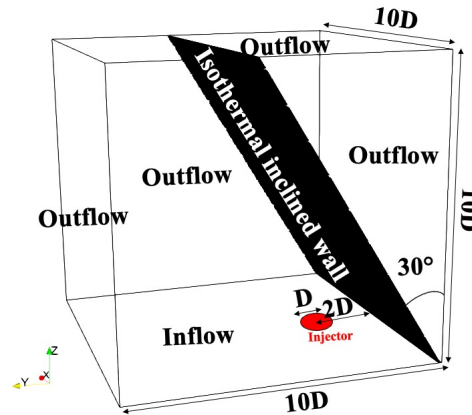
1. Étude des interactions flamme-paroi pour la combustion d'hydrogène/ammoniac dans les turbines à gaz

Collaboration avec le CNRC,
NREL et Siemens Energy
Canada



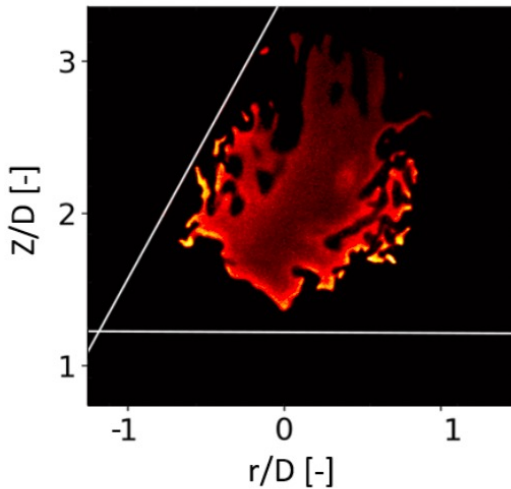
INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD

Simulation numérique de la flamme expérimentale :



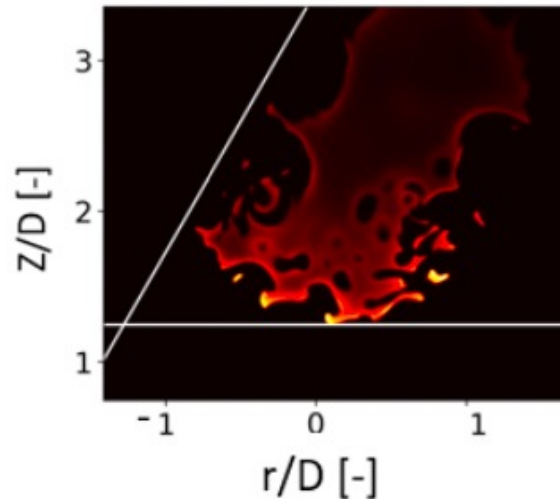
Expérimental

OH



Numérique

OH

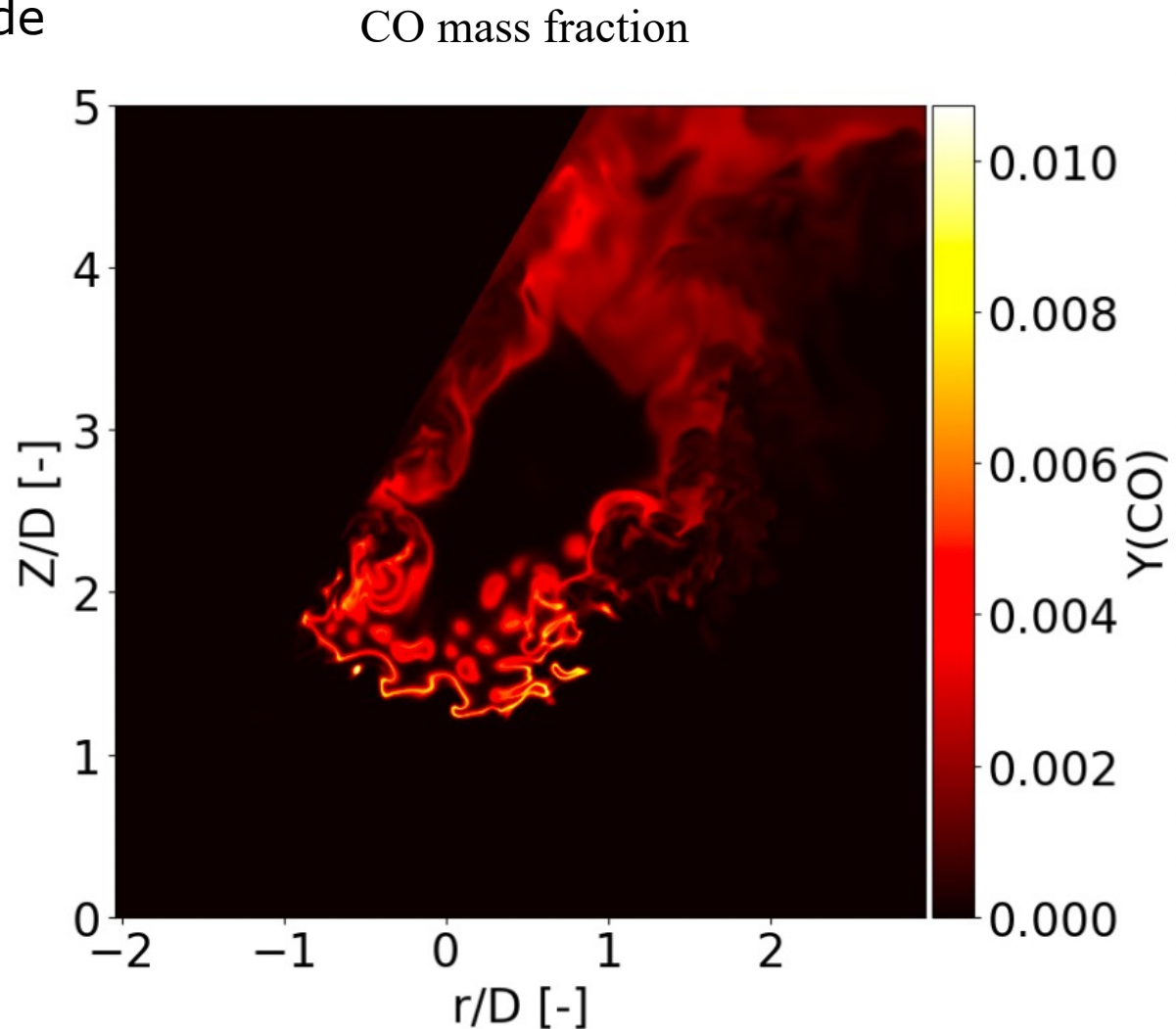


INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD



INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD

Important niveau de combustion incomplète. À éviter dans une chambre de combustion !

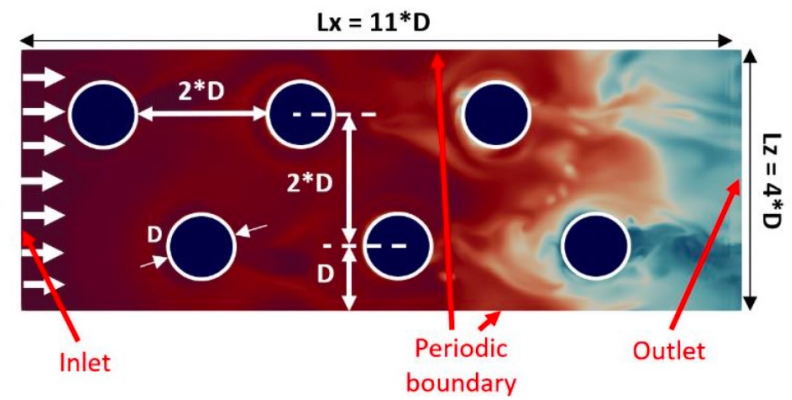
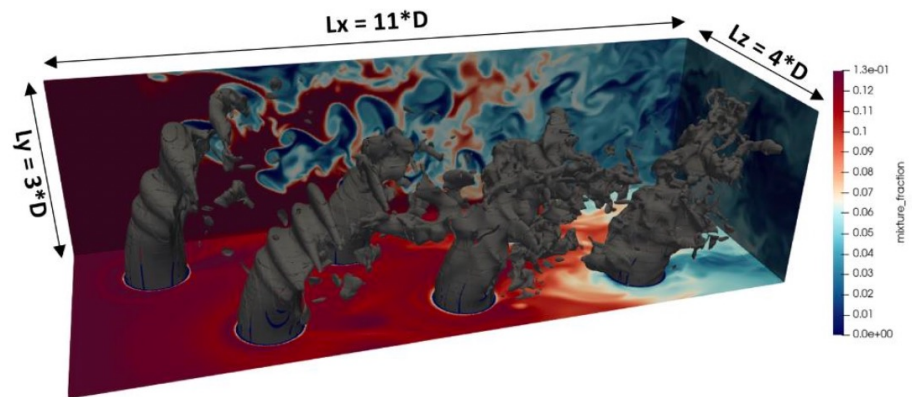


INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD

2. Auto-allumage et stabilisation de flamme dans les systèmes d'injection de turbines à gaz

Collaborations avec Siemens Energy Canada, NREL, CNRC, University of Toronto, McGill University, Étienne Robert (Poly), Université de Sherbrooke

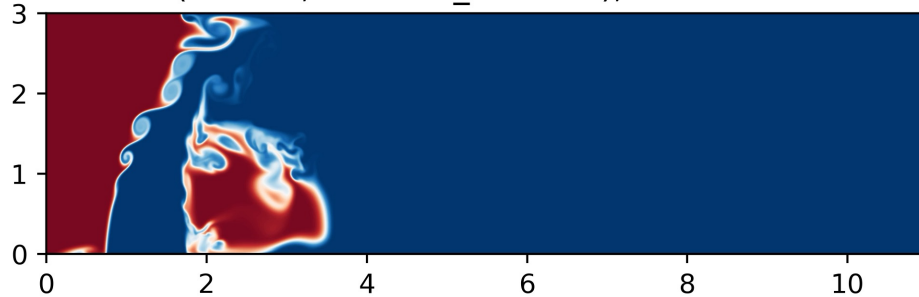
1. Auto-allumage non-désiré dans les pré-mélangeurs de turbines à gaz
2. Stabilisation de flammes d'hydrogène avec injection micromix



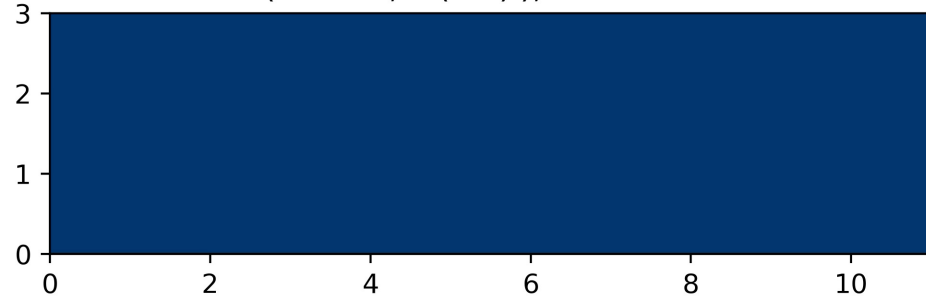
INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD

$t^* = 0.803098591549296$

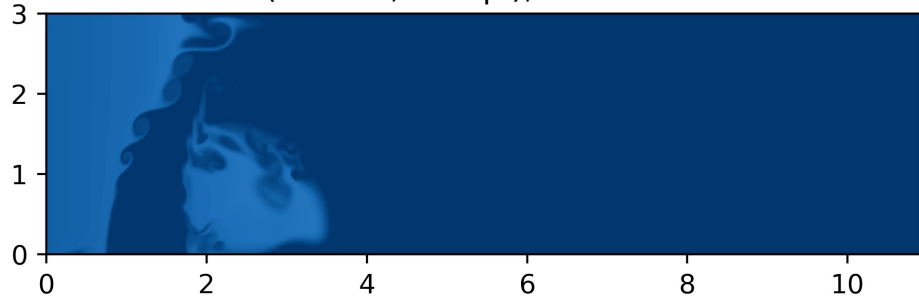
('boxlib', 'mixture_fraction'), $z=0.25*Lz$



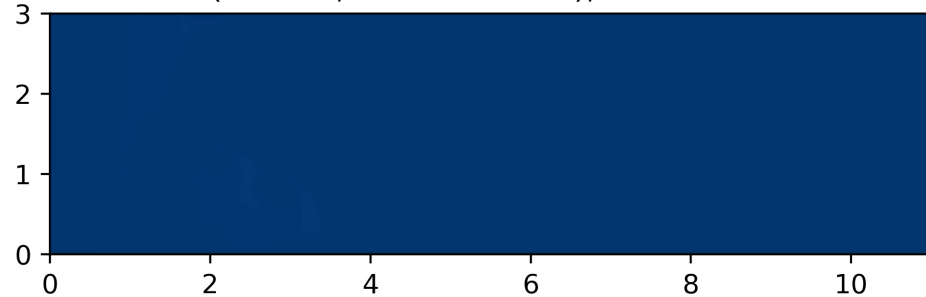
('boxlib', 'Y(OH)'), $z=0.25*Lz$



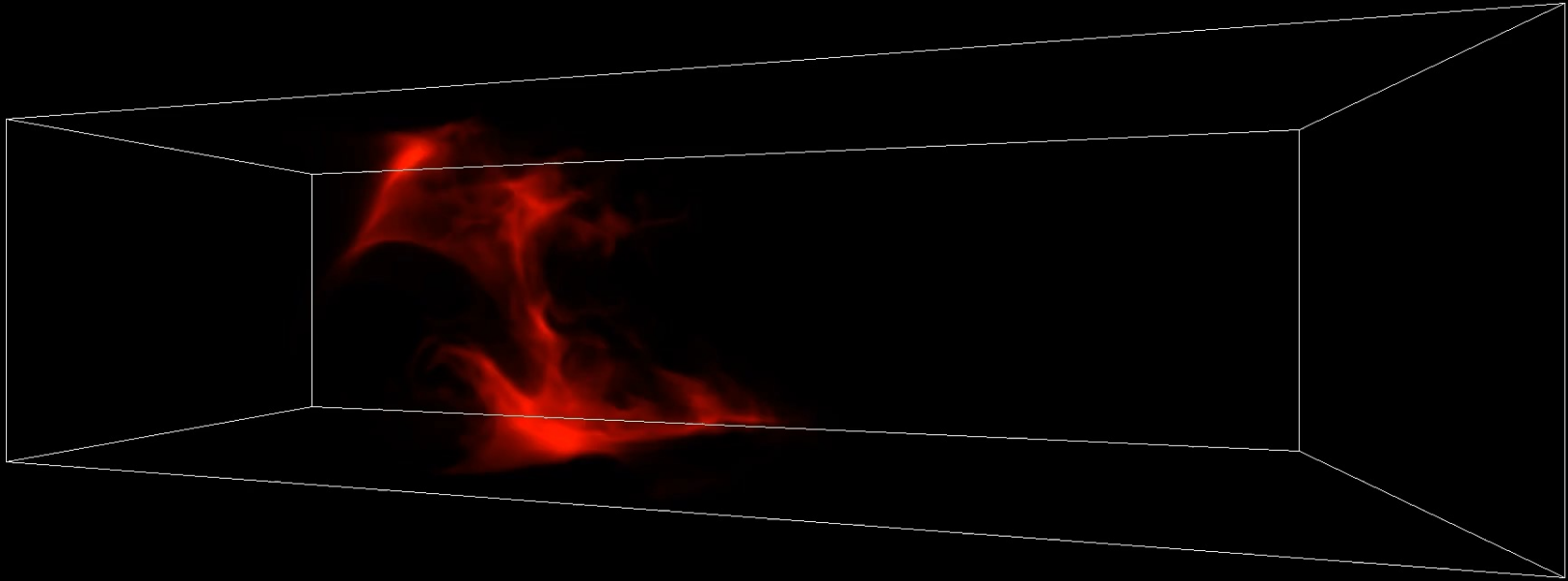
('boxlib', 'temp'), $z=0.25*Lz$



('boxlib', 'HeatRelease'), $z=0.25*Lz$

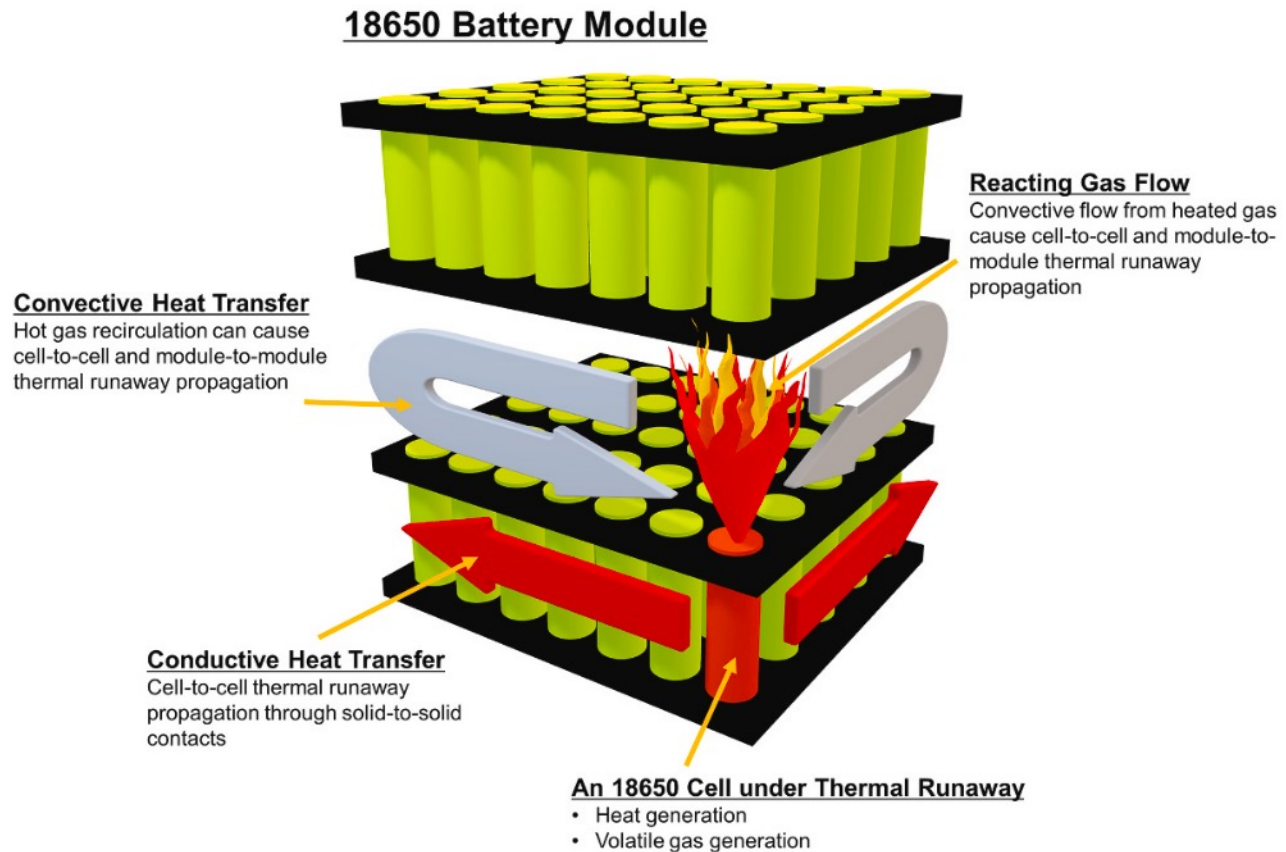


INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD



3. Amélioration de la résistance au feu des batteries et des composites en aérospatiale

Collaboration
avec Étienne
Robert

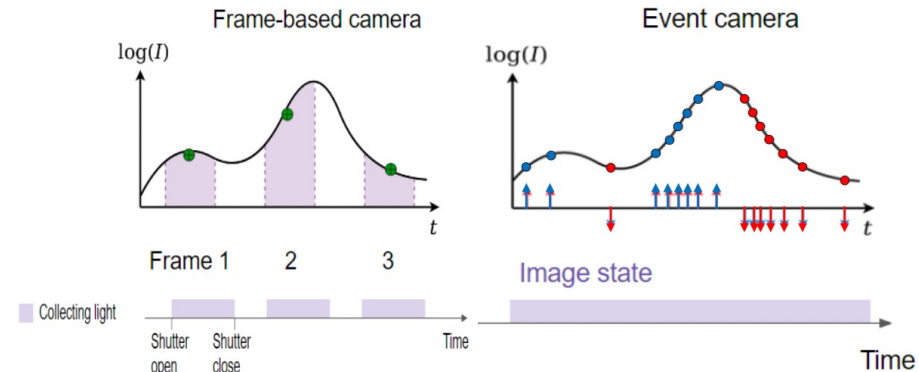
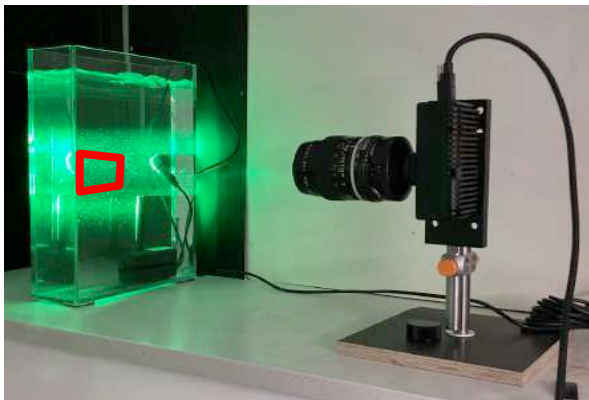


INTÉRÊTS DE RECHERCHE – BRUNO SAVARD

4. Développement de méthodes expérimentales – algorithmes et comparaison avec simulations

Collaboration avec Patrizio Vena au CNRC

Méthodes de mesure de vitesse non-intrusives pas laser : utilisation des caméras événementielles



C. Scheerlinck, N. Barnes, R. Mahony, "Continuous-time Intensity Estimation Using Event Cameras", ACCV, 2018



prophesee.ai



PRÉSENTATION

À propos de vous...

- Votre nom
- Programme à Polytechnique
- Intérêts



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:

- **Contrôle périodique (35%) (jeudi, 29 février 2024, 18h45-21h15)**
- **Travail de TD (10%)**
- **Projet (15%) (équipes de 2)**
- **Examen final (40%) (pendant la période des examens finaux)**



HEURES DE BUREAU

Options d'heures de bureau fixes:

A. Mardis 15h-17h

B. Mercredis 14h-16h

C. Mercredis 15h-17h

Rendez-vous possibles si vous êtes indisponibles à la plage horaire choisie.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Y. Çengel, M. Boles et M. Lacroix, “Thermodynamique, une approche pragmatique, 3^e 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



INTRODUCTION

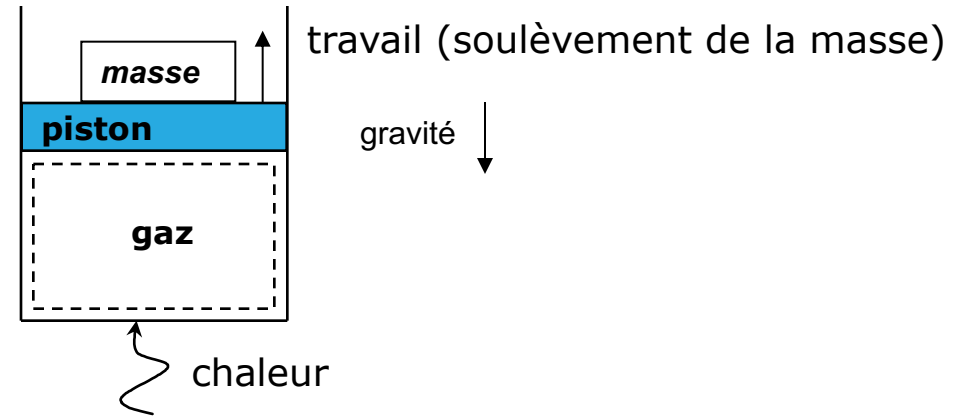
Thermodynamique

- Étymologie → chaleur + mouvement
- Définitions
 - **Wikipedia:** “La thermodynamique est la branche de la physique qui traite de la **dépendance des propriétés physiques des corps à la température**, des **phénomènes où interviennent des échanges thermiques**, et des **transformations de l'énergie entre différentes formes.**”
 - **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**.

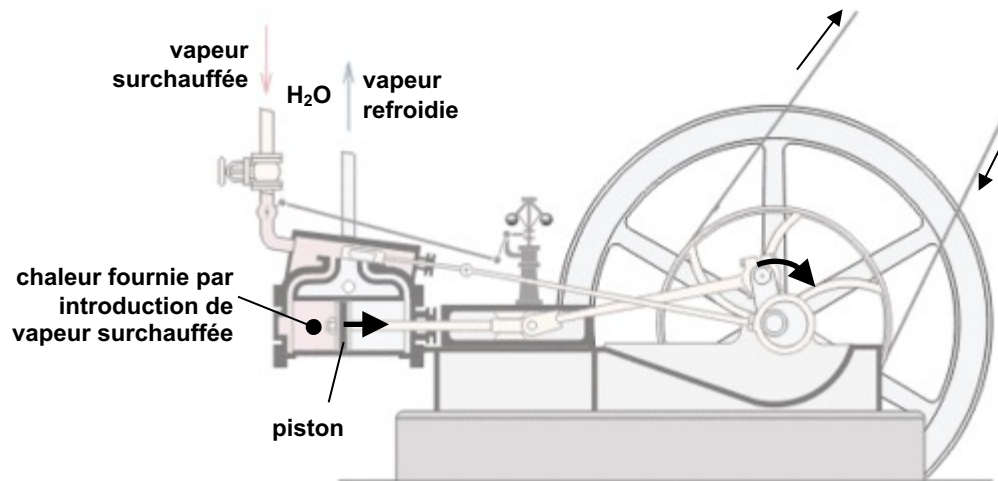


QUELQUES EXEMPLES

Exemple 1: Piston et cylindre

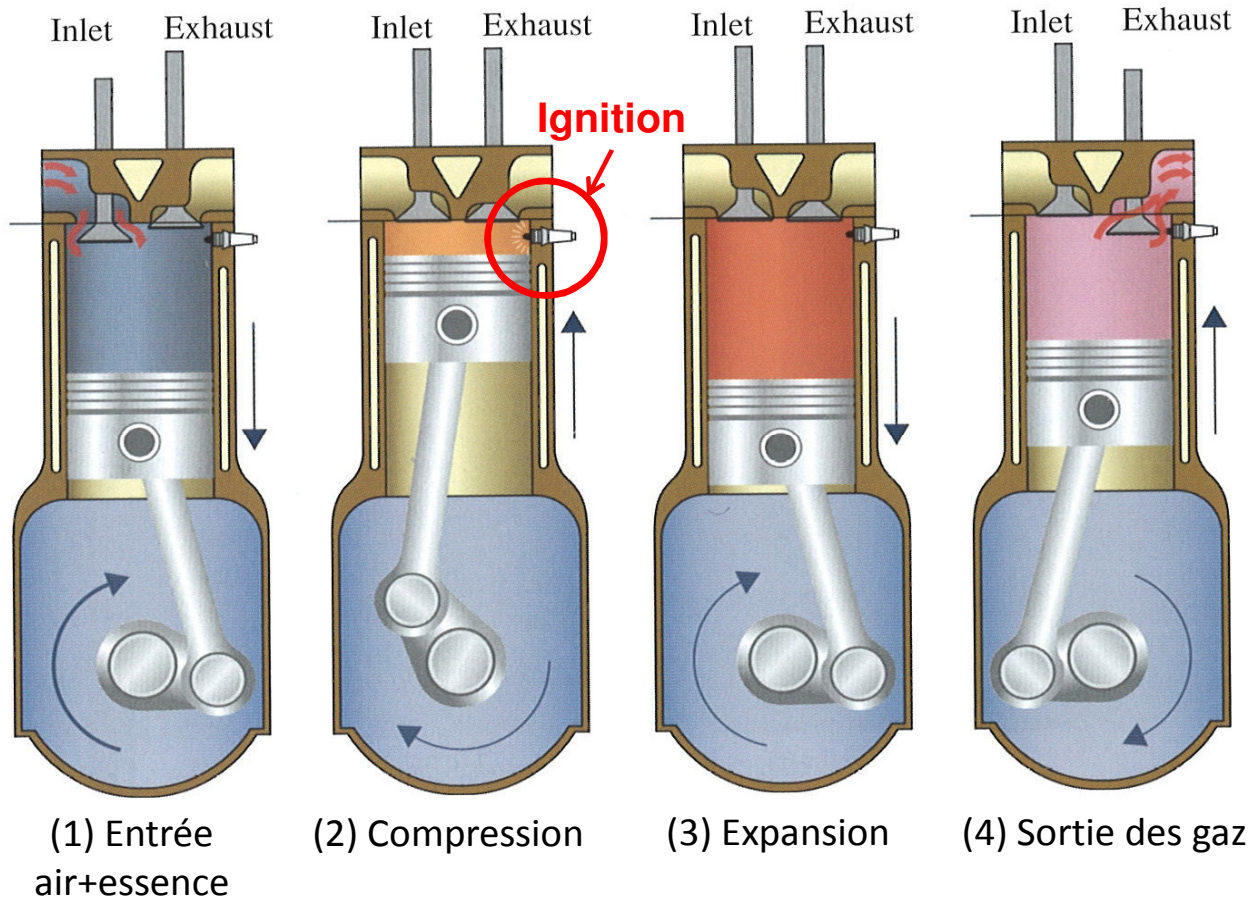


Exemple 2: Moteur à vapeur



QUELQUES EXEMPLES

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

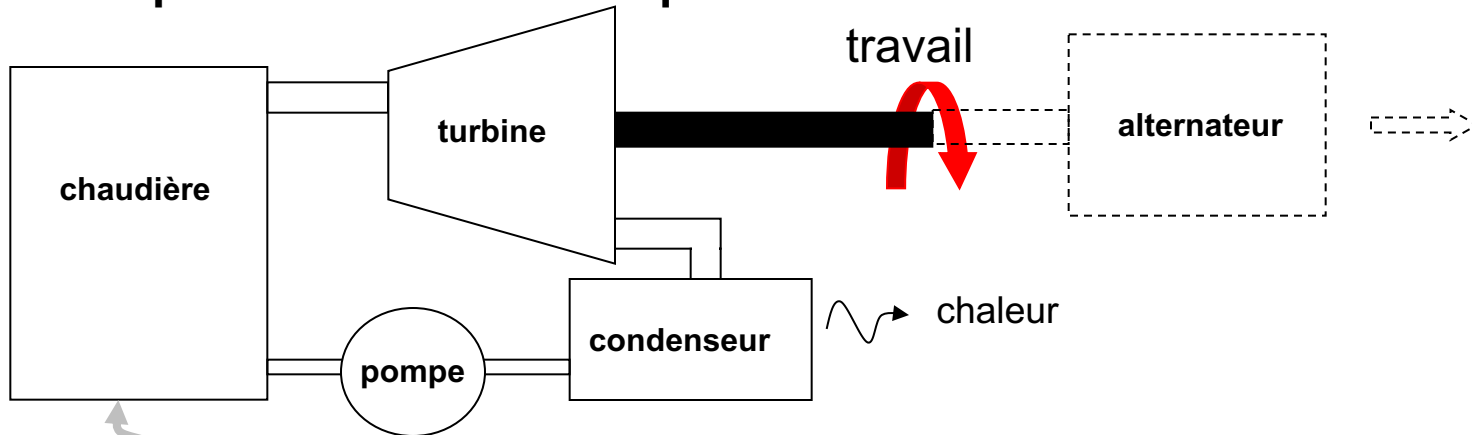


Source: *Thermodynamics – Concepts and Applications*, de Stephen R. Turns (2006)



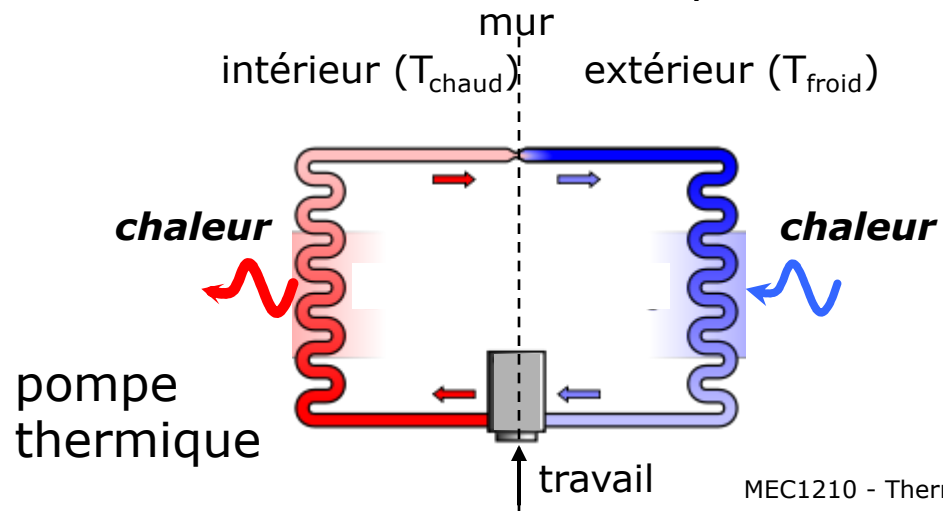
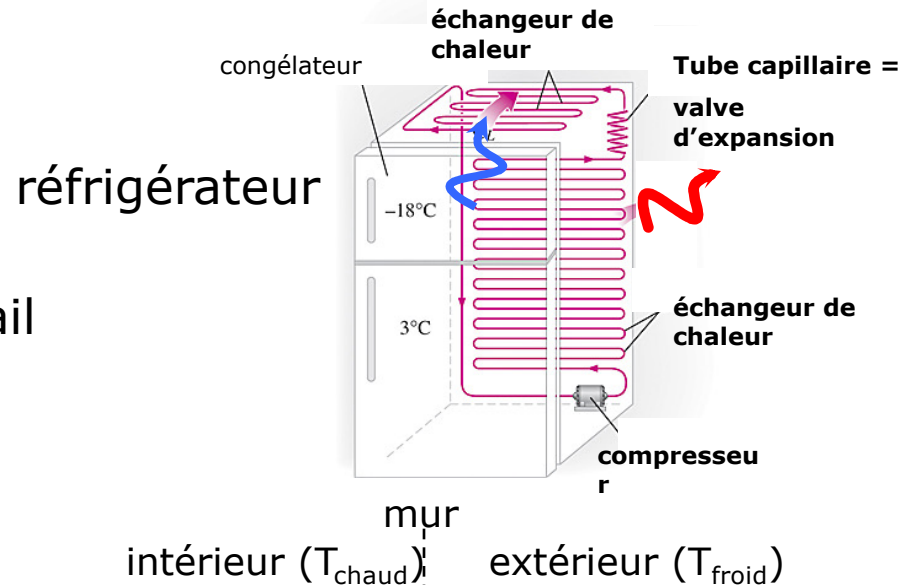
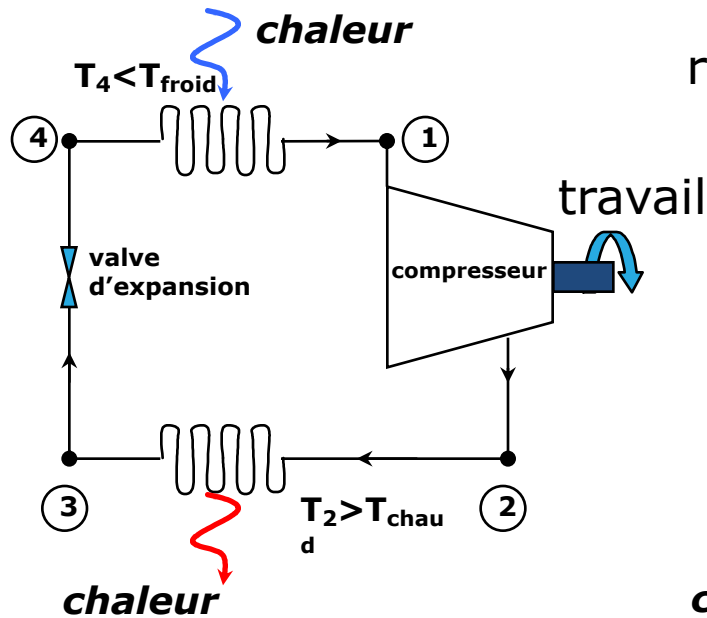
QUELQUES EXEMPLES

Exemple 4: Centrale thermique/nucléaire



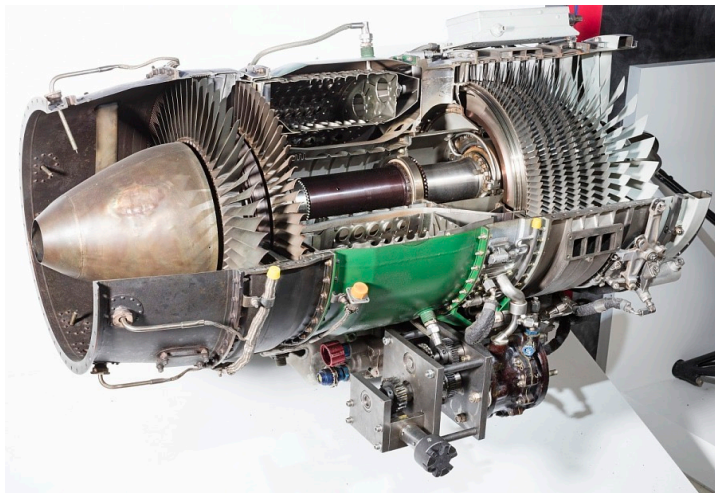
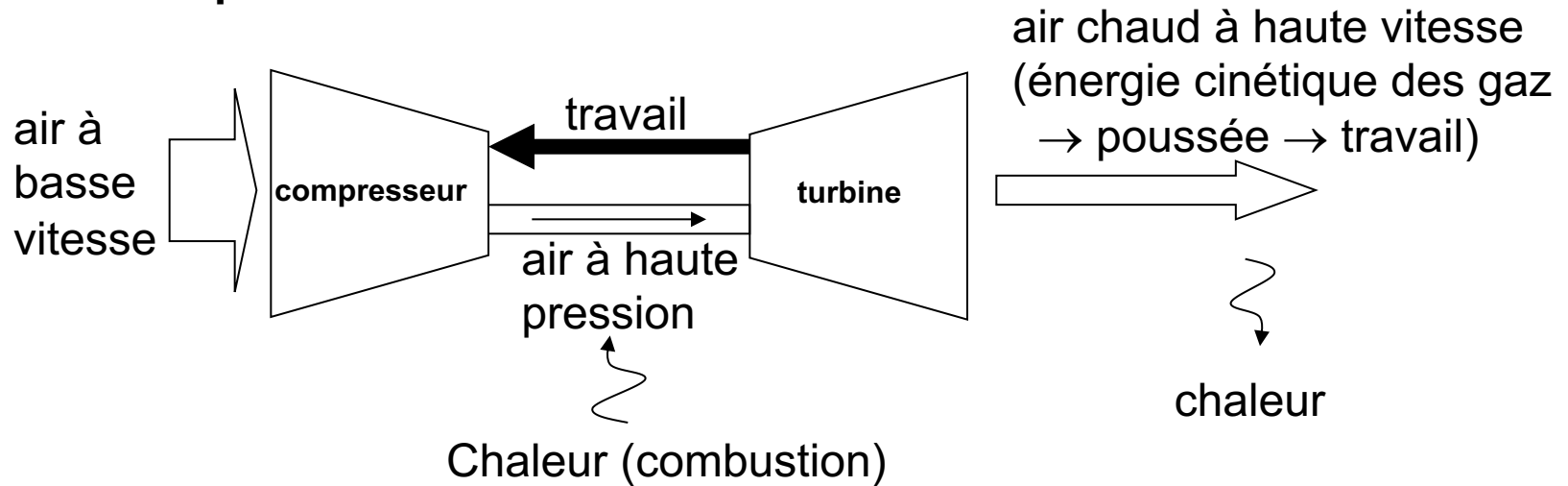
QUELQUES EXEMPLES

Exemple 5: Pompes thermiques



QUELQUES EXEMPLES

Exemple 6: Turboréacteur



J85-GE-17A

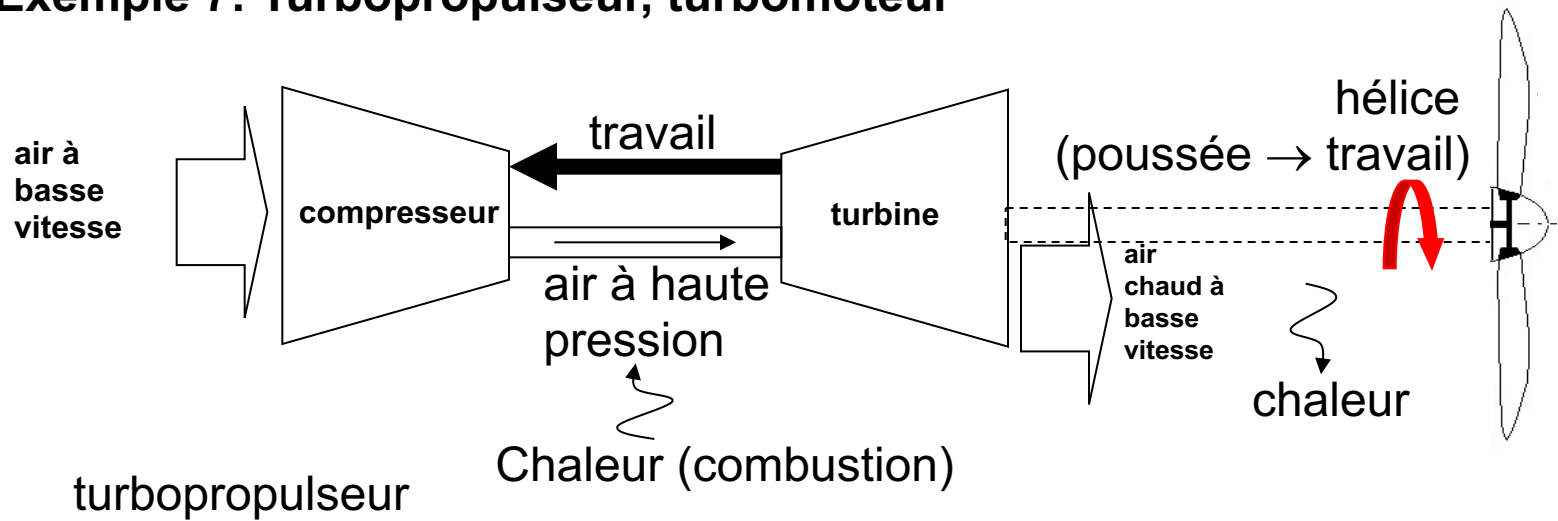


Northrop F-5

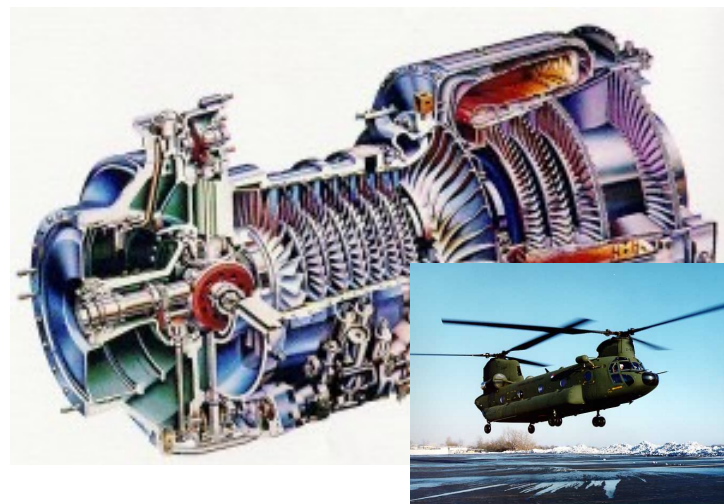
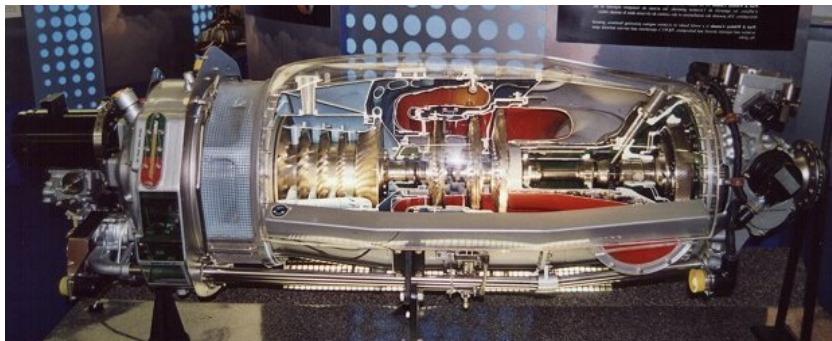


QUELQUES EXEMPLES

Exemple 7: Turbopropulseur, turbomoteur



turbopropulseur

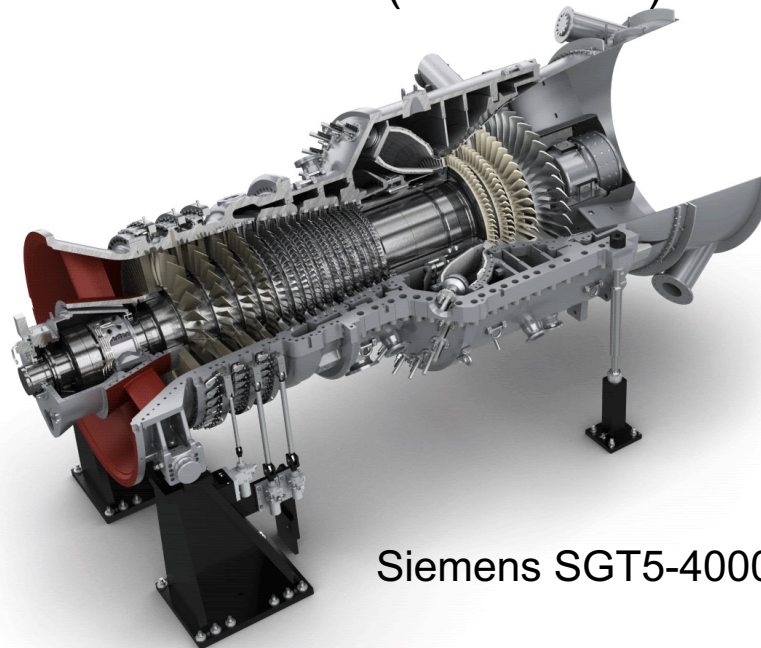
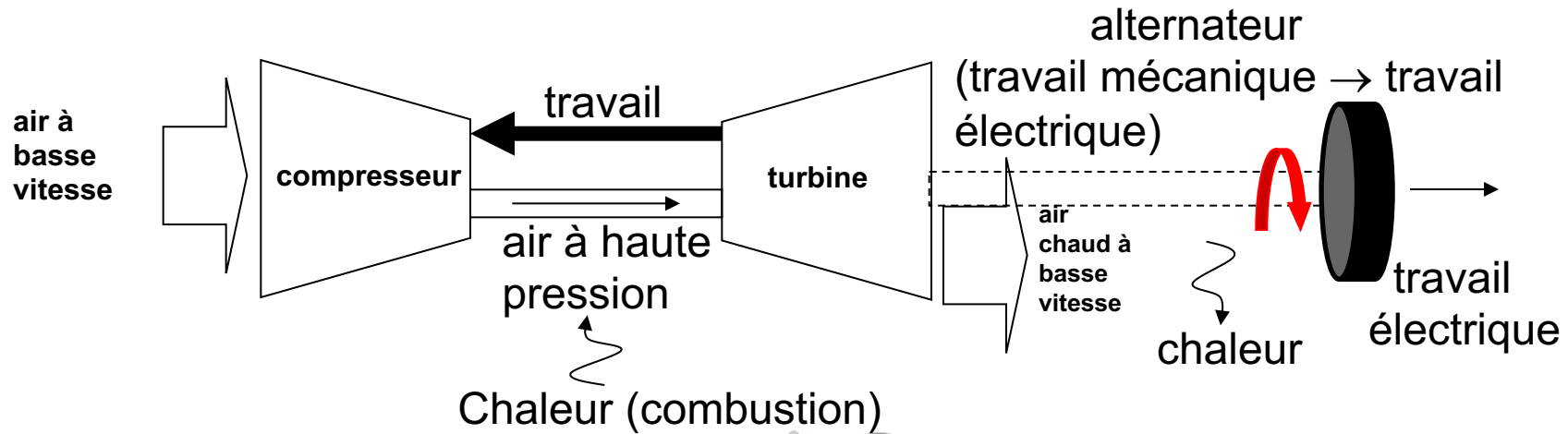


turbomoteur



QUELQUES EXEMPLES

Exemple 8: Turbine à gaz (turbo-alternateur)



Siemens SGT5-4000F



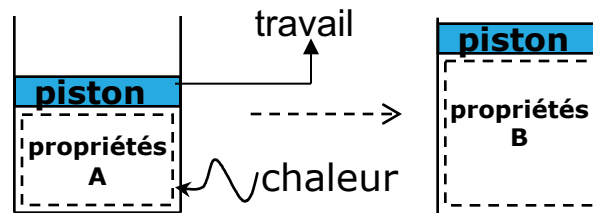
PLAN DE COURS

1) Notions de base

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

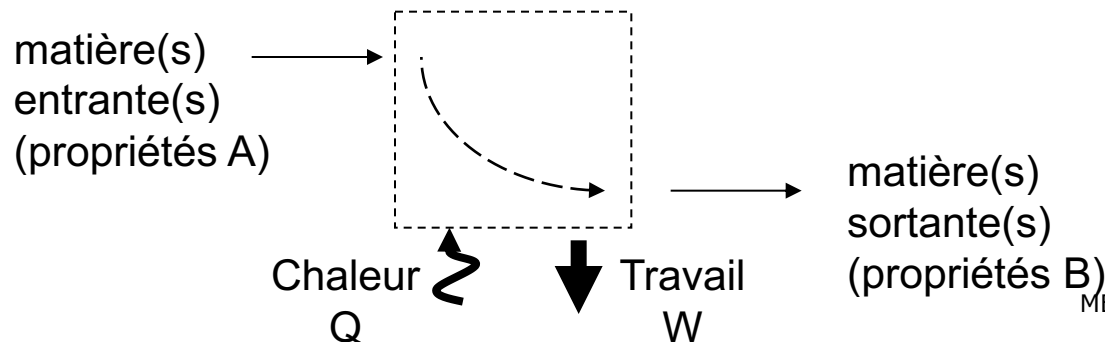
2) Premier principe de la thermodynamique (systemes fermés)

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

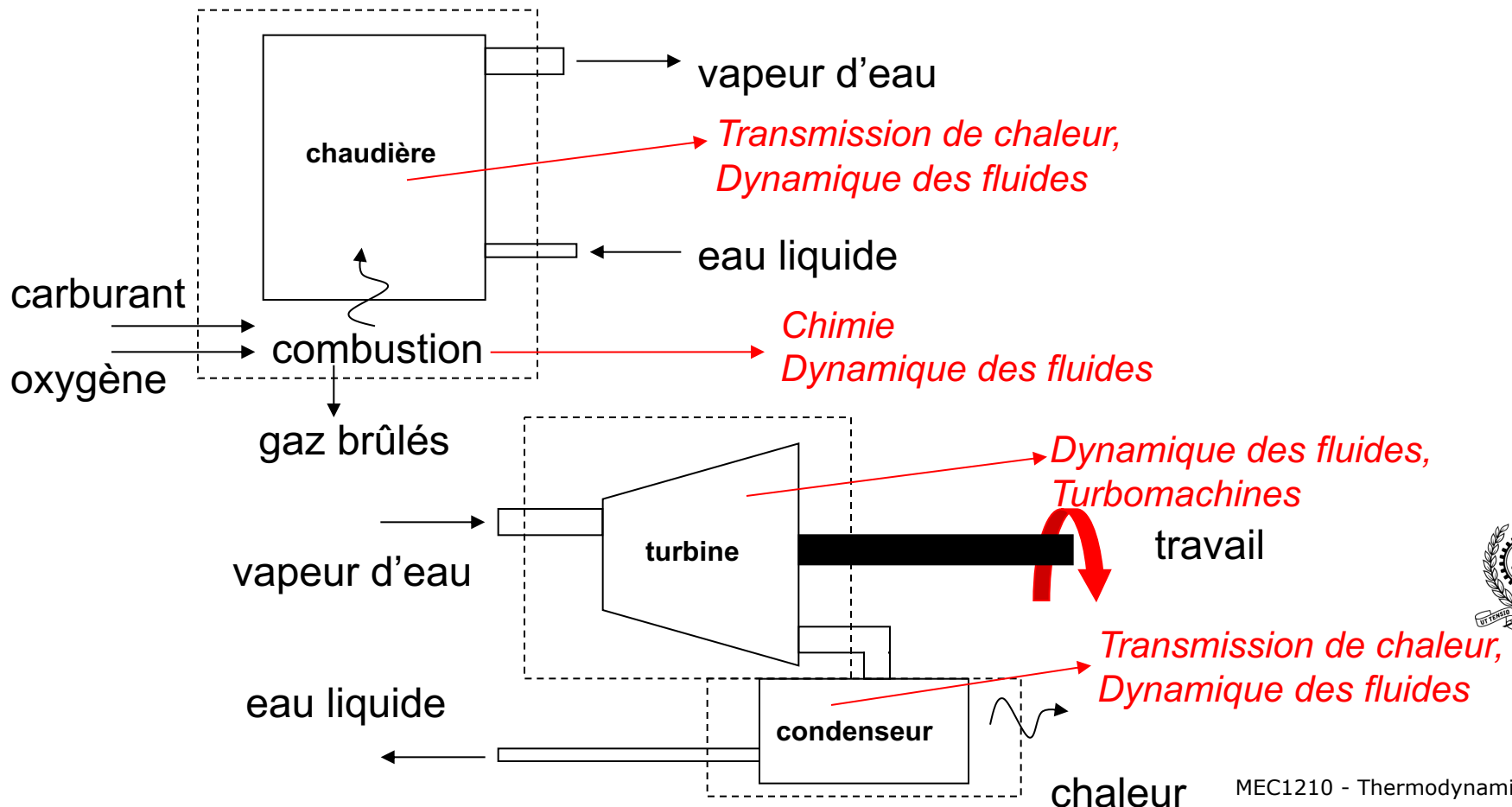
Centrales thermiques, réfrigération, turbines à gaz, moteurs à combustion interne (piston).



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



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

III) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs

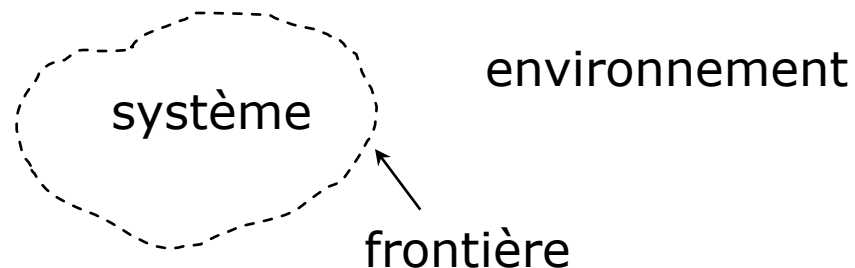


NOTIONS DE BASE

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



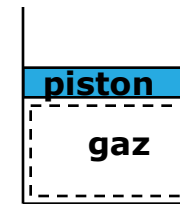
SYSTÈME THERMODYNAMIQUE

d) Types de systèmes thermodynamiques

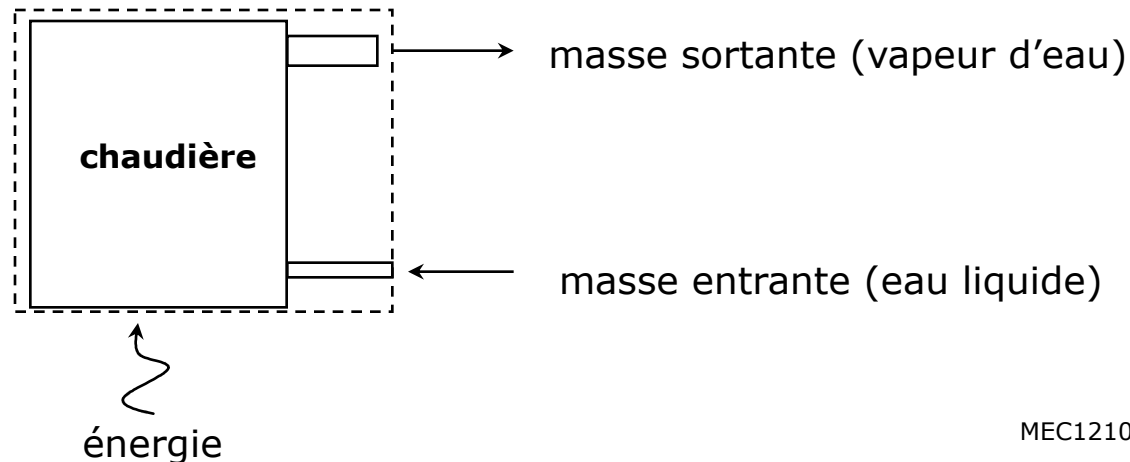
i) **Isolé**: aucun échange de matière, de chaleur ou de travail avec l'environnement

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)



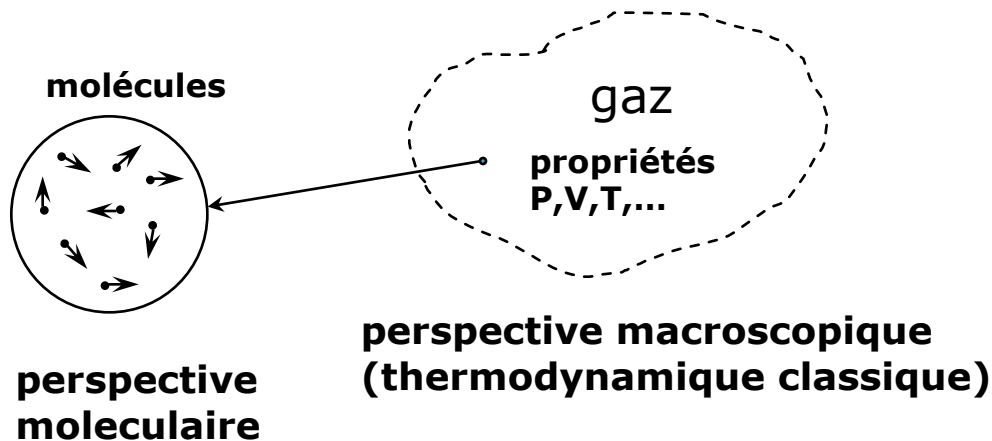
NOTIONS DE BASE

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.

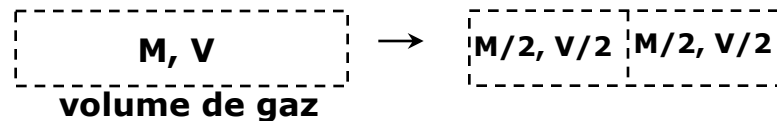


PROPRIÉTÉ THERMODYNAMIQUE

b) 2 types de propriétés:

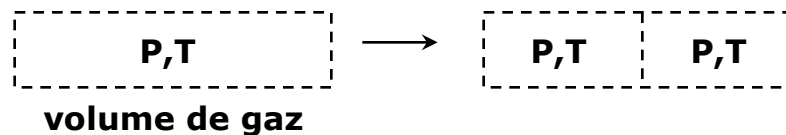
i) propriété extensive: propriété qui dépend de la taille du système

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) (ρ)= $M/V=1/v$



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 $PV=nR_uT$

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:

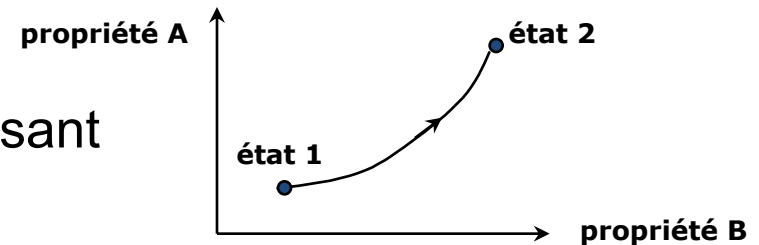
- équilibre thermique (pas de changement de température avec temps)
- équilibre mécanique (pas de changement de force/pression avec le temps)
- équilibre chimique (pas de changement de concentration chimique avec le temps)



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.

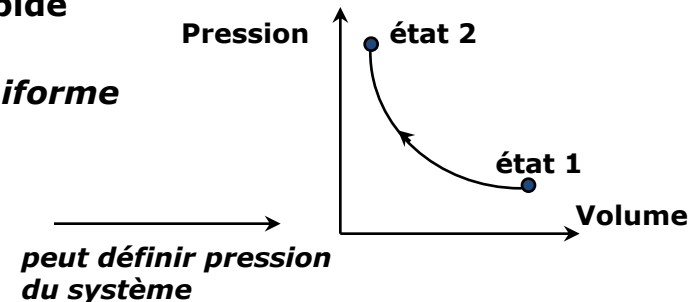


exemple: compression d'un gaz par un piston

~~quasi-statique~~



quasi-statique

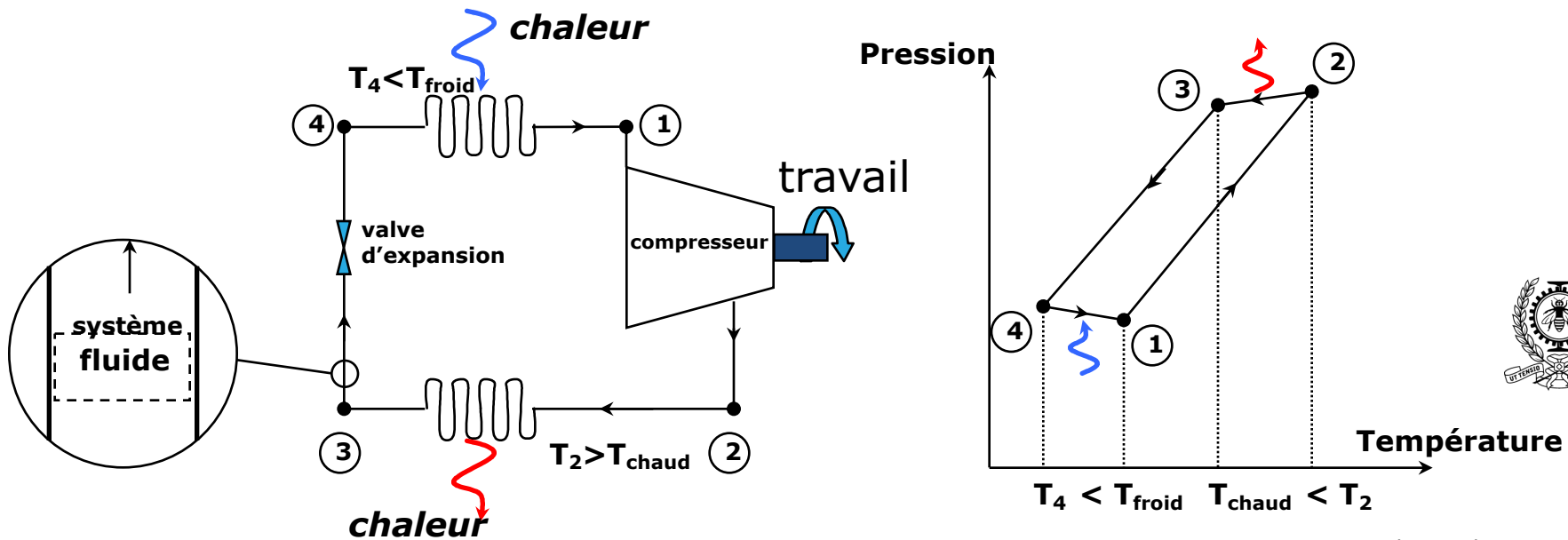


ÉVOLUTION

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^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2^{ème} principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs



EXEMPLES

Masse(m), volume(V), masse volumique(ρ), volume massique(v) et densité (ρ) :

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^3 , m^3 , gal, pi^3 , etc.
 - Propriété extensive
3. La **masse volumique** et le **volume massique** (ou **molaire**) :
 - $\rho = \text{masse/volume} [=] \text{g/ml, kg/m}^3, \text{lbm/ft}^3, \text{etc.}$ (Masse volumique)
 - $\rho_{\text{mol}} = \text{moles/volume} [=] (\text{masse/M})/\text{volume} [=] \text{mole/m}^3$ (Molarité)
 - $v = \text{volume/masse} [=] \text{ml/mg, l/kg, in}^3/\text{lbm, etc.}$ (Volume massique)
 - $v_{\text{mol}} = \text{volume}/(\text{masse/M}) [=] \text{m}^3/\text{mole, pi}^3/\text{lb-mole, etc.}$ (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

"The mole is a quantity of substance. The new prefix "guaca" is defined such that one guacamole equals Avocado's Number." G. Byrne



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 [θ]
- (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 ²]
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 ⁻¹²	kilo [k]	10 ³
nano [n]	10 ⁻⁹	mega [M]	10 ⁶
micro [μ]	10 ⁻⁶	giga [G]	10 ⁹
milli [m]	10 ⁻³	tera [T]	10 ¹²



SYSTÈMES D'UNITÉ

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

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

Unités primaires (*et secondaires)	
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 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 à 3.5°C de 1°C

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



AUTRES UNITÉS

Autres 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 ³], 1 ft ³ = 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)

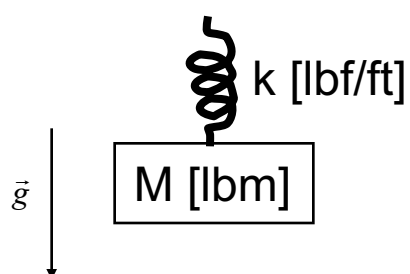


HOMOGÉNÉITÉ DIMENSIONNELLE

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

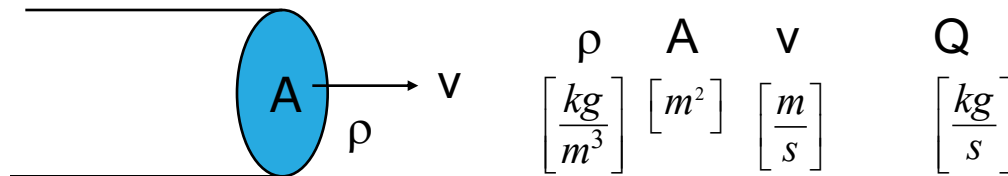


HOMOGÉNÉITÉ DIMENSIONNELLE

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

Exemple: trouver le débit massique d'eau (Q) en [kg/s] à partir de la densité (ρ), 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 π

- 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

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



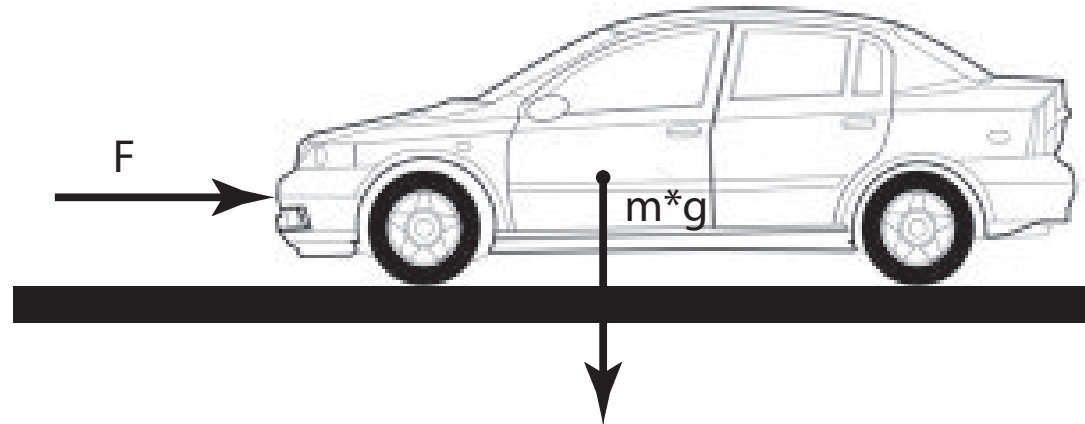
QUESTION CONCEPTUELLE

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 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^{er} principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1^{er} principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

VI) 2^{ème} 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

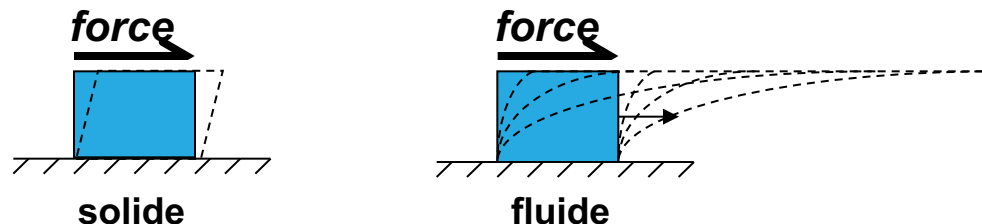
Les fluides sont au cœur de la majorité des systèmes thermodynamiques pour le transport de la chaleur et de la masse.

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) (ρ): masse (M) d'une matière par unité de volume (V), c'est-à-dire l'inverse du volume spécifique

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

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

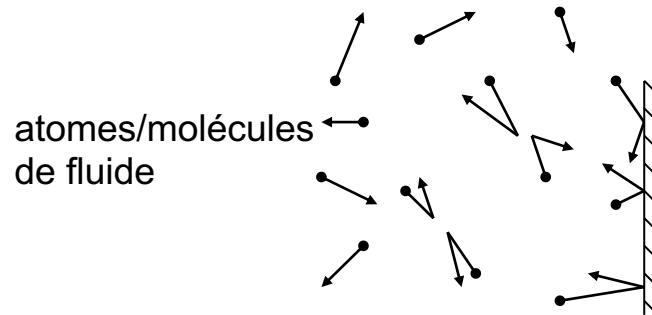
(SI) (EES)



PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

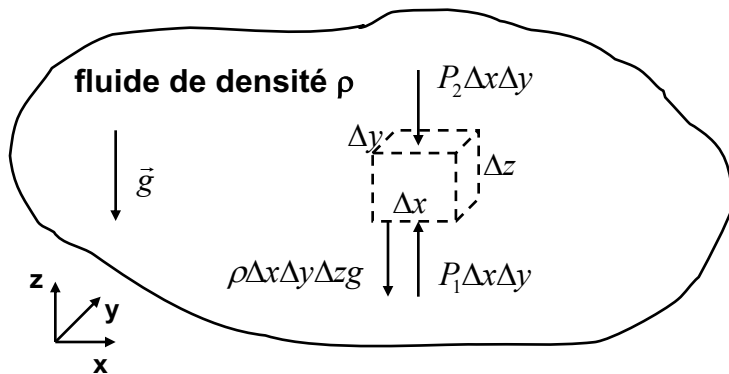
c) **Pression**: force par unité d'aire exercée par un fluide sur une surface, normale (perpendiculaire) à la surface

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 (Δz **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*



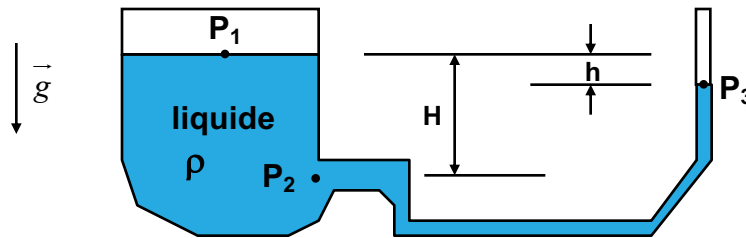
PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

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

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

$$P = P_{ref} + \rho gh \quad \text{où} \quad h \equiv z_{ref} - z \quad \text{\underline{h} est la } \textit{profondeur} \text{ de fluide dans la } \textit{direction de la gravité}$$

ex.1:



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

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

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

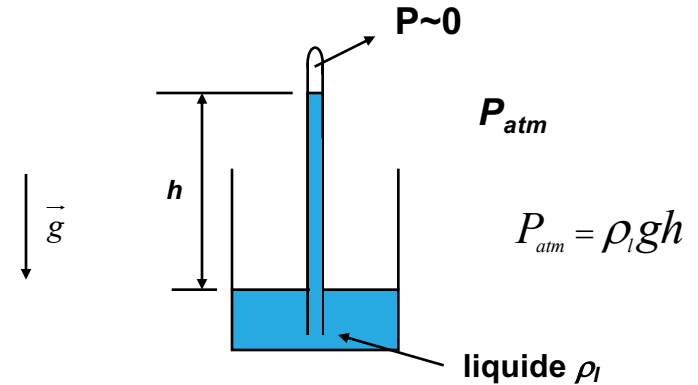
$$P_3 = P_2 - \rho g (H - h)$$



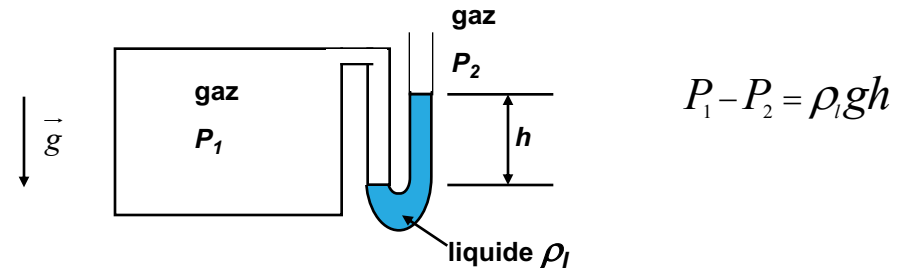
PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

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)

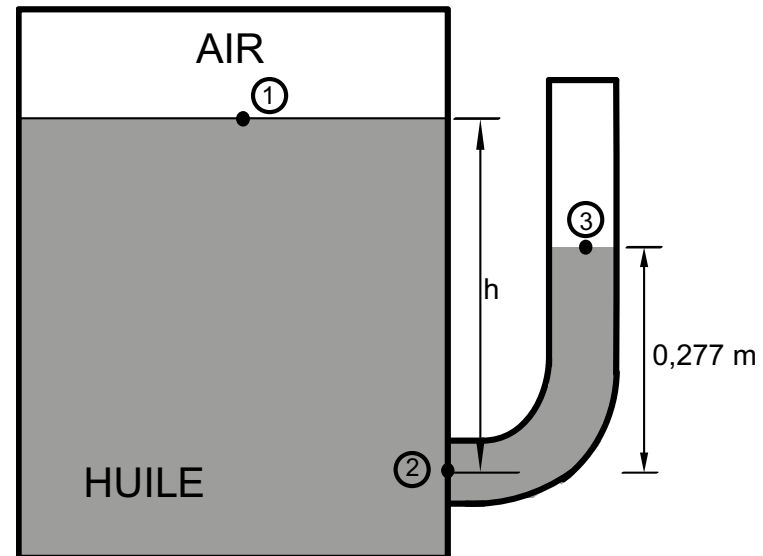


QUESTION CONCEPTUELLE

VARIATION DE LA PRESSION DANS UN FLUIDE

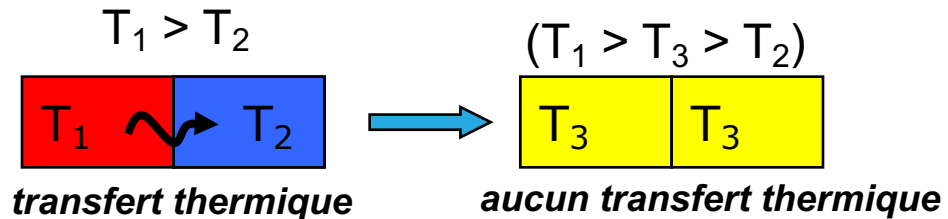
Un bassin fermé contient de l'air et de l'huile. Des mesures de pression sont prises aux points 1 et 2 indiqués sur la figure et donnent respectivement 25 kPa et 30 kPa. La densité de l'huile étant de 920 kg/m^3 , calculer la variation de hauteur entre les points 1-2 ainsi que la pression dans l'air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



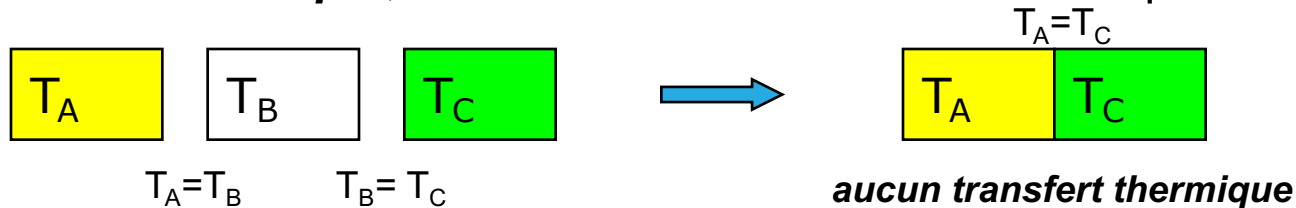
PROPRIÉTÉS DES FLUIDES

d) Température



i) Principe zéro de la thermodynamique

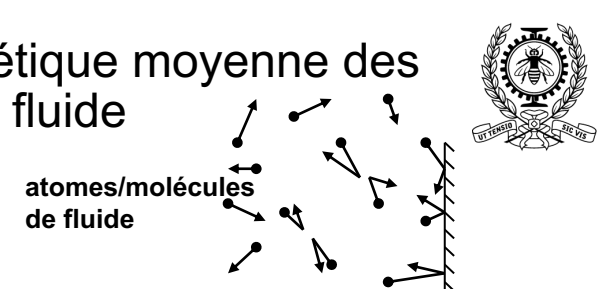
- pour chaque système, il existe une propriété qui s'appelle **température**
- l'égalité de la température est une condition nécessaire et suffisante pour l'**équilibre thermique**, c'est-à-dire aucun transfert thermique



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

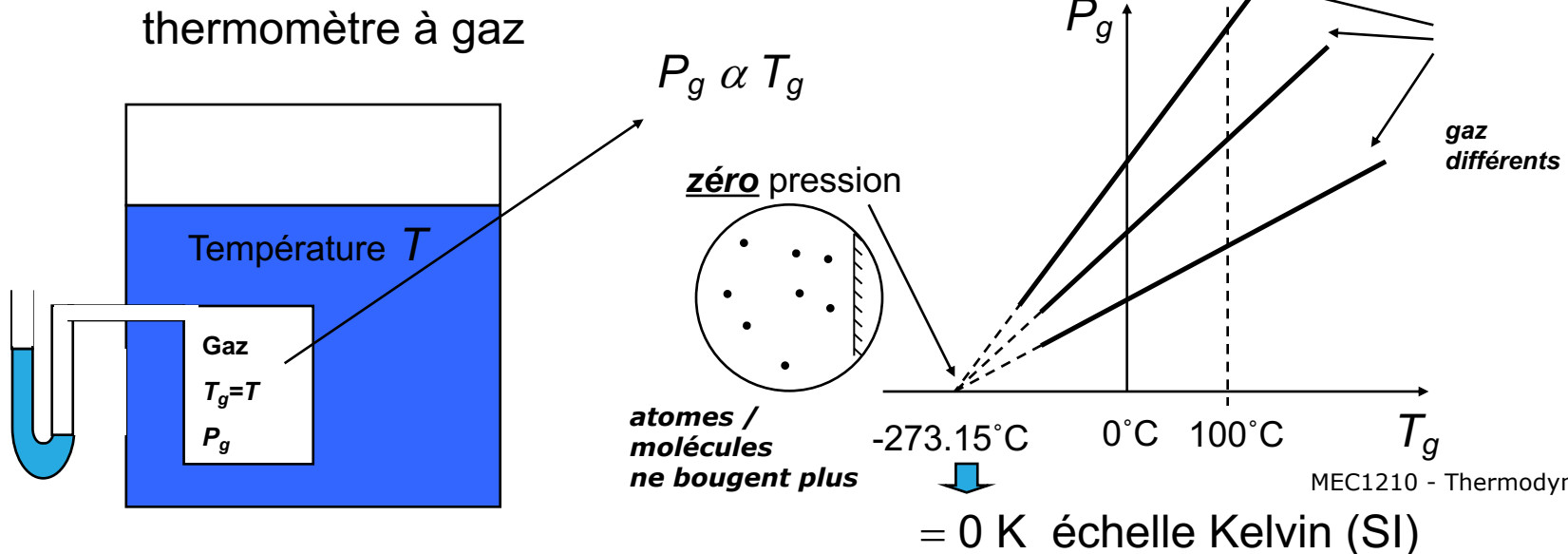
Communes: basées sur des phénomènes facilement reproductibles

- 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°C et 100°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): $[K] = [^{\circ}C] + 273.15$ (ΔT of 1K = ΔT 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

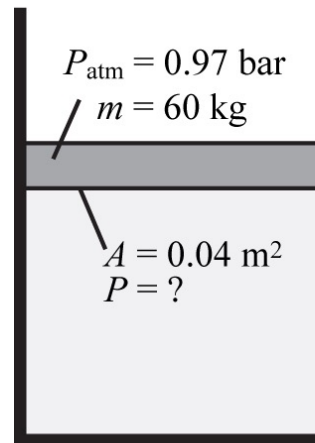
Approche systématique pour résoudre des problèmes en génie en général et en thermodynamique en particulier:

- 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 appliquez-y 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) Remplacez les valeurs en (2) et (5) dans les équations dérivées en (4) pour calculer la solution. Utilisez le principe d'homogénéité des unités pour vérifier les équations.
- 7) Assurez-vous que les résultats soient 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?

