



MASTER EET

Économie de l'environnement,  
de l'énergie et des transports



# Master EET

## La physique de l'énergie

### Quelques rappels

# Contexte

Cette présentation – qu'il sera nécessaire de compléter- a pour objet de rappeler les notions de physique et de technique utiles à la compréhension des phénomènes impliqués dans la production et à la transformation d'énergies de tous types.

Il s'agit essentiellement d'un ensemble de courtes notes pour une remise en mémoire des éléments essentiels et permettant de s'orienter vers des documents plus complets si un approfondissement s'avère nécessaire.

Faute de temps de préparation, et compte tenu du volume de connaissances embrassé, elle fait appel à des documents tirés de diverses publications dont je remercie les auteurs et peut présenter une absence d'homogénéité dans sa forme...L'optique n'a pas été encore incorporée à ce document.

En tête du document, une table des matières détaillée facilitera la recherche d'un sujet d'intérêt.

Ce cours de trois heures ne permettra bien évidemment pas de couvrir l'ensemble des notions présentées, mais essaiera de donner une ligne directrice s'appuyant sur les connaissances de base indispensables à la compréhension de cet ensemble.

Des réponses seront également apportées aux questions qui ont été posées au préalable.



# Sommaire - 1 -



1. Matière - Energie
  - 1.1. Matière
  - 1.2. Energie
  - 1.3. Relation matière/énergie
  - 1.4. Conservation de l'énergie
  - 1.5. Système
  - 1.6. Système ouvert - Système fermé
2. Rappels de mathématiques
  - 2.1. Vecteur
  - 2.2. Produit scalaire
  - 2.3. Produit vectoriel
3. Grandeurs physiques et unités
  - 3.1. Grandeur physique, dimension, unité
  - 3.2. Système SI, unités de base SI et unités dérivées
  - 3.3. Préfixes multiplicateurs SI
  - 3.4. Equation aux dimensions - homogénéité d'une formule

...

## 4. Structure de la matière

4.1. Organisation de la matière

4.2. Atome

4.3. Particules élémentaires

4.4. Interactions fondamentales dans la matière

4.5. Charge électrique

4.6. Notion de champ en physique

4.7. Champ électromagnétique

4.8. Champ électrique

4.9. Champ magnétique

4.10. Fission nucléaire

4.11. Fusion nucléaire

...



## 3. Grandeurs physiques et unités

3.1. Grandeurs physiques

3.2. Dimension d'une grandeur physique

3.3. Les 7 dimensions de base : longueur, masse, temps, intensité électrique, température, quantité de matière, intensité lumineuse

3.4. Unités

3.5. Système SI, unités de base SI et unités dérivées

3.6. Préfixes multiplicateurs SI

3.7. Homogénéité d'une formule

3.8. Homogénéité

...



## 5. Thermodynamique

- 5.1. Concepts de base
- 5.2. Variables d'état – fonctions d'état
- 5.3. Variables d'état
- 5.4. Cycle réversible
- 5.5. Cycle irréversible
- 5.6. Fonctions d'état Energie interne
- 5.7. Fonctions d'état Entropie
- 5.8. Fonctions d'état Enthalpie
- 5.8. Fonctions d'état Enthalpie
- 5.9. Processus thermodynamiques
- 5.10. Représentation des processus Diagramme de Clapeyron
- 5.11. Gaz parfait
- 5.12. 1er principe (conservation de l'énergie)
- 5.13. Equivalence chaleur/travail - Expérience de Joule
- 5.14. 2ème principe (entropie et direction des processus)
- 5.15. 3ème principe
- 5.16. Cycle de Carnot
- 5.17. Rendement thermodynamique
- 5.18. Applications

...



## 5. Mécanique

- 6.1. Principes fondamentaux de la mécanique
- 6.2. Energie mécanique
- 6.3. Notion de force
- 6.4. Couple
- 6.5. Extension de la deuxième loi de Newton
- 6.6. Quantité de mouvement
- 6.7. Energie cinétique de translation
- 6.8. Energie cinétique de rotation
- 6.9. Quelques moments d'inertie
- 6.10. Exemple: choc élastique entre deux boules de billard
- 6.11. Force centrifuge – force centripète
- 6.12. Equations de base de la mécanique des solides
- 6.13. Hydrostatique
- 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

...



## 7. Electricité

7.1 Electrostatique

7.2 Electrocinétique

7.3 Courant alternatif

## 8. Magnétisme et électromagnétisme

## 9. Formes et production d'énergie

## 10. Production d'énergie électrique

10.1. Turbine

10.2. Alternateur

10.3. Centrales thermiques combinées

10.4. Centrales nucléaires

## 11. Transport de l'énergie électrique

11.1. Réseaux

11.2. Lignes

11.3. Transformateur

11.4. Compensateur synchrone FACTS

...





- 11. Transport de l'énergie électrique
  - 11.1. Réseaux
  - 11.2. Lignes
  - 11.3. Transformateur
  - 11.4. Compensateur synchrone

...

# 1. Matière et Energie

## 1.1. Matière

La matière est une substance qui occupe de l'espace et possède une masse. En d'autres termes, tout ce qui a une masse et occupe un volume est considéré comme de la matière. La matière est composée d'entités fondamentales appelées particules, et ces particules peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, des protons, des neutrons, des quarks, et d'autres particules subatomiques.

Il existe plusieurs états de la matière, les plus courants étant les états solide, liquide et gazeux. Ces états dépendent des conditions de température et de pression. Par exemple, l'eau peut exister sous forme de glace (solide), d'eau liquide ou de vapeur (gaz), en fonction de la température.

Les particules qui composent la matière interagissent les unes avec les autres par le biais de forces fondamentales telles que la force électromagnétique et la force nucléaire. Les atomes, qui sont les unités de base de la matière, sont constitués de protons, de neutrons et d'électrons. Ces particules subatomiques sont elles-mêmes composées de particules encore plus fondamentales appelées quarks.

En physique moderne, la matière n'est pas seulement comprise au niveau macroscopique, mais aussi au niveau microscopique à travers les théories quantiques et les modèles subatomiques. La physique des particules et la physique nucléaire explorent la nature fondamentale de la matière à des échelles extrêmement petites.

En résumé, la matière est constituée de particules fondamentales qui interagissent entre elles, et elle existe sous différentes formes et états en fonction des conditions environnementales

# 1. Matière et Energie

## 1.2. Energie

L'énergie est une grandeur physique qui mesure la capacité d'un système à effectuer un travail. C'est une propriété fondamentale de la nature, omniprésente et nécessaire pour tous les processus physiques. L'énergie existe sous différentes formes et peut être convertie d'une forme à une autre. Les principales formes d'énergie comprennent :

1. **Énergie cinétique** : C'est l'énergie associée au mouvement d'un objet. Plus la vitesse d'un objet est élevée, plus son énergie cinétique est grande.
2. **Énergie potentielle** : énergie associée à la position d'un objet dans un champ de force, tel que la gravité. Par exemple, un objet en hauteur possède une énergie potentielle gravitationnelle.
3. **Énergie thermique (ou calorifique)** : énergie associée à la chaleur. Elle résulte du mouvement des particules à l'intérieur d'un système.
4. **Énergie électrique** : énergie associée au mouvement des charges électriques. Elle est générée par des processus électromagnétiques.
5. **Énergie chimique** : énergie stockée dans les liaisons entre les atomes et les molécules. Elle est libérée lors de réactions chimiques.
6. **Énergie nucléaire** : énergie stockée dans le noyau des atomes. Elle est libérée lors de réactions nucléaires, telles que la fission ou la fusion nucléaire.
7. **Énergie lumineuse (ou rayonnante)** : énergie transportée par les photons, telle que la lumière visible ou les rayons X.
8. **Énergie éolienne** : énergie cinétique associée au mouvement de l'air, qui peut être capturée et convertie en électricité par des éoliennes.
9. **Énergie hydraulique** : énergie associée au mouvement de l'eau, qui peut être utilisée pour générer de l'électricité dans les centrales hydroélectriques.

# 1. Matière et Energie

## 1.3. Relation matière/énergie

La relation entre l'énergie et la matière est fondamentale en physique, et elle est résumée par l'équation d'Einstein,  $E=mc^2$ , où E représente l'énergie, m la masse, et c la vitesse de la lumière dans le vide (environ  $3 \times 10^8$  m/s).

Ce concept montre que la matière peut être convertie en énergie et vice versa.

Les implications de cette équation ont été démontrées par des expériences telles que la fission nucléaire et la fusion nucléaire, où une petite quantité de matière est convertie en une grande quantité d'énergie. Les réactions nucléaires dans les étoiles, y compris le Soleil, sont également des exemples de conversion de matière en énergie.

De plus, dans le domaine de la physique des particules, des expériences menées dans des accélérateurs de particules ont montré que certaines particules subatomiques peuvent être créées à partir de l'énergie sous forme de photons, et vice versa.

Cette équation illustre le lien profond entre l'énergie et la matière, soulignant que ce sont deux aspects d'une même entité physique. Cette relation a des implications importantes dans des domaines tels que la physique nucléaire, la cosmologie et la compréhension de l'univers aux niveaux les plus fondamentaux

# 1. Matière et Energie

## 1.4. Conservation de l'énergie

La loi de conservation de l'énergie stipule que l'énergie totale d'un système isolé reste constante, même si elle peut changer de forme au fil du temps.

Ainsi, l'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre.

Cette loi est un principe fondamental de la physique.

# 1. Matière et Energie

## 1.5. Système

En physique, le terme "système" fait référence à une portion spécifique de l'univers que l'on choisit d'isoler et d'étudier. Un système peut être aussi petit qu'une particule individuelle ou aussi vaste que l'ensemble de l'univers, en fonction du contexte de l'analyse. L'idée fondamentale est de définir une frontière ou une limite autour de la partie spécifique de l'univers que l'on souhaite examiner, afin de pouvoir étudier ses propriétés et ses interactions.

Voici quelques concepts clés liés à la notion de système en physique :

1. **Frontière du système** : C'est la limite imaginaire qui sépare le système du reste de l'univers. Elle est définie de manière à inclure tout ce qui est pertinent pour l'étude du système, en excluant ce qui est considéré comme extérieur ou non essentiel à l'analyse.
2. **Environnement** : C'est la partie de l'univers à l'extérieur de la frontière du système. Les interactions entre le système et son environnement peuvent se manifester sous forme d'échanges d'énergie, de matière, ou d'autres grandeurs physiques.
3. **Paramètres du système** : Ce sont les propriétés ou les caractéristiques spécifiques du système que l'on choisit d'étudier. Ces paramètres peuvent inclure des grandeurs physiques telles que la masse, la vitesse, la température, etc.
4. **États du système** : Ce sont les différentes conditions possibles dans lesquelles le système se trouve. Par exemple, un système gazeux peut être à un état de haute pression et basse température, ou à un état de basse pression et haute température.
5. **Interactions** : Ce sont les relations et les échanges entre le système et son environnement. Ces interactions peuvent se manifester sous différentes formes, telles que des forces, des flux d'énergie, des transferts de chaleur, etc.

En résumé, en physique, un système est une partie définie de l'univers que l'on examine de manière isolée pour mieux comprendre ses propriétés et ses interactions. La définition précise du système dépend du contexte de l'étude et des questions spécifiques que l'on cherche à résoudre.

# 1. Matière et Energie

## 1.6. Système ouvert - système fermé

En physique, le terme "système" fait référence à une portion spécifique de l'univers que l'on choisit d'isoler et d'étudier. Un système peut Les termes "système ouvert" et "système fermé" sont utilisés en sciences, en ingénierie et dans d'autres domaines pour décrire la manière dont un système interagit avec son environnement. Voici les définitions de ces deux concepts :

### 1. **Système ouvert :**

- Un système ouvert est un système qui échange de la matière et de l'énergie avec son environnement externe. En d'autres termes, il permet des flux entrants et sortants de matière et d'énergie à travers sa frontière.
- Les systèmes ouverts sont courants dans la nature. Un exemple classique est un organisme vivant qui échange de l'oxygène et des nutriments avec son environnement tout en rejetant du dioxyde de carbone et d'autres déchets.

### 2. **Système fermé :**

- Un système fermé est un système qui échange de l'énergie avec son environnement, mais pas de matière. Sa frontière permet seulement les transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.
- Un exemple de système fermé pourrait être une tasse thermos isolée. Bien que la chaleur puisse être échangée entre la tasse et l'environnement extérieur, aucune matière n'entre ou ne sort de la tasse.

En résumé, la principale différence entre un système ouvert et un système fermé réside dans la capacité du système à échanger de la matière avec son environnement. Un système ouvert permet ces échanges, tandis qu'un système fermé ne permet que les échanges d'énergie. Ces concepts sont utiles pour modéliser et comprendre le comportement des systèmes dans divers contextes scientifiques et techniques.

## 2. Rappels de mathématiques



### 2.1. Vecteur

Un vecteur est une quantité qui possède une magnitude (module) et une direction. En physique, les vecteurs sont utilisés pour représenter des grandeurs qui ont une dimension directionnelle, telles que la force, la vitesse, l'accélération, le moment, etc. Les vecteurs sont essentiels pour décrire les mouvements, les forces et les phénomènes physiques qui impliquent des directions spécifiques.

#### Caractéristiques d'un vecteur :

**1. Magnitude (module):** La magnitude (ou module ou norme) d'un vecteur en physique représente sa grandeur dimensionnée mesurée en unités appropriées (mètres, newtons, etc.).

Le module  $|\mathbf{A}|$  ( ou  $\|\mathbf{A}\|$  ) d'un vecteur  $\mathbf{A}=(A_x,A_y,A_z)$  a pour valeur:  $|\mathbf{A}| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$  (utilisation du théorème de Pythagore). Le module d'un vecteur est toujours une quantité positive ou nulle  $|\mathbf{A}|\geq 0$

**2. Direction :** La direction d'un vecteur indique l'orientation ou la ligne dans laquelle le vecteur pointe. Elle peut être spécifiée par un angle par rapport à un axe de référence ou par des composantes dans un système de coordonnées.

#### Opérations sur les Vecteurs :

*Addition* : Les vecteurs peuvent être ajoutés en utilisant la règle du parallélogramme ou en décomposant les vecteurs en composantes.

*Produit Scalaire* : Le produit scalaire de deux vecteurs donne un nombre réel. Il mesure la projection d'un vecteur sur l'autre et peut être utilisé pour calculer l'angle entre eux.

*Produit Vectoriel* : Le produit vectoriel de deux vecteurs donne un autre vecteur. Il mesure la rotation induite par les deux vecteurs et est utile dans diverses applications.



## 2. Rappels de mathématiques

### 2.1. Vecteur

#### **Applications des Vecteurs en Physique :**

**1. Forces :** Les forces, telles que la gravité, la tension d'une corde, ou la poussée d'un fluide, sont souvent représentées par des vecteurs. La direction indique la ligne d'action de la force, et la magnitude indique l'intensité de la force.

**2. Mouvement :** La vitesse et l'accélération d'un objet sont des vecteurs. La direction de la vitesse indique la trajectoire, et la direction de l'accélération indique la manière dont la vitesse change.

**3. Moments :** Les moments ou torques (comme dans le contexte d'un couple de forces) sont représentés par des vecteurs qui indiquent la direction autour d'un axe.

**4. Magnétisme :** Les champs magnétiques sont souvent représentés par des vecteurs pour indiquer la direction du champ.

**5. Impulsion et Quantité de Mouvement :** La quantité de mouvement est un vecteur qui représente la masse et la vitesse d'un objet. L'impulsion, qui est le produit de la force et du temps, est également un vecteur.

**6. Optique :** Dans l'étude de la lumière, les vecteurs peuvent être utilisés pour représenter la polarisation de la lumière.

## 2. Rappels de mathématiques

### 2.2 Produit scalaire

Le produit scalaire est une opération entre deux vecteurs qui produit un nombre scalaire (une grandeur purement numérique). Le produit scalaire est souvent utilisé en physique et en mathématiques pour mesurer la similarité ou l'angle entre deux vecteurs. La notation courante pour le produit scalaire de deux vecteurs **A** et **B** est **A·B**.

La formule générale pour le produit scalaire de deux vecteurs tridimensionnels **A**=( $A_x, A_y, A_z$ ) et **B**=( $B_x, B_y, B_z$ ) est donnée par :

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z$$

Cette formule donne un nombre réel qui est la somme des produits des composantes correspondantes des vecteurs.

Quelques propriétés importantes à noter sur le produit scalaire :

**1. Commutativité :  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$**

**2. Distributivité par rapport à l'addition :  $\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{C}$**

**3. Relation avec l'angle entre les Vecteurs :** La formule suivante relie le produit scalaire à l'angle ( $\theta$ ) entre deux vecteurs **A** et **B** :  **$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}| \cdot |\mathbf{B}| \cdot \cos(\theta)$**

**4. Utilisation pour calculer la projection d'un vecteur sur un autre.**

Le produit scalaire est une opération fondamentale et polyvalente qui trouve des applications dans de nombreux domaines, tels que la géométrie analytique, la physique, l'ingénierie ..

## 2. Rappels de mathématiques

### 2.3 Produit vectoriel

Le produit vectoriel est une opération entre deux vecteurs qui produit un autre vecteur.

La notation courante pour le produit vectoriel de deux vecteurs **A** et **B** est  **$A \wedge B$** .

La formule générale pour le produit vectoriel de deux vecteurs tridimensionnels  **$A=(A_x, A_y, A_z)$**  et  **$B=(B_x, B_y, B_z)$**  est donnée par :  **$A \wedge B = (A_y B_z - A_z B_y, A_z B_x - A_x B_z, A_x B_y - A_y B_x)$**

Cette formule donne le résultat sous la forme d'un nouveau vecteur dans l'espace tridimensionnel. Les composantes de ce vecteur résultant sont calculées en utilisant des combinaisons de produits croisés et de soustractions.

#### **Propriétés du produit vectoriel :**

**Antisymétrie** : Le produit vectoriel est antisymétrique, ce qui signifie que  **$A \wedge B = -(B \wedge A)$** .

**Module** : La magnitude du produit vectoriel  $A \times B$  est donnée par la formule :  **$|A \wedge B| = AB \cdot \sin \theta$**

$AB$  est la magnitude du produit scalaire de **A** et **B** et  $\theta$  est l'angle entre les deux vecteurs.

**Direction et sens**: La direction du produit vectoriel est perpendiculaire au plan formé par les vecteurs **A** et **B**, et elle suit la règle de la main droite : si vous pointez l'index de votre main droite dans la direction de **A** et le majeur dans la direction de **B**, alors le pouce pointera dans la direction du produit vectoriel  **$A \wedge B$** .

Le produit vectoriel de deux vecteurs est nul si et seulement si ces deux vecteurs sont colinéaires.

**$A \wedge B = 0$**  si **A** et **B** sont colinéaires

Le produit vectoriel est très utilisé dans de nombreux domaines, tels que la mécanique, l'électromagnétisme, la physique des particules,...

## 3. Grandeurs physiques et unités

### 3.1. Grandeur physique, dimension, unité

Une **grandeur** est définie comme attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance chimique, physique ou biologique, qui est susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement (Norme française NF X 07-001 - décembre 1994).

Déterminer quantitativement c'est **mesurer**, c'est-à-dire comparer à l'aide d'un instrument une grandeur physique inconnue avec une grandeur de même nature — on dira de même **dimension** — prise comme référence que l'on appelle **étalon**.

**Dimension** : La dimension caractérise la nature de la grandeur et définit les unités utilisables.

On peut ramener la dimension de grandeurs physiques, chimiques ou biologiques à une combinaison de sept grandeurs fondamentales:

<i>Dimension</i>	<i>Symbole</i>
Longueur	L
Masse	M
Temps	T
Intensité de courant	I
Température thermodynamique	$\Theta$
Quantité de matière	N
Intensité lumineuse	J

**Unité** : L'unité est l'expression de la dimension qui permet de quantifier la grandeur.

Une grandeur possède une unique dimension mais peut être exprimée en plusieurs unités.

# 3. Grandeurs physiques et unités

## 3.2. Système SI, unités de base SI et unités dérivées -1 -

Le Système International d'unités (SI) définit les unités de mesure des sept grandeurs indépendantes fondamentales:

<b>Dimension</b>	<b>Symbole</b>	<b>Unité SI</b>	<b>Symbole SI</b>
Longueur	L	mètre	m
Masse	M	kilogramme	kg
Temps	T	seconde	s
Intensité de courant	I	ampère	A
Température thermodynamique	$\Theta$	kelvin	K
Quantité de matière	N	mole	mol
Intensité lumineuse	J	candela	cd

### 3. Grandeurs physiques et unités



#### 3.2. Système SI, unités de base SI et unités dérivées -2 -

Les sept unités de base du système international sont les unités fondamentales à partir desquelles sont obtenues par combinaison toutes les autres unités, dites unités dérivées.

Grandeur	Unité SI	Grandeur	Unité SI
aire	m <sup>2</sup>	énergie	J (joule)
volume	m <sup>3</sup>	pression	Pa (pascal)
masse molaire	kg.mol <sup>-1</sup>	tension	V (volt)
masse volumique	kg.m <sup>-3</sup>	charge électrique	C (coulomb)
fréquence	Hz (hertz)	résistance électrique	Ω (ohm)
vitesse (scalaire)	m.s <sup>-1</sup>	champ électrique	V.m <sup>-1</sup>
vitesse angulaire, pulsation	rad.s <sup>-1</sup>	conductance électrique	S (siemens)
accélération (scalaire)	m.s <sup>-2</sup>	capacité électrique	F (farad)
force d'interaction	N (newton)	inductance	H (henry)
puissance mécanique	W (watt)	champ magnétique	T (tesla)

# 3. Grandeurs physiques et unités



## 3.3. Préfixes multiplicateurs SI

Les sept unités de base du système international sont les unités fondamentales à partir desquelles sont obtenues par combinaison toutes les autres unités, dites unités dérivées.

<b>Valeur</b>	$10^{-18}$	$10^{-15}$	$10^{-12}$	$10^{-9}$	$10^{-6}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$
<b>Préfixe</b>	atto	femto	pico	nano	micro	milli	centi	déci
<b>Symbole</b>	a	f	p	n	$\mu$	m	c	d

<b>Valeur</b>	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$	$10^{15}$	$10^{18}$
<b>Préfixe</b>	déca	hecto	kilo	Mega	Giga	Tera	Peta	Exa
<b>Symbole</b>	da	h	k	M	G	T	P	E

## 3.4. Equation aux dimensions - homogénéité d'une formule

On peut toujours multiplier ou diviser des grandeurs quelconques entre elles, mais on ne peut additionner que des grandeurs physiques de même dimension : l'inverse reviendrait à additionner les carottes et les citrouilles.

Les équations ou formules doivent donc être homogènes : chaque membre (et chaque terme) d'une équation doit avoir la même dimension physique. La vérification de l'homogénéité d'une formule ou d'un résultat de calcul doit être un réflexe en physique : c'est un moyen efficace pour éliminer les erreurs de calcul, et éviter les non-sens.

*Exemples:*

vitesse  $v = \frac{dx}{dt}$

accélération  $acc = \frac{dv}{dt}$

force  $F = m \cdot acc$

dimension  $[v] = LT^{-1}$

dimension  $[acc] = LT^{-2}$

dimension  $[F] = MLT^{-2}$



## 4. Structure de la matière

### 4.1. Organisation de la matière (1)

L'organisation de la matière peut être comprise à différents niveaux, allant des particules subatomiques aux structures macroscopiques. Les atomes, cristaux et molécules sont des composants clés qui contribuent à cette organisation à différentes échelles:

#### 1. Atomes :

- Les atomes sont les unités de base de la matière. Ils sont constitués de particules subatomiques, à savoir des protons, des neutrons et des électrons.
- Les protons et les neutrons forment le noyau de l'atome, situé au centre, tandis que les électrons orbitent autour du noyau.
- Le nombre de protons dans le noyau d'un atome détermine l'élément chimique auquel il appartient.

#### 2. Molécules :

- Les molécules sont formées par la liaison chimique entre des atomes.
- Une molécule peut être composée d'atomes du même élément (molécules diatomiques comme O<sub>2</sub>) ou d'atomes différents (molécules composées comme H<sub>2</sub>O - l'eau).
- Les liaisons chimiques, telles que les liaisons covalentes et ioniques, maintiennent les atomes ensemble dans une molécule.

## 4. Structure de la matière

### 4.1. Organisation de la matière (2)

#### 3. Cristaux :

- Les cristaux sont des structures solides composées d'atomes, d'ions ou de molécules arrangés de manière ordonnée et répétitive dans l'espace.
- Les cristaux peuvent être formés par des substances ioniques (comme le sel), covalentes (comme le diamant), ou métalliques (comme le cuivre).
- Les propriétés des cristaux, telles que la symétrie cristalline, sont déterminées par leur arrangement atomique.

#### 4. Matériaux condensés :

- À l'échelle macroscopique, les matériaux condensés regroupent une grande quantité d'atomes, de molécules ou d'ions.
- Ces matériaux peuvent être solides, liquides ou gazeux, en fonction de la disposition des particules et de la force des interactions entre elles.

#### 5. Échelles supérieures :

- Au-delà des cristaux, les structures peuvent s'organiser en échelles plus grandes, comme dans les tissus biologiques, les minéraux ou les objets fabriqués par l'homme.
- Ces structures plus complexes résultent de l'organisation et de l'interaction des constituants à des échelles inférieures.

# 4. Structure de la matière

## 4.2. Atome (1)

Un atome est la plus petite unité de base d'un élément chimique. Il est composé de particules subatomiques, notamment de protons, de neutrons et d'électrons. Voici une description simplifiée des composants de l'atome et de sa structure :

### 1. Noyau :

- Le noyau de l'atome est situé au centre et est constitué de protons et de neutrons.
- Les protons ont une charge positive, tandis que les neutrons n'ont pas de charge (charge neutre).
- La plupart de la masse de l'atome est concentrée dans le noyau.

### 2. Électrons :

- Les électrons orbitent autour du noyau en formant des couches électroniques.
- Les électrons ont une charge négative.
- Les électrons sont beaucoup moins massifs que les protons et les neutrons.

### 3. Nombre atomique (Z) :

- Le nombre atomique d'un atome correspond au nombre de protons dans son noyau.
- Il détermine l'identité chimique de l'élément.

### 4. Nombre de masse (A) :

- Le nombre de masse d'un atome est la somme du nombre de protons et de neutrons dans son noyau.
- Il représente la masse totale de l'atome.

### 5. Isotopes :

- Des isotopes d'un élément ont le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons dans leur noyau.
- Les isotopes d'un élément peuvent avoir des propriétés chimiques similaires mais des propriétés physiques différentes en raison de leur masse.

## 4. Structure de la matière

### 4.2. Atome (2)

#### 6. Énergie des électrons :

- Les électrons occupent différentes couches électroniques autour du noyau, chacune ayant une énergie spécifique.
- Les électrons peuvent absorber ou émettre de l'énergie pour passer d'une couche à une autre.

#### 7. Modèle de Bohr :

- Le modèle de Bohr, proposé par Niels Bohr, est une représentation simplifiée de la structure de l'atome avec des électrons orbitant autour du noyau sur des orbites quantifiées.

#### 8. Nuage électronique :

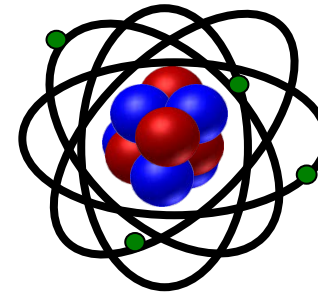
- Selon la mécanique quantique, le modèle de nuage électronique décrit la probabilité de trouver un électron dans une région donnée autour du noyau.

Les atomes forment la base de la matière et peuvent se combiner pour former des molécules. Les propriétés chimiques des éléments et des composés sont déterminées par la structure des atomes qui les composent.

## 4.2. Atome (3)

### Atome

La plus petite partie d'un corps simple ayant toutes les propriétés de ce corps.



### Élément chimique

La forme la plus simple de la matière:  
classe d'atomes dont le noyau compte un même nombre de protons.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 Y	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 *La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	+Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Ns	108 Hs	109 Mt	110	111	112	113					

*Tableau périodique des éléments  
(Mendeleïev)*

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

## 4.2. Atome (4)

### Noyau

Partie centrale d'un atome contenant les protons et neutrons

### Protons

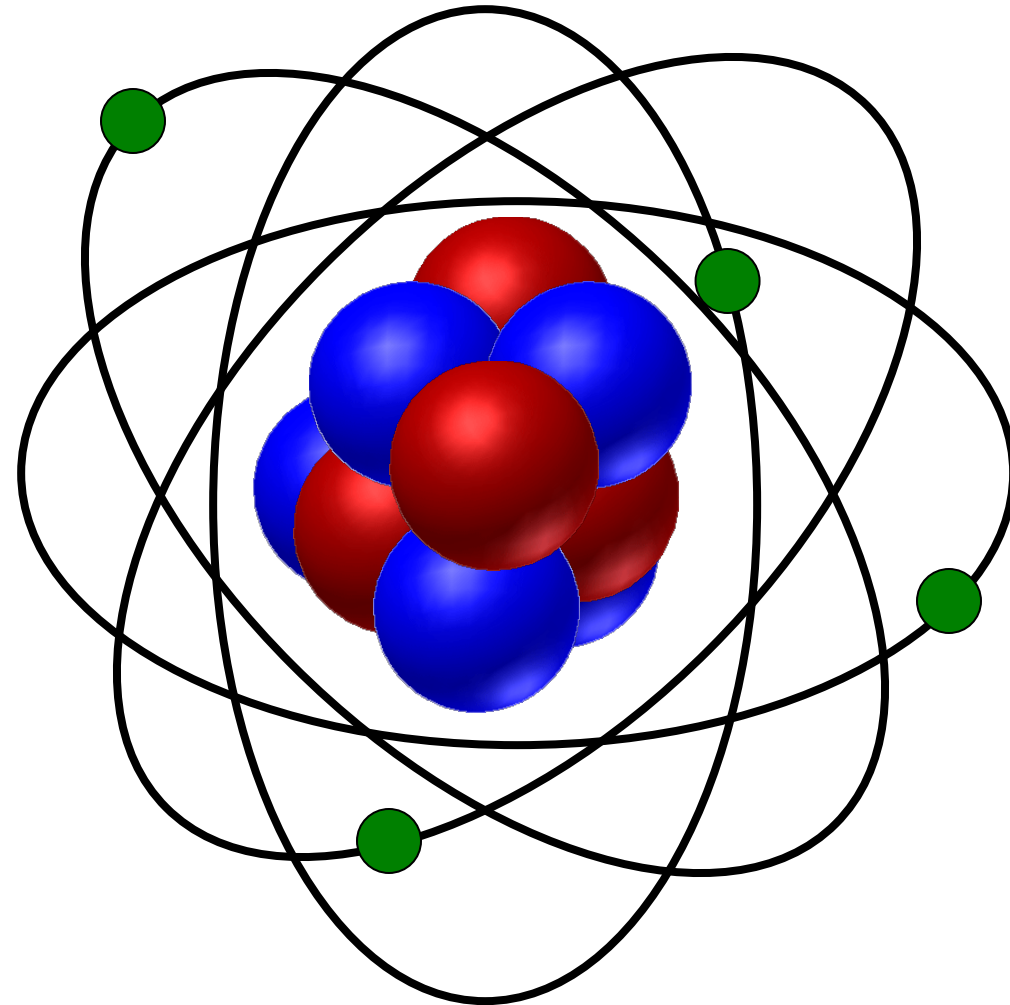
Particules constituantes du noyau chargées positivement

### Neutrons

Particules constituantes du noyau non chargées

### Nucléons:

Désigne à la fois les protons et les neutrons



## 4.2. Atome (5)

### Nombre atomique

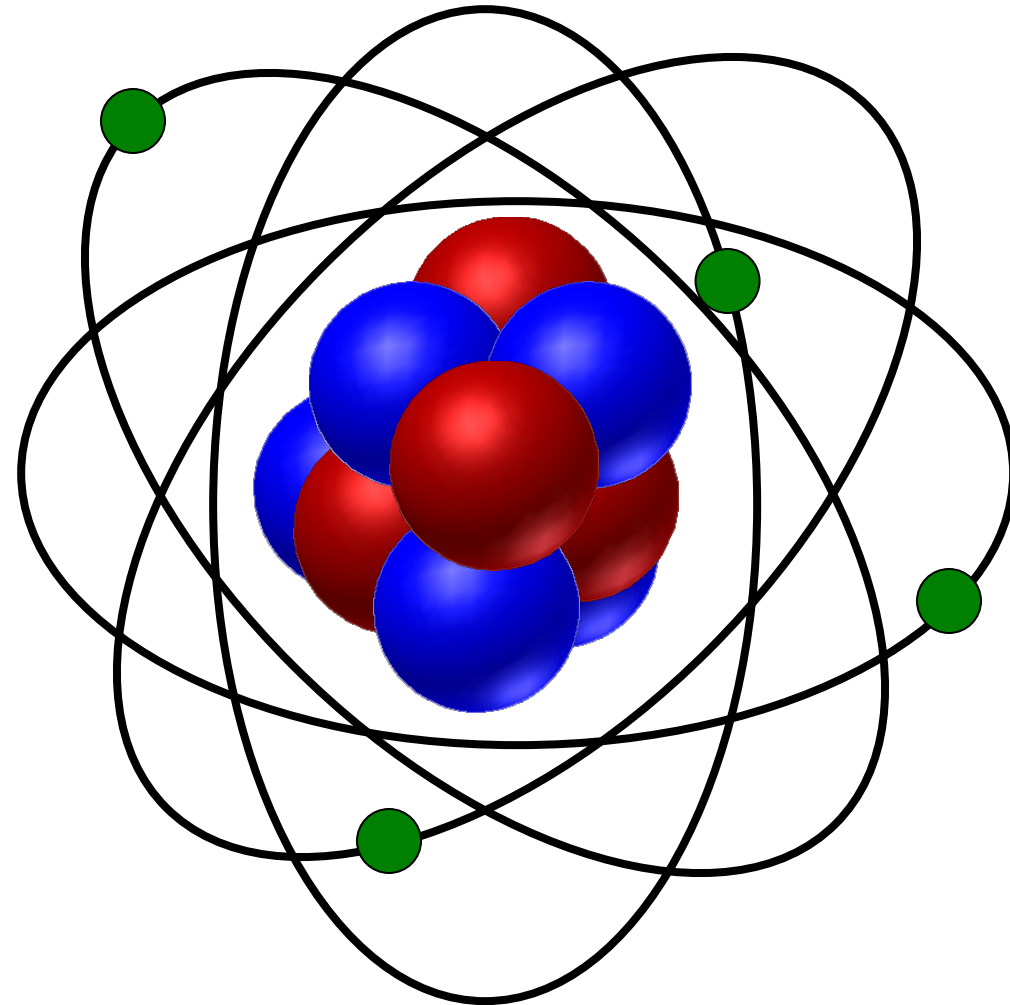
Le nombre atomique noté  $Z$  est égal au nombre de protons dans le noyau d'un atome.

Le nombre atomique identifie l'élément.

Il définit la structure électronique de l'atome (nombre d'électrons).

### Nombre de masse $A$

$A$  est égal au nombre de nucléons





## 4.2. Atome (6)



### Electrons

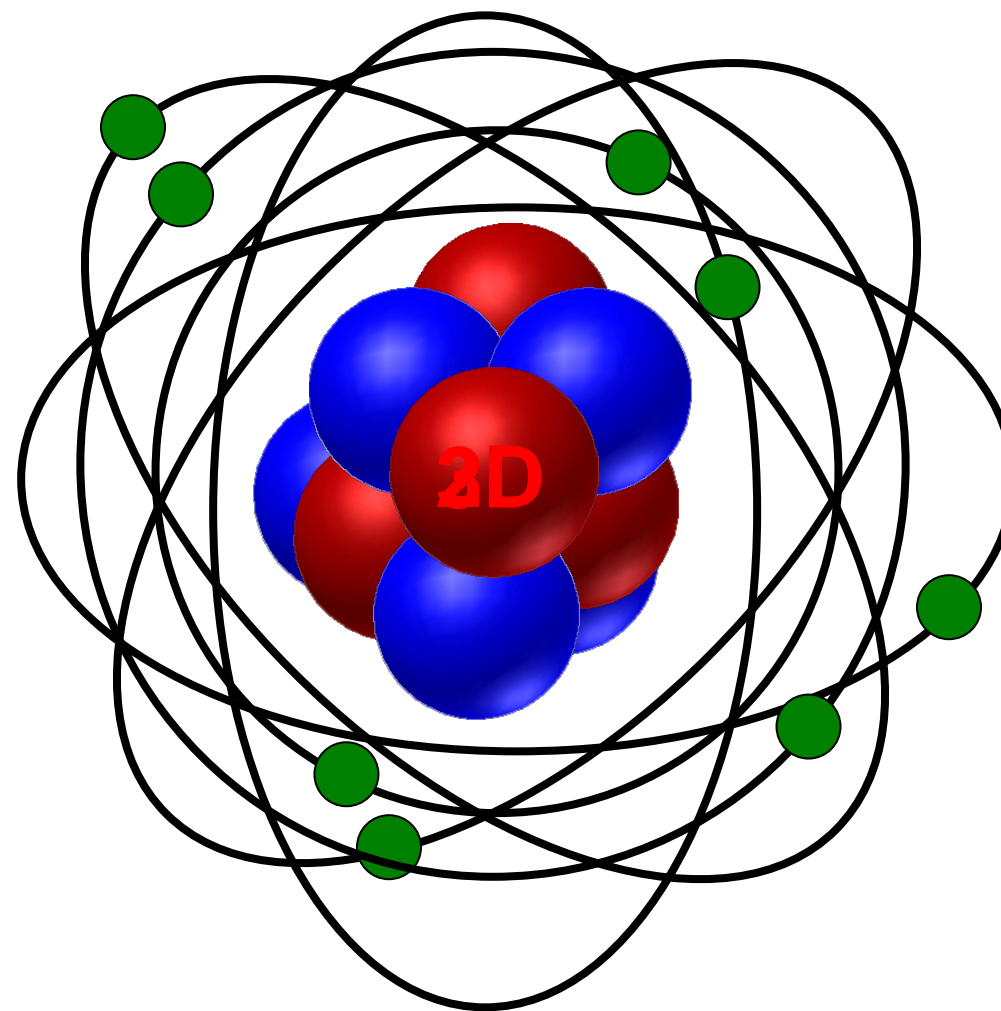
Particules chargées négativement

### Orbitales électroniques

Orbites des électrons autour du  
noyau

### Electrons de valence

Electrons de la couche externe



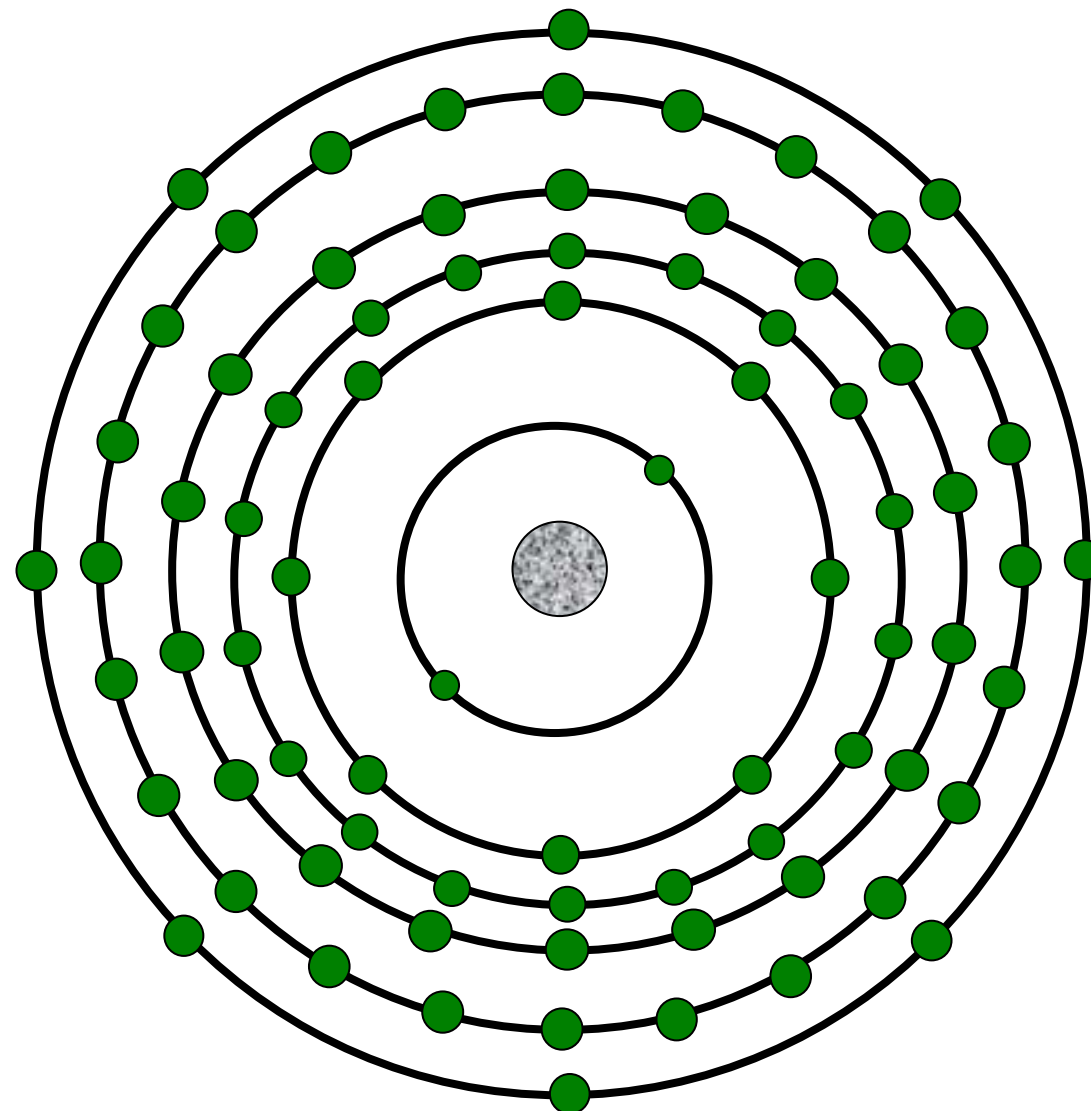




## 4.2. Atome (7)

### Orbites électroniques

Orbit Number	Maximum Electrons
1	2
2	8
3	18
4	32
5	50
6	72
Valence Orbit	8



Les couches se remplissent dans l'ordre de leur proximité au noyau

## 4. Structure de la matière

### 4.3. Particules élémentaires (1)

Les particules élémentaires sont les constituants fondamentaux de la matière. Elles peuvent être classées en deux catégories principales : les quarks et les leptons. Ces particules interagissent par l'intermédiaire des forces fondamentales, telles que l'interaction forte, l'interaction électromagnétique, et l'interaction faible. Voici une classification des particules élémentaires :

#### 1. Quarks :

- Les quarks sont des particules élémentaires dotées d'une charge fractionnaire.
- Ils interagissent fortement les uns avec les autres à travers l'interaction forte.
- Il existe six types (saveurs) de quarks : haut (up), bas (down), charme, étrange, top et fondamental (up et down sont les quarks les plus légers et les plus couramment rencontrés).
- Les quarks sont confinés à l'intérieur des hadrons tels que les protons et les neutrons.

#### 2. Leptons :

- Les leptons sont des particules élémentaires avec une charge électrique entière.
- Ils interagissent par l'intermédiaire de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible.
- Il existe six leptons : l'électron, le muon, le tau, et leurs correspondants neutrinos (neutrino électronique, neutrino muonique, neutrino tau).
- Les leptons ne participent pas à l'interaction forte.



## 4. Structure de la matière

### 4.3. Particules élémentaires (2)

#### 3. Bosons de jauge (médiateurs des forces) :

- Ce sont les particules responsables de la transmission des forces fondamentales.
- Photon : Médiateur de l'interaction électromagnétique.
- Gluons : Médiateurs de l'interaction forte entre les quarks.
- Bosons W et Z : Médiateurs de l'interaction faible.

#### 4. Boson de Higgs :

- Le boson de Higgs est une particule élémentaire découverte en 2012 au CERN.
- Il est associé au mécanisme de Higgs, qui explique comment les particules élémentaires acquièrent leur masse.

Il est important de noter que les quarks et les leptons sont des particules de matière, tandis que les bosons de jauge et le boson de Higgs sont des particules de force.

Les interactions entre ces particules sont régies par le modèle standard de la physique des particules, qui décrit avec succès les propriétés et les comportements des particules élémentaires connues jusqu'à présent.

Cependant, le modèle standard n'explique pas toutes les observations, et les chercheurs travaillent actuellement sur des extensions ou des théories nouvelles pour mieux comprendre l'univers à des échelles microscopiques



## 4. Structure de la matière

### 4.3. Particules élémentaires (3)

Les particules élémentaires et les particules composées (hadrons) peuvent être classées en plusieurs catégories, notamment les bosons, les fermions et les hadrons. Voici une explication plus détaillée de chacune de ces catégories :

#### 1. Bosons :

- Les bosons sont des particules de force, responsables de la médiation des interactions fondamentales entre les particules.
- Boson de Higgs : Il est associé au mécanisme de Higgs qui donne leur masse aux particules.
- Photons : Médiateurs de l'interaction électromagnétique.
- Gluons : Médiateurs de l'interaction forte entre les quarks.
- Bosons W et Z : Médiateurs de l'interaction faible.

#### 2. Fermions :

- Les fermions sont les particules constitutives de la matière.
- Ils ont une demi-charge ou une charge entière et obéissent au principe d'exclusion de Pauli, ce qui signifie qu'aucun deux fermions ne peut occuper le même état quantique dans un système donné.
- Les quarks et les leptons sont des fermions.
- Quarks : Constituants des hadrons, tels que les protons et les neutrons.
- Leptons : Comme l'électron, le muon, le tau, et leurs neutrinos associés.



## 4. Structure de la matière

### 4.3. Particules élémentaires (4)

#### 3. Hadrons :

- Les hadrons sont des particules composées de quarks.
- Il y a deux types principaux de hadrons : les baryons et les mésons.
- Baryons : Comme les protons et les neutrons, qui sont composés de trois quarks.
- Mésons : Composés d'une paire quark-antiquark.

#### 4. Quark et antiquark :

- Les quarks sont des particules élémentaires dotées de charge fractionnaire.
- Les antiquarks sont les antiparticules des quarks, avec des charges opposées.
- Ils se combinent pour former des mésons.

#### 5. Neutrinos :

- Les neutrinos sont des particules neutres et très peu massives.
- Ils font partie de la famille des leptons et interagissent faiblement avec la matière.
- Il existe trois types de neutrinos : électronique, muonique et tau.

Ces catégories de particules sont essentielles pour comprendre la structure fondamentale de la matière et les interactions qui régissent le comportement des particules à l'échelle subatomique. Elles sont intégrées dans le modèle standard de la physique des particules, qui décrit notre compréhension actuelle des particules élémentaires et de leurs interactions.

## 4. Structure de la matière

### 4.4. Interactions fondamentales dans la matière (1)

Les interactions fondamentales dans la matière sont les forces fondamentales qui gouvernent le comportement des particules subatomiques et leur interaction. À ce jour, quatre interactions fondamentales ont été identifiées.

#### 1. Interaction gravitationnelle :

- Portée : Infinie.
- Porteurs : Aucun (médiée par des objets massifs).
- Charge : Universelle, tous les objets massifs exercent une force gravitationnelle.
- Force : Faible par rapport aux autres interactions.
- Rôle : Responsable de l'attraction entre des masses, par exemple, la gravité terrestre qui maintient les objets sur la surface de la Terre.

#### 2. Interaction électromagnétique :

- Portée : Infinie.
- Porteurs : Photons.
- Charges : Positives (protons), négatives (électrons).
- Forces : Attraction entre charges opposées, répulsion entre charges similaires.
- Rôle : Responsable des phénomènes électriques et magnétiques, interactions atomiques, chimie, etc.

## 4. Structure de la matière

### 4.4. Interactions fondamentales dans la matière (2)

#### 3. Interaction forte (ou nucléaire forte) :

- Portée : Très courte (de l'ordre de la taille d'un noyau atomique).
- Porteurs : Gluons.
- Charges : Pas de charge électrique (agissant entre quarks).
- Forces : Maintient les protons et les neutrons liés dans le noyau atomique malgré leur charge électrique mutuelle.
- Rôle : Responsable de la cohésion des noyaux atomiques.

#### 4. Interaction faible (ou force nucléaire faible) :

- Portée : Très courte (de l'ordre de la taille d'un noyau atomique).
- Porteurs : Bosons W et Z.
- Charges : Affecte toutes les particules avec masse.
- Forces : Impliquée dans les processus de désintégration radioactive et certains types de réactions nucléaires.
- Rôle : Responsable de certaines formes de désintégration radioactives.

## 4. Structure de la matière

### 4.5. Qu'est-ce qu'une charge électrique? (1)

La charge électrique est une notion abstraite, comparable à celle de masse, qui permet d'expliquer certains comportements. C'est une propriété fondamentale de la matière qui décrit l'interaction électromagnétique entre les particules subatomiques.

Les particules chargées électriquement peuvent être positives (comme les protons) ou négatives (comme les électrons), tandis que les particules neutres n'ont pas de charge électrique (neutrons).

**L'interaction électromagnétique se manifeste sous la forme d'une force (force électromagnétique ou force de Lorentz ) attractive ou répulsive agissant entre particules porteuses de charge électrique.**

Deux porteurs de charges électriques de même signe se repoussent alors que deux porteurs de charges électriques de signes opposés s'attirent.

L'interaction électromagnétique assure ainsi la cohésion des atomes en liant les électrons (charge électrique négative) et le noyau des atomes (charge électrique positive). Cette même liaison permet de combiner les atomes en molécules et l'interaction électromagnétique est donc responsable des réactions chimiques.

L'interaction électromagnétique est à l'origine de tous les phénomènes électriques et magnétiques.

Cette interaction peut, dans certaines conditions, créer des ondes électromagnétiques, parmi lesquelles on distingue la lumière, les ondes radio, les ondes radar, les rayons X...



## 4. Structure de la matière

### 4.5. Qu'est-ce qu'une charge électrique? (2)

Ces interactions électromagnétiques en électricité classique sont décrits par les équations de Maxwell.

A grande échelle cela se traduit par le fait que les objets chargés électriquement subissent une force lorsqu'ils sont placés dans un champ électromagnétique.

**La charge électrique se conserve toujours** et constitue une propriété essentielle des particules élémentaires soumises à l'interaction électromagnétique.

La matière électriquement chargée subit l'influence des champs électromagnétiques mais en produit également.

L'unité usuelle de mesure de la charge est le coulomb (C). Toutefois, dans certains contextes, (batteries) d'autres unités comme l'ampère-heure (Ah) sont parfois utilisées.

Depuis l'expérience de Millikan en 1909, il a été mis en évidence que la charge électrique est quantifiée : toute charge  $Q$  quelconque est un multiple entier de la charge élémentaire, notée  $e$ , qui correspond à la valeur absolue de la charge de l'électron ( $-e$ ), avec  $e \approx 1,602 \times 10^{-19}$  C. Toutefois, en raison de la petitesse de cette valeur, il est souvent possible de considérer la charge comme une quantité continue lorsque des quantités macroscopiques de charges sont considérées;

Un Coulomb représente la charge totale d'environ  $6 \times 10^{18}$  électrons

## 4. Structure de la matière

### 4.6. Notion de champ en physique

**1. Définition :** Un champ est une fonction qui, à chaque point d'un espace (par exemple l'espace physique à 3 dimensions, ou l'espace-temps à 4 dimensions), associe une valeur scalaire ou vectorielle.

Un champ scalaire correspond à une quantité numérique comme le champ de température, tandis qu'un champ vectoriel est donné en plus par une direction et un sens, comme le champ de vitesses.

Chaque type d'interaction (par exemple gravitation, électromagnétisme, pression atmosphérique, etc.) est relié à un type particulier de champ. Le concept de champ a été inventé par Faraday.

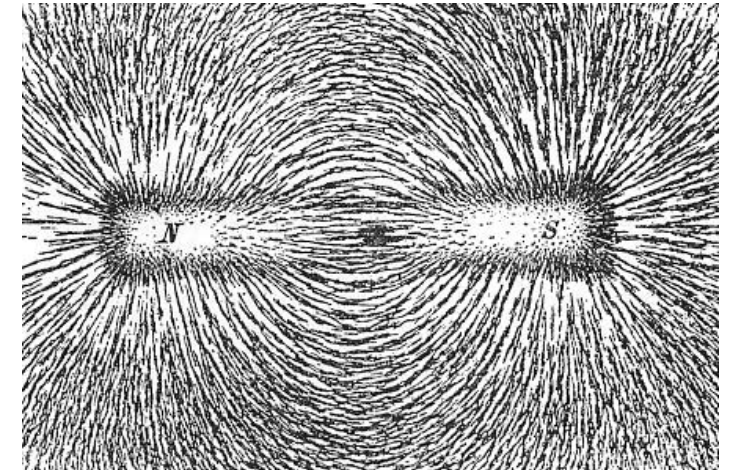
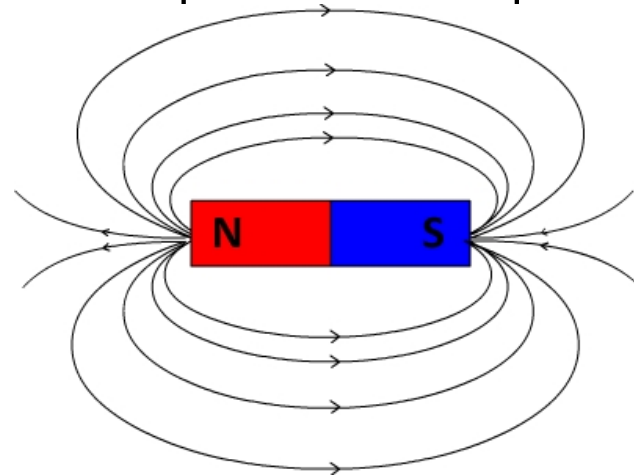
**2. Lignes de champ :** Une ligne de champ est une courbe qui, en tout point, a une tangente dans la même direction que le vecteur en ce point.

*Exemple :* lignes de champ d'un barreau aimanté et leur visualisation à l'aide de poudre de fer dont les grains s'orientent dans la même direction que le champ.

**2. Champ uniforme:**

Un champ est uniforme lorsqu'il a même intensité, même direction et même sens en tous les points de l'espace. Les lignes d'un champ uniforme sont des droites parallèles au vecteur champ.

Par exemple, le champ de pesanteur est localement uniforme.



## 4. Structure de la matière

### 4.7. Champ électromagnétique

Le champ électromagnétique est le champ associé à la force électromagnétique exercée par des particules chargées. Ce champ représente alors l'ensemble des composantes de la force électromagnétique qui s'applique à une particule chargée qui se déplace dans le référentiel considéré.

Il est la composition de deux champs indissociables, mais mesurables séparément: un champ électrique et un champ magnétique.

D'un point de vue théorique, le champ électrique et le champ magnétique sont décrits par les quatre équations différentielles de Maxwell, parfaitement symétriques entre les champs électrique et magnétique, chacun étant la source de l'autre:

- Un champ magnétique est créé en présence de courants électriques, ou bien en présence d'un champ électrique variable.
- Un champ électrique est créé lui-même en présence d'un champ magnétique variable, ou en présence de charges électriques (ions, électrons, protons etc...).
- Si les charges sont immobiles, le champ électromagnétique se réduit au champ électrique

Une particule de charge  $q$  et de vitesse  $v$  subit une force  $\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$

où:  $\vec{E}$  est le champ électrique et  $\vec{B}$  le champ magnétique

Le champ électromagnétique est l'ensemble  $(\vec{E}, \vec{B})$

## 4. Structure de la matière

### 4.8. Champ électrique (1)

Le champ électrique est une grandeur physique associée à la présence de charges électriques. Il est utilisé pour décrire l'influence qu'une charge électrique exerce sur d'autres charges à proximité.

#### 1. Définition :

- Le champ électrique ( $\vec{E}$ ) en un point de l'espace est défini comme la force électrique ( $\vec{F}$ ) que subirait une charge positive de test ( $q$ ) placée en ce point, divisée par la valeur de la charge de test.

$$\vec{F} = q \vec{E}$$

#### 2. Unité :

- L'unité du champ électrique dans le système international (SI) est le volt par mètre (V/m).

#### 3. Direction et sens :

- Le champ électrique est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'il a une magnitude (intensité) et une direction. La direction du champ électrique indique la direction dans laquelle une charge positive de test se déplacerait si elle était libre de le faire.

#### 4. Superposition des Champs :

- Le principe de superposition s'applique au champ électrique, ce qui signifie que le champ total en un point est la somme vectorielle des champs créés par chaque charge présente.

# 4. Structure de la matière

## 4.8. Champ électrique (2)

### 5. Lignes de Champ Électrique :

- Les lignes de champ électrique sont des lignes imaginaires qui représentent la direction et la magnitude du champ électrique. Ces lignes partent des charges positives et convergent vers les charges négatives.

### 6. Champ Électrique Uniforme :

- Un champ électrique est dit uniforme s'il a la même intensité et la même direction en tout point d'une région donnée.

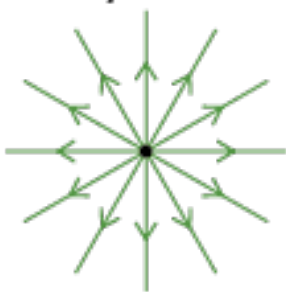
Dans le cas de charges fixes dans l'espace, le champ électrique est appelé champ électrostatique.

#### Exemples: *Champ électrostatique*

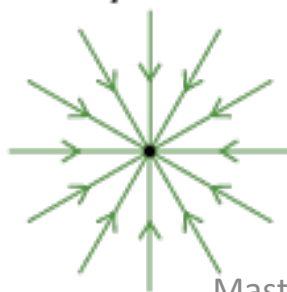
Un corps qui porte une charge électrique crée un champ électrostatique en chaque point d'une zone d'espace autour de lui

Lignes de champ électrostatique créées par une charge ponctuelle  $q$

$q > 0$

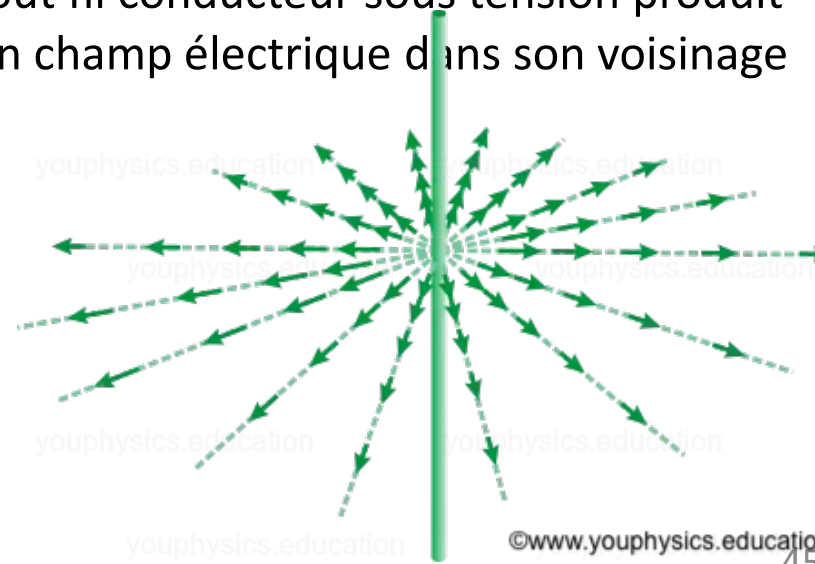


$q < 0$



#### *Champ électrique*

Tout fil conducteur sous tension produit un champ électrique dans son voisinage



## 4. Structure de la matière

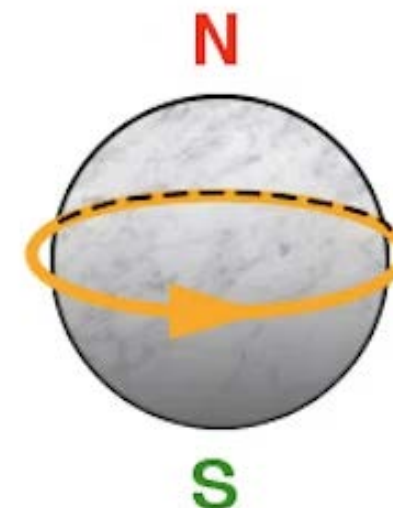
### 4.9. Champ magnétique

Le champ magnétique, ou induction magnétique - mesurée en Tesla (T)- , est une grandeur caractérisée par la donnée d'une intensité et d'une direction, définie en tout point de l'espace, et déterminée par la position et l'orientation d'aimants, d'électroaimants et le déplacement de charges électriques.

La présence de ce champ se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite force de Lorentz), et divers effets affectant certains matériaux (paramagnétisme, diamagnétisme ou ferromagnétisme selon les cas). La grandeur qui détermine l'interaction entre un matériau et un champ magnétique est la susceptibilité magnétique.

#### **Aimants permanents**

Des champs magnétiques d'aimants permanents sont également engendrés par des courants. Mais il ne s'agit pas de courants macroscopiques où les particules chargées se propagent dans le même sens mais de courants électriques microscopiques. Dans le cas du ferromagnétisme, ces courants microscopiques sont engendrés par la rotation de certains électrons sur eux-mêmes (spins des électrons). Le spin de l'électron peut être considéré comme courant circulaire microscopique.



## 4. Structure de la matière

### 4.10. Fission nucléaire (1)

La fission nucléaire est un processus au cours duquel le noyau d'un atome lourd se divise en deux noyaux plus légers, généralement accompagnée de l'émission de neutrons et d'une quantité importante d'énergie. Ce processus est au cœur des réacteurs nucléaires utilisés pour produire de l'électricité, ainsi que des armes nucléaires.

Voici les étapes clés de la fission nucléaire :

#### 1. Incident neutronique :

- Le processus de fission est amorcé par l'impact d'un neutron sur le noyau d'un atome lourd, généralement un isotope de l'uranium (comme l'uranium-235) ou du plutonium-239.

#### 2. Fission du noyau :

- Lorsqu'un neutron est absorbé par le noyau d'un atome lourd, celui-ci peut devenir instable et se scinder en deux noyaux plus légers. Cette scission libère généralement plusieurs neutrons supplémentaires.

#### 3. Libération d'énergie :

- La fission nucléaire libère une quantité considérable d'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique et d'énergie cinétique des produits de fission.
- La relation  $E=mc^2$ , décrite par la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, explique comment une petite quantité de masse convertie en énergie peut produire une libération d'énergie significative.

## 4. Structure de la matière

### 4.10. Fission nucléaire (2)

#### 4. Neutrons supplémentaires :

- Les neutrons supplémentaires produits lors de la fission peuvent à leur tour induire a fission d'autres noyaux d'atomes lourds, créant ainsi une réaction en chaîne.

#### 5. Contrôle de la réaction en chaîne :

- Pour éviter une réaction en chaîne incontrôlée, des matériaux modérateurs (comme l'eau légère ou le graphite) sont souvent utilisés pour ralentir les neutrons, facilitant ainsi leur absorption par d'autres noyaux fissiles.
- Des matériaux absorbant les neutrons (comme les barres de contrôle) sont également utilisés pour réguler la réaction.

Dans les centrales nucléaires destinées à la production d'électricité, la fission nucléaire est contrôlée pour maintenir une réaction stable et produire de la chaleur, qui est ensuite utilisée pour générer de la vapeur et faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité.

La fission nucléaire a des implications significatives en matière d'énergie, mais elle soulève également des préoccupations liées à la sécurité, à la gestion des déchets radioactifs et à la prolifération des armes nucléaires.



## 4. Structure de la matière

### 4.11. Fusion nucléaire (1)

La fusion nucléaire est un processus au cours duquel deux noyaux atomiques légers se combinent pour former un noyau plus lourd, libérant une quantité importante d'énergie. Ce processus est le mécanisme qui alimente le soleil et d'autres étoiles, et il est également étudié dans le cadre du développement d'une source d'énergie contrôlée sur Terre. Voici les principales caractéristiques de la fusion nucléaire :

#### 1. Conditions extrêmes :

- La fusion nucléaire nécessite des conditions extrêmes de température et de pression pour surmonter la répulsion électrique mutuelle des noyaux atomiques positifs.
- Ces conditions sont atteintes dans des environnements très chauds, tels que le cœur des étoiles.

#### 2. Réaction de fusion :

- La réaction de fusion la plus courante implique l'isotope léger de l'hydrogène, appelé deutérium, et l'isotope encore plus léger, appelé tritium.
- La fusion deutérium-tritium: un noyau de deutérium fusionne avec un noyau de tritium, produisant un noyau d'hélium 4, un neutron libre et 17,6 MeV d'énergie.

#### 3. Énergie libérée :

- La fusion nucléaire libère une quantité d'énergie beaucoup plus importante par unité de masse que la fission nucléaire.
- La majeure partie de l'énergie libérée provient de la conversion de masse en énergie ( $E=mc^2$ ).

## 4. Structure de la matière

### 4.11. Fusion nucléaire (2)

#### 4. Projet ITER :

- ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est un projet de réacteur de fusion nucléaire expérimental situé en France.
- Son objectif est de démontrer la faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire comme source d'énergie à grande échelle.

#### 5. Avantages potentiels :

- La fusion nucléaire a des avantages potentiels par rapport à la fission, notamment la disponibilité abondante des matières premières (hydrogène), une réduction des déchets radioactifs, et une réduction des risques de prolifération nucléaire.

#### 6. Défis technologiques :

- La réalisation d'une fusion nucléaire contrôlée sur Terre présente des défis technologiques considérables, principalement liés à la création et au maintien de conditions extrêmes pendant une durée suffisante.

Bien que la fusion nucléaire présente un grand potentiel en tant que source d'énergie propre et abondante, sa réalisation pratique en tant que source d'énergie commerciale reste un défi scientifique et technologique majeur. Des recherches et des projets à l'échelle mondiale sont en cours pour surmonter ces défis et faire progresser la technologie de fusion nucléaire

# 5. Thermodynamique

## 5.1. Concepts de base

**La thermodynamique est une branche de la physique qui étudie les transferts d'énergie sous forme de chaleur et de travail.**

**Travail (W) :** En thermodynamique, le travail est une forme d'énergie associée au déplacement d'une force à travers une distance. Il peut être effectué par un système sur son environnement (travail positif) ou sur le système par son environnement (travail négatif).

**Chaleur (Q) :** La chaleur est l'énergie transférée entre deux systèmes en raison d'une différence de température. Elle peut être transférée par conduction, convection ou rayonnement. Le transfert de chaleur est noté positif lorsque le système reçoit de la chaleur et négatif lorsqu'il libère de la chaleur.

En thermodynamique, l'énergie peut prendre différentes formes, notamment:

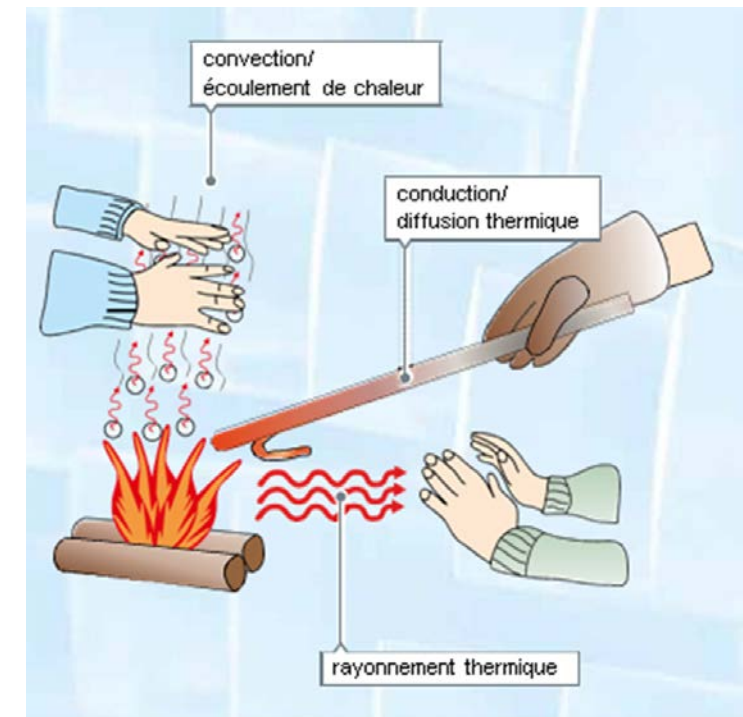
**Énergie Cinétique :** L'énergie associée au mouvement des particules.

**Énergie Potentielle :** L'énergie liée à la position d'un objet par rapport à un point de référence.

**Énergie Thermique :** L'énergie associée à la température d'un système.

**Énergie Mécanique :** La somme de l'énergie cinétique et potentielle dans un système.

Ces concepts de base sont utilisés pour formuler les lois de la thermodynamique et analyser le comportement des systèmes en fonction des changements de température, de pression, de volume et d'autres paramètres.



# 5. Thermodynamique

## 5.2. Variables d'état – Fonctions d'état

### Variables d'état:

- pour décrire l'état d'un système, on réalise un certain nombre de mesures, qui se traduisent par des valeurs numériques caractéristiques, appelées variables d'état.
- **température, pression, volume et quantité de matière** sont les variables d'état les plus courantes.
- un système est en **état d'équilibre** si les variables d'état du système sont constantes (dans le temps) et uniformes dans toute partie homogène du système.
- une variable d'état caractérise un état, non une évolution entre deux états : toute grandeur assimilable à une vitesse (une dérivée par rapport au temps) n'est pas une variable d'état : en fait elle décrit non pas un état, mais le passage d'un état à un autre (**transformation**) ;
- les variables d'état caractérisent le système lui-même : les mesures des interactions d'un système avec l'extérieur ne sont pas des variables d'état.
- une variable d'état peut être locale (définie en chaque point du système) ou globale (définie pour l'ensemble du système).

### Fonctions d'état:

- soit un système décrit par un ensemble de variables d'état  $x_1, x_2, \dots, x_n$   
on appelle fonction d'état **toute fonction des seules variables d'état  $x_1, x_2, \dots, x_n$**

## 5. Thermodynamique

### 5.3. Variables d'état - 1 -

- **Température (T):**

Un système , même macroscopiquement au repos, est constitué de particules (atomes, molécules, ions) qui sont perpétuellement en mouvement (il s'agit soit de mouvements désordonnés dans le cas des fluides, soit d'oscillations autour d'une position d'équilibre dans le cas d'un réseau cristallin).

Nous admettons que la température est une mesure macroscopique du degré d'agitation microscopique des particules du système : plus la température est élevée, plus l'agitation microscopique des particules est intense.

- **Echelles de température:** les températures peuvent être **repérées** sur l'échelle Celsius (en °C) : le 0 de l'échelle correspond à la glace fondante, le 100 à l'eau bouillante (à la pression atmosphérique normale)

- **Echelle absolue (thermodynamique ):**

- Elles peuvent être mesurées en **Kelvin (K)** selon échelle absolue ayant pour origine le **zéro absolu**, température la plus basse pouvant être atteinte. C'est l'échelle utilisée dans les équations de la thermodynamique.

La température en K étant égale à la température en °C à laquelle on rajoute 273,15 K.  $T \text{ (K)} = t \text{ (°C)} + 273,15$

La température en K est toujours positive

- **Pour mesurer des températures, les thermomètres** les plus courants utilisent la dilatation d'un fluide, ou des effets électriques (variation de la résistivité électrique avec la température, thermocouples).

# 5. Thermodynamique

## 5.3. Variables d'état - 2 -

### Pression (P) :

- La pression est la force exercée par un gaz ou un liquide par unité de surface. En tout point d'un fluide, on peut mesurer une pression qui est égale à la force exercée par le fluide sur un élément de surface qui y est immergé.
- La pression est liée aux collisions des particules avec les parois du contenant.
- La pression se mesure en Pa ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ). Les autres unités courantes sont le bar ( $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ ), l'atmosphère ( $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ ), le mm de colonne d'eau ( $1 \text{ mm colonne d'eau} = 9,8 \text{ Pa}$ ) et le mm de mercure ( $760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ atm}$ ).

### Volume (V) :

- Le volume est l'espace occupé par un système. Il est exprimé en mètres cubes ( $\text{m}^3$ ). Le volume peut varier au cours d'un processus thermodynamique.

### Quantité de matière (n) :

- La quantité de matière, notée  $n$ , est la grandeur utilisée pour spécifier un nombre d'entités microscopiques (atomes, molécules, ions, etc.). Son unité est la mole (mol). La quantité de matière d'un corps composé de  $6,022 \times 10^{23}$  entités élémentaires est  $n = 1,00 \text{ mol}$ . Ce nombre est noté  $N_A$  et appelé **nombre d'Avogadro** et provient du calcul suivant:

En négligeant la masse des électrons et en considérant égales les masses du proton et du neutron qui sont très voisines, la masse d'un atome est égale au produit de son nombre de nucléons (nombre de masse  $A$ ) par la masse d'un nucléon, environ  $1,67 \times 10^{-24} \text{ g}$ . Ainsi, la masse de  $N_A$  molécules est proche de  $A$  grammes.

# 5. Thermodynamique

## 5.4. Cycle réversible

Les cycles réversibles et les cycles irréversibles sont deux concepts importants en thermodynamique qui décrivent le comportement des systèmes lorsqu'ils subissent des transformations thermiques. Ces concepts sont fondamentaux pour comprendre le rendement des cycles thermodynamiques et des processus énergétiques.

### 1. Cycle Réversible :

- Un cycle réversible est un processus thermodynamique idéalisé dans lequel chaque étape peut être inversée sans engendrer de pertes d'énergie. Cela signifie que le système peut être ramené à son état initial sans laisser de traces sur le système ou sur son environnement.
- Les transformations réversibles sont caractérisées par des variations infinitésimales à chaque étape, et elles sont souvent représentées sur des diagrammes thermodynamiques par des courbes continues.
- Les cycles réversibles sont utiles pour établir des limites théoriques de performance, telles que le cycle de Carnot, qui représente le rendement maximal pour une machine thermique fonctionnant entre deux réservoirs thermiques.

# 5. Thermodynamique

## 5.5. Cycle irréversible

### 2. Cycle Irréversible :

- Un cycle irréversible est un processus thermodynamique où des pertes d'énergie sont inévitables, et où certaines transformations ne peuvent pas être inversées sans augmenter l'entropie du système ou de son environnement.
- Dans la réalité, la plupart des processus et des cycles sont irréversibles. Par exemple, les frottements, les résistances électriques, les transferts de chaleur à travers des gradients de température finis, etc., contribuent à l'irréversibilité des processus.
- Les cycles irréversibles sont associés à une augmentation nette de l'entropie, une mesure de la désorganisation ou du désordre d'un système.

En résumé, la principale distinction entre les cycles réversibles et irréversibles réside dans la capacité à inverser les transformations sans perte d'énergie significative. Les cycles réversibles sont des idéalizations utiles pour établir des limites théoriques, tandis que les cycles irréversibles sont plus représentatifs des processus réels. Les deux concepts sont cruciaux pour l'analyse et la compréhension des cycles thermodynamiques et des processus énergétiques.



## 5. Thermodynamique

### 5.6. Fonctions d'état : Energie interne

L'énergie interne ( $U$ ) d'un système thermodynamique est une mesure de l'énergie totale contenue dans ce système, y compris l'énergie cinétique, l'énergie potentielle et l'énergie interne moléculaire associée à la température du système.

L'énergie interne d'un système peut changer de différentes manières, notamment par le biais du transfert de chaleur ( $Q$ ) et du travail ( $W$ ). La première loi de la thermodynamique, qui est également connue sous le nom de loi de conservation de l'énergie, exprime cette relation :

$$\Delta U = Q - W$$

où:  $\Delta U$  est la variation d'énergie interne du système,  
 $Q$  est la chaleur ajoutée au système,  
 $W$  est le travail effectué par le système sur son environnement (ou vice versa).

Si  $\Delta U$  est positif, le système gagne de l'énergie interne,  
si  $\Delta U$  est négatif, le système perd de l'énergie interne.

Les unités de l'énergie interne sont les mêmes que celles de l'énergie, en joules (J) dans le système SI.

L'énergie interne joue un rôle crucial dans l'étude des systèmes thermodynamiques, car elle est liée aux propriétés thermiques du système et à la manière dont il réagit aux changements de température, de pression et d'autres variables. Les variations d'énergie interne sont souvent utilisées pour caractériser les processus thermodynamiques, qu'ils soient isothermes (à température constante), adiabatiques (sans transfert de chaleur), ou d'autres types de processus.

## 5. Thermodynamique

### 5.7. Fonctions d'état: Entropie

**Définition:** En thermodynamique classique, l'entropie est une fonction d'état extensive, c'est-à-dire proportionnelle à la quantité de matière en présence.

L'entropie a été introduite en 1865 par Rudolf Clausius.

Elle est notée  $S$  et elle se mesure en joule par kelvin ( $J.K^{-1}$ ).

C'est toujours une différence d'entropie qui est mesurée,

Dans une **transformation réversible**, comme le quotient de la variation de la quantité de chaleur transférée à

un système par la température absolue de celui-ci :  $dS = \frac{dQ}{T}$

Ludwig Boltzmann a exprimé l'entropie statistique en fonction du nombre  $\Omega$  d'états microscopiques, ou nombre de configurations, définissant l'état d'équilibre d'un système donné au niveau macroscopique : c'est la formule de Boltzmann  $S = k_B \ln \Omega$  avec  $k_B$  constante de Boltzmann égale à  $1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23} J K^{-1}$

La thermodynamique statistique permet ainsi de préciser que l'entropie caractérise le désordre microscopique d'un système, son degré de désorganisation. L'entropie d'un système rend donc compte du degré de dispersion de l'énergie (thermique, chimique, etc.) au sein même du système.

## 5. Thermodynamique

### 5.8. Fonctions d'état: Enthalpie - 1 -

L'enthalpie est une grandeur thermodynamique qui exprime la somme de l'énergie interne d'un système et du produit de sa pression et de son volume.

Elle est souvent utilisée pour analyser les processus thermodynamiques à pression constante, tels que ceux qui se produisent dans des récipients ouverts à l'atmosphère

Elle est en général notée par la lettre H.

L'enthalpie (H) est définie comme :

$$H=U+PV$$

où :

- H enthalpie,
- U énergie interne du système,
- P pression du système,
- V volume du système.

## 5. Thermodynamique

### 5.8. Fonctions d'état: Enthalpie - 2 -

**Explication:** En partant de la première loi de la thermodynamique décrite dans une diapositive ci-après et qui énonce que l'énergie totale d'un système isolé reste constante, soit:

$$\Delta U = Q - W$$

où :  $\Delta U$  est la variation d'énergie interne,  
 $Q$  est la chaleur absorbée par le système,  
 $W$  est le travail effectué par le système.

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

A pression constante  $W = P\Delta V = P(V_B - V_A)$

$$U_B - U_A = Q_p - P(V_B - V_A)$$

$$Q_p = (U_B + PV_B) - (U_A + PV_A)$$

$Q_p$  est la chaleur absorbée ou libérée à pression constante.

**On définit ainsi une nouvelle fonction d'état, la fonction enthalpie  $H(U, P, V)$ :**

$$H = U + PV$$

et  $Q_p = H_B - H_A = \Delta H$

A pression constante, la chaleur mise en jeu, qui n'est pas une fonction d'état, devient égale à la variation de la fonction d'état enthalpie  $H$ . La variation de cette fonction ne dépend que de l'état final et de l'état initial du système et est indépendante du chemin suivi par la transformation.

## 5. Thermodynamique

### 5.9. Processus thermodynamiques - 1 -

Les processus thermodynamiques décrivent les changements d'état d'un système en fonction de variables telles que la température, la pression et le volume. Voici quelques types de processus thermodynamiques courants :

**Processus Isotherme** : Un processus isotherme est un processus au cours duquel la température du système reste constante. Pendant un processus isotherme, l'énergie interne du système peut changer, mais la température demeure inchangée. Pour un gaz idéal, un processus isotherme est représenté par une hyperbole inverse sur un diagramme PV (pression-volume).

**Processus Isochore (ou Isovolume)** : Un processus isochore est un processus au cours duquel le volume du système reste constant. Pendant un processus isochore, le travail effectué par le système est nul car le volume ne change pas. Sur un diagramme PV, un processus isochore est représenté par une ligne verticale.

**Processus Isobare** : Un processus isobare est un processus au cours duquel la pression du système reste constante. Pour un gaz idéal, un processus isobare est souvent représenté par une ligne horizontale sur un diagramme PV.

## 5. Thermodynamique

### 5.9. Processus thermodynamiques - 2 -

**Processus Adiabatique** : Un processus adiabatique est un processus au cours duquel aucun échange de chaleur n'a lieu entre le système et son environnement. Cela signifie que la variation d'énergie interne est uniquement due au travail effectué. Sur un diagramme PV, un processus adiabatique est représenté par une courbe caractéristique.

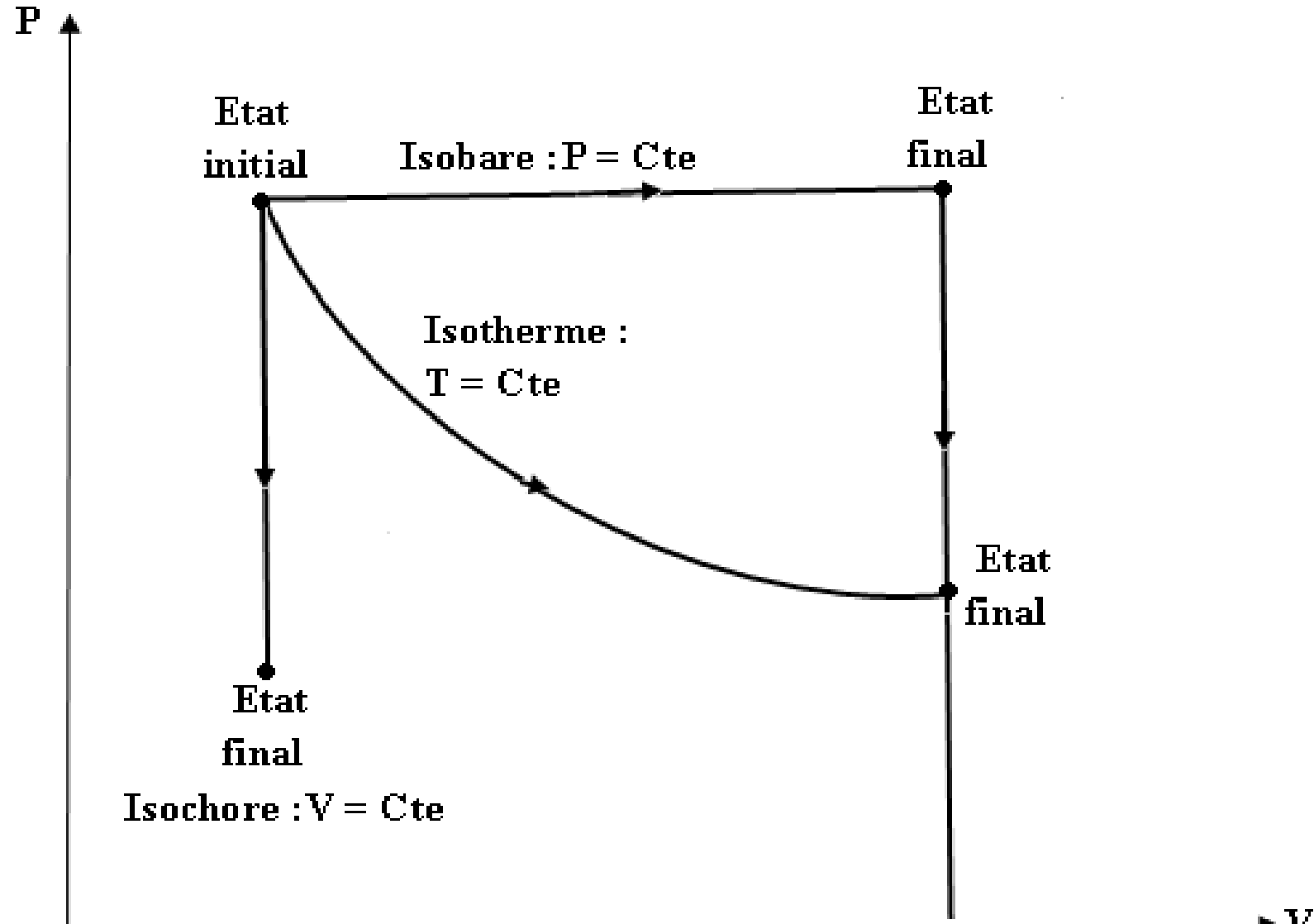
**Les diagrammes de phase** sont des représentations graphiques qui montrent les états d'agrégation de la matière (solide, liquide, gaz) en fonction de la température et de la pression. Ces diagrammes, également appelés diagrammes de phase de Gibbs, illustrent les conditions auxquelles différentes phases coexistent et les transitions de phase.

En résumé, ces différents processus thermodynamiques et les diagrammes de phase sont des outils importants pour comprendre le comportement des systèmes dans diverses conditions et sous l'influence de divers paramètres.

# 5. Thermodynamique

## 5.10. Représentation des processus Diagramme de Clapeyron

Le diagramme de Clapeyron a pour  
axe x le volume  $V$  et pour  
axe y la pression  $P$



## 5. Thermodynamique

### 5.11. Gaz parfait - 1 -

#### Equation d'état des gaz parfaits

Tous les gaz dilués se comportent comme des *gaz parfaits* (modèle selon lequel les particules du gaz sont ponctuelles et n'interagissent pas entre elles).

Ce modèle a été développé du milieu du XVII<sup>ème</sup> siècle au milieu du XVIII<sup>ème</sup> siècle et formalisé au XIX<sup>ème</sup> siècle. Il est fondé sur l'observation expérimentale selon laquelle tous les gaz tendent vers ce comportement à pression suffisamment basse, quelle que soit la nature chimique du gaz, ce qu'exprime la loi d'Avogadro, énoncée en 1811 : la relation entre la pression, le volume et la température est, dans ces conditions, indépendante de la nature du gaz.

*En d'autres mots, à pression et à température donnée, tous les gaz parfaits ont le même volume molaire. Ainsi, dans les conditions normales de température et de pression -- soit une atmosphère et 0 °C --, une mole d'un gaz parfait occupe invariablement 22,4 litres. Dans les conditions dites habituelles de température et de pression -- soit un bar et environ 20 °C --, elle occupe 24 litres.*

Cette propriété s'explique par le fait que lorsque la pression est faible, les molécules de gaz sont suffisamment éloignées les unes des autres pour que l'on puisse négliger les interactions électrostatiques qui dépendent, elles, de la nature du gaz



## 5. Thermodynamique

### 5.11. Gaz parfait - 2 -

#### Equation d'état des gaz parfaits

En 1662, Robert Boyle publia la loi connue sous le nom de “loi de Boyle-Mariotte” : à température constante, la pression d'un gaz est inversement proportionnelle à son volume :  $pV = cte$ .

En 1809, Gay-Lussac 'établît que  $V/T = cte$  à pression constante.

La combinaison de ces deux lois nous donne une première formulation de la loi des gaz parfaits:  $pV/T = cte$ .  
L'ensemble de ces lois a conduit à l'énoncé actuel de la « Loi des gaz parfaits »:

$$PV=nRT$$

avec :

P la pression ;

V le volume ;

n la quantité de matière (nombre de moles) ;

R la constante universelle des gaz parfaits ( $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) ;

T la température absolue.

## 5. Thermodynamique

### 5.12. 1<sup>er</sup> principe (conservation de l'énergie)

La première loi de la thermodynamique, également connue sous le nom de loi de conservation de l'énergie, énonce que l'énergie totale d'un système isolé reste constante. En d'autres termes, l'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre. Cette loi constitue le fondement du concept de conservation de l'énergie.

La première loi de la thermodynamique est souvent exprimée sous la forme de l'équation :

$$\Delta U = Q - W$$

- où:
- $\Delta U$  représente la variation de l'énergie interne du système,
  - $Q$  représente la chaleur échangée par le système avec son environnement,
  - $W$  représente le travail soit effectué par le système sur son environnement ( $W > 0$ )  
soit inversement le travail effectué sur le système par son environnement  $W < 0$

Cette équation indique que la variation de l'énergie interne d'un système est égale à la somme de la chaleur ajoutée au système et du travail effectué par le système sur son environnement. i

- Si:
- $\Delta U$  est positif, le système a gagné de l'énergie
  - $\Delta U$  est négatif, le système a perdu de l'énergie.

La première loi de la thermodynamique s'applique à une variété de systèmes, qu'ils soient gazeux, liquides, solides ou même des systèmes complexes tels que des réactions chimiques.

## 5. Thermodynamique

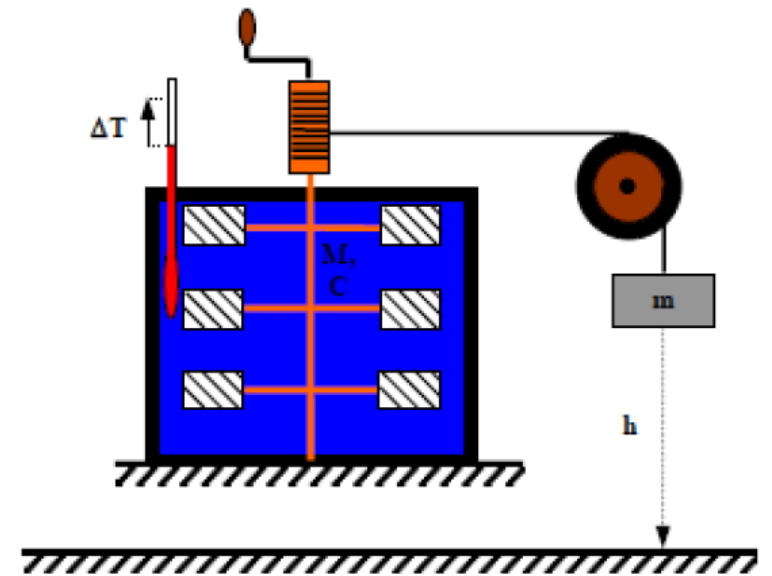
### 5.13. Equivalence chaleur/travail - Expérience de Joule

L'expérience de Joule, réalisée par James Prescott Joule au XIXe siècle, a joué un rôle clé dans l'établissement du lien entre le travail mécanique et la chaleur. Joule a effectué une série d'expériences entre 1843 et 1849 pour étudier la relation entre l'énergie mécanique et la chaleur. L'une des plus connues a été réalisée avec l'aide de son collègue William Thomson (plus tard Lord Kelvin).

L'eau à l'intérieur d'un récipient isolé était brassée à l'aide de palettes fixées à l'intérieur. Ces palettes étaient attachées à un axe central, et un dispositif mécanique par la chute d'une masse faisait tourner ces palettes, effectuant ainsi un travail mécanique sur le système.

En mesurant la température initiale et finale de l'eau, ainsi que la quantité d'eau brassée, Joule a pu déterminer la quantité de chaleur produite par le travail mécanique. Il a constaté une élévation de température de l'eau proportionnelle au travail mécanique effectué.

Les résultats de ces expériences ont conduit à la formulation de la première loi de la thermodynamique, qui exprime la conservation de l'énergie et stipule que l'énergie ne peut ni être créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre. Ainsi, le travail mécanique peut être converti en chaleur, et vice versa, avec une équivalence proportionnelle:  $1\text{kcal} = 4185,6\text{J}$ . L'unité d'énergie, le joule, a été nommée en reconnaissance de James Joule pour ses travaux



## 5. Thermodynamique

### 5.14. 2ème principe

La deuxième loi de la thermodynamique n'est généralement pas formulée sous forme d'une équation mathématique unique, comme c'est le cas avec la première loi de la thermodynamique. Cependant, certaines expressions mathématiques sont utilisées pour décrire les principes fondamentaux de la deuxième loi dans différentes situations. L'une de ces expressions est liée à l'entropie.

L'entropie ( $S$ ) est une mesure du désordre ou du chaos thermodynamique d'un système. La deuxième loi de la thermodynamique peut être formulée en termes d'entropie de la manière suivante :

$$\Delta S \geq \frac{dQ}{T} \quad \text{où : } \Delta S \text{ représente la variation d'entropie du système, } Q \text{ la chaleur échangée avec l'environnement, } T \text{ la température absolue en kelvins.}$$

Cette équation exprime le fait que, **pour un processus réversible**, la variation d'entropie du système ( $\Delta S$ ) est égale à la quantité de chaleur échangée ( $Q$ ) divisée par la température absolue ( $T$ ).

Pour un **processus irréversible**, la variation d'entropie totale du système plus son environnement doit augmenter.

Il est important de noter que l'entropie d'un système augmente naturellement au cours d'un processus irréversible, et cette augmentation d'entropie est associée à une diminution de la disponibilité de l'énergie pour effectuer un travail utile, car au fil des processus réels, la plupart de cette énergie se dissipe sous forme de chaleur dans l'environnement, rendant le processus globalement irréversible.

## 5. Thermodynamique

### 5.15. 3ème principe

Il a été énoncé par Walther Nernst en 1906, puis Max Planck en 1912 .

Il s'énonce maintenant ainsi :

L'entropie d'un système quelconque peut toujours être prise égale à zéro à la température du zéro absolu.

L'entropie s'exprimant toujours sous forme d'une différence, donc à une constante près, le 3ème principe permet de fixer cette constante à zéro pour une température de zéro kelvin.

# 5. Thermodynamique

## 5.16. Cycle de Carnot - 1 -

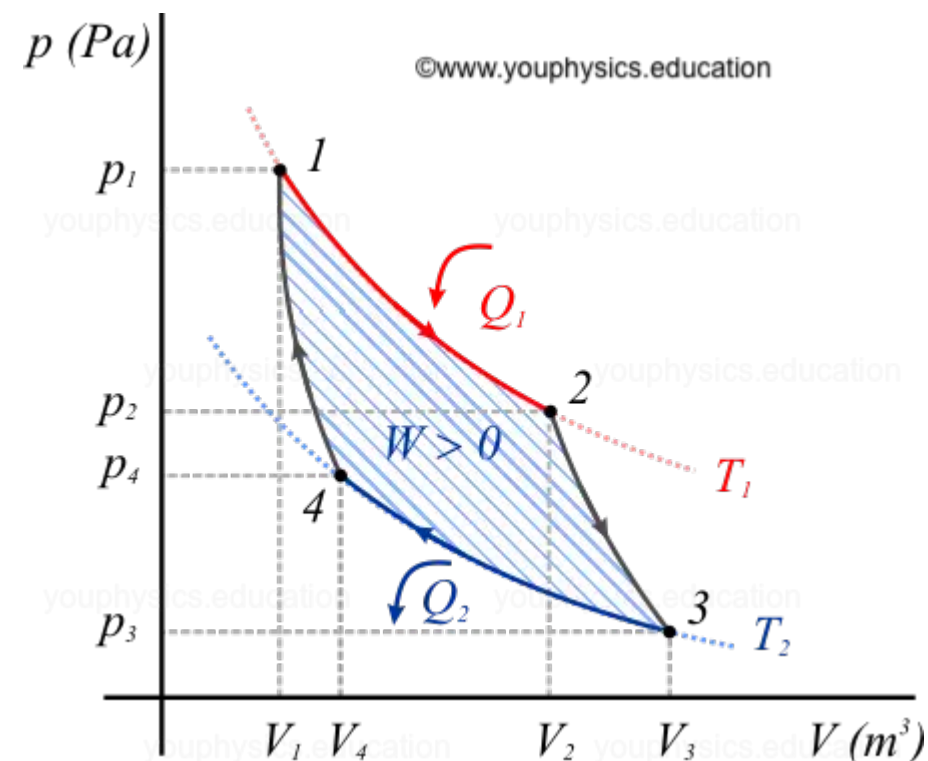
Le cycle de Carnot est un modèle théorique idéalisé pour un moteur thermique réversible fonctionnant entre deux réservoirs thermiques, l'un chaud à une température  $T_H$  (température la plus élevée) et l'autre froid à une température  $T_C$  (température la plus basse). Ce cycle est utilisé pour déterminer le rendement maximal théorique d'un moteur thermique réversible fonctionnant entre ces deux réservoirs.

Le cycle de Carnot comprend quatre processus réversibles idéaux : deux processus adiabatiques (sans échange de chaleur) et deux processus isothermes (à température constante).

Les étapes du cycle de Carnot sont les suivantes :

**1-2 Détente isotherme:** le gaz parfait se dilate à température constante au contact du réservoir thermique chaud qui se trouve à une température  $T_1$ . Durant ce processus, le gaz absorbe une quantité  $Q_1$  de chaleur du réservoir thermique chaud.

**2-3 Détente adiabatique:** le gaz parfait se dilate adiabatiquement, donc sa température baisse jusqu'à la valeur  $T_2$ , qui est celle du réservoir thermique froid.



# 5. Thermodynamique



## 5.16. Cycle de Carnot - 2 -

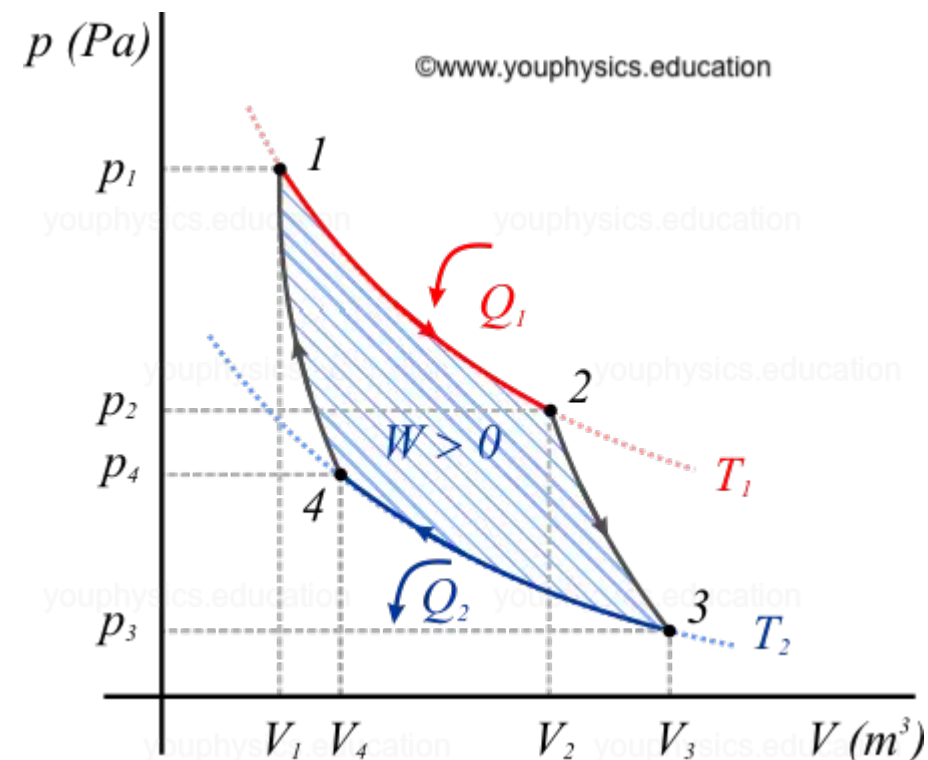
**3-4 Compression isotherme:** le gaz parfait se comprime isothermiquement au contact du réservoir thermique froid. Durant ce processus, le gaz cède une quantité de chaleur  $Q_2$  au réservoir thermique froid.

**4-1 Compression adiabatique:** pour fermer le cycle, le gaz se comprime adiabatiquement jusqu'à ce que sa température soit de nouveau celle du réservoir thermique chaud.

**Le rendement  $\eta$  du cycle de Carnot**, qui mesure l'efficacité du moteur thermique, peut être calculé en utilisant les températures des réservoirs thermiques ( $T_H$  et  $T_C$ ) de la manière suivante :

$$\eta = 1 - T_C / T_H$$

Le rendement du cycle de Carnot est le rendement maximal théorique pour un moteur thermique fonctionnant entre ces deux températures. Il fournit une référence utile pour évaluer les performances réelles des moteurs thermiques et réfrigérateurs. Cependant, il est important de noter que le cycle de Carnot est un modèle idéalisé et que la plupart des moteurs réels ne peuvent pas atteindre ces rendements en raison de diverses irréversibilités et pertes de chaleur.



## 5. Thermodynamique

### 5.17. Rendement thermodynamique

Le rendement thermodynamique est une mesure de l'efficacité d'un système thermodynamique qui effectue une conversion d'énergie, généralement de la chaleur en travail mécanique. Le rendement est défini comme le rapport entre la sortie utile de travail et l'entrée de chaleur.

Pour un moteur thermique, le rendement ( $\eta$ ) est souvent défini par l'équation :

$\eta = \text{Travail utile fourni par le moteur} / \text{Chaleur absorbée par le moteur}$

cela peut être exprimé comme :

$\eta = W/Q_h$  où :  $\eta$  est le rendement,  $W$  le travail utile fourni par le moteur,  $Q_h$  est la chaleur absorbée par le moteur à une température élevée (source chaude).

En réalité, aucun moteur thermique idéal ne peut atteindre un rendement de 100% en raison de limitations imposées par les lois de la thermodynamique, en particulier la deuxième loi de la thermodynamique. Celle-ci stipule que de la chaleur doit être produite lors de la conversion d'énergie, limitant ainsi l'efficacité des moteurs thermiques.

Pour un **cycle réversible de Carnot** (un modèle théorique idéal), le rendement maximal ( $\eta_{Carnot}$ ) peut être calculé en utilisant les températures des sources chaude ( $T_h$ ) et froide ( $T_c$ )

$\eta_{Carnot} = 1 - (T_c/T_h)$  où :  $T_c$  est la température absolue de la source froide en kelvins, et  $T_h$  est la température absolue de la source chaude en kelvins.



# 5. Thermodynamique

## 5.18. Applications - 1 -

La thermodynamique trouve des applications dans de nombreux domaines et est essentielle pour la conception, l'optimisation et le fonctionnement de divers systèmes thermiques. Voici quelques exemples d'applications courantes de la thermodynamique :

**Moteurs Thermiques** : Les moteurs thermiques, tels que les moteurs à combustion interne dans les voitures, les moteurs à turbine dans l'aviation, et les moteurs à vapeur, utilisent la thermodynamique pour convertir l'énergie thermique en travail mécanique. La performance de ces moteurs est analysée en utilisant des cycles thermodynamiques tels que le cycle de Carnot.

**Réfrigération et Climatisation** : Les systèmes de réfrigération et de climatisation exploitent les principes thermodynamiques pour extraire la chaleur d'un espace et la rejeter ailleurs. Les cycles de réfrigération, tels que le cycle de compression de vapeur, sont utilisés pour maintenir des températures basses dans les réfrigérateurs, les climatiseurs et d'autres systèmes.

**Pompes à Chaleur** : Les pompes à chaleur utilisent la thermodynamique pour transférer la chaleur d'une source froide vers une source chaude. Elles sont utilisées pour chauffer des espaces domestiques, des piscines, et peuvent également être employées pour le chauffage de l'eau. Leur fonctionnement est basé sur des cycles thermodynamiques.

## 5. Thermodynamique

### 5.18. Applications - 2 -

**Centrales Électriques** : Les centrales électriques, qu'elles soient alimentées par des combustibles fossiles, nucléaires ou des énergies renouvelables, exploitent la thermodynamique pour convertir l'énergie thermique en électricité. Les cycles thermodynamiques, tels que le cycle de Rankine dans les centrales à vapeur, sont couramment utilisés.

**Échangeurs de Chaleur** : Les échangeurs de chaleur sont utilisés pour transférer la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Ils sont largement utilisés dans divers processus industriels, systèmes de chauffage et de refroidissement, ainsi que dans les systèmes de récupération de chaleur.

**Production de Froid** : Les systèmes de production de froid, tels que les machines frigorifiques, les congélateurs et les systèmes de cryogénie, utilisent les principes thermodynamiques pour extraire la chaleur d'une zone et la transférer vers un environnement extérieur.

**Géothermie** : La géothermie exploite la chaleur stockée dans la Terre pour la production d'électricité et le chauffage. Les principes thermodynamiques sont appliqués pour maximiser l'efficacité de l'extraction de chaleur géothermique.

Ces applications montrent comment la thermodynamique joue un rôle crucial dans une variété de systèmes et de technologies visant à convertir, transporter ou stocker l'énergie thermique.

## 6. Mécanique

### 6.1. Principes fondamentaux de la mécanique - 1 -

La Mécanique est une branche de la physique qui étudie le mouvement des objets, les forces qui agissent sur eux et les relations entre le mouvement, la force et l'énergie. Les principes fondamentaux de la mécanique sont souvent formulés par les lois du mouvement de Newton et les principes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Voici quelques-uns des principes fondamentaux de la mécanique :

#### **Lois du Mouvement de Newton :**

*Première Loi de Newton (Loi de l'inertie) :* Un objet reste au repos ou en mouvement rectiligne uniforme à moins qu'une force nette n'agisse sur lui. Cette loi exprime le concept d'inertie.

*Deuxième Loi de Newton :* La force nette appliquée à un objet est égale à la masse de l'objet multipliée par son accélération ( $F = m.a$ ).

*Troisième Loi de Newton :* Pour chaque action, il existe une réaction égale et opposée. Cela signifie que les forces sont toujours des interactions mutuelles entre deux objets.

**Conservation de l'Énergie :** Le principe de conservation de l'énergie stipule que l'énergie totale d'un système isolé reste constante si aucune force externe ne travaille sur le système. L'énergie peut changer de forme, mais la somme totale de l'énergie mécanique reste constante.

**Conservation de la Quantité de Mouvement :** La quantité de mouvement (ou impulsion) d'un système isolé reste constante si aucune force externe ne travaille sur le système. Mathématiquement, ceci est exprimé comme le produit de la masse et de la vitesse d'un objet ( $p = mv$ ), et la conservation de la quantité de mouvement est également connue sous le nom de troisième loi de Newton.

## 6. Mécanique

### 6.1. Principes fondamentaux de la mécanique - 2 -

**Loi de la Gravitation Universelle** : Énoncée par Isaac Newton, cette loi décrit la force gravitationnelle entre deux objets massifs. La force gravitationnelle est directement proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare.

Deux corps  $A$  et  $B$  de masses respectives  $m_A$  et  $m_B$  et dont les centres de gravité sont séparés par une distance  $d$  exercent l'un sur l'autre des forces attractives de même valeur notées selon la relation :

$$F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{m_A m_B}{d^2}$$

$G$  constante de gravitation universelle =  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

**Principe d'équivalence** : Énoncé par Albert Einstein dans le contexte de la relativité générale, ce principe stipule que les effets de la gravité et de l'accélération sont équivalents. Un observateur dans un champ gravitationnel ressentirait les mêmes effets qu'un observateur accélérant dans l'espace libre.

Ces principes fondamentaux de la mécanique fournissent la base pour comprendre le comportement des objets en mouvement et la manière dont les forces agissent sur eux. Ils sont essentiels pour l'analyse des systèmes mécaniques à différentes échelles, de la mécanique classique à la relativité.

# 6. Mécanique

## 6.2. Energie mécanique - 1 -

L'énergie mécanique d'un système est la somme de son énergie cinétique et de son énergie potentielle associée aux forces qui agissent sur lui. L'énergie mécanique totale ( $E_{\text{méca}}$ ) est une constante pour un système isolé sans force externe non-conservative agissant sur lui.

### 1. Énergie Cinétique ( $E_{\text{cin}}$ ):

L'énergie cinétique d'un objet en mouvement est donnée par la formule :

$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{où : } m \text{ est la masse de l'objet,}$$

$v$  est sa vitesse.

L'énergie cinétique dépend du carré de la vitesse et est toujours positive. Plus la masse de l'objet est grande ou plus sa vitesse est élevée, plus son énergie cinétique est importante.

### 2. Énergie Potentielle Gravitationnelle ( $E_{\text{pot,grav}}$ )

L'énergie potentielle gravitationnelle associée à la position d'un objet par rapport à une surface de référence est donnée par :

$$E_{\text{pot,grav}} = mgh \quad \text{où : } m \text{ est la masse de l'objet,}$$

$g$  est l'accélération due à la gravité,  
 $h$  est la hauteur par rapport à la surface de référence.

L'énergie potentielle gravitationnelle dépend de la masse de l'objet, de l'accélération due à la gravité et de la hauteur à laquelle l'objet est situé.

# 6. Mécanique

## 6.2. Energie mécanique - 2 -

### 3. Énergie Potentielle Élastique ( $E_{\text{pot,élast}}$ ) :

Pour un ressort, l'énergie potentielle élastique associée à la déformation du ressort est donnée par :

$$E_{\text{pot,élast}} = \frac{1}{2} kx^2$$

où :

$k$  est la constante de raideur du ressort,

$x$  est la déformation du ressort par rapport à sa position d'équilibre.

L'énergie potentielle élastique dépend de la constante de raideur du ressort et de la déformation.

**L'énergie mécanique totale d'un système isolé reste constante si aucune force externe non-conservative (comme les frottements) ne travaille sur le système.** L'équation fondamentale de la conservation de l'énergie mécanique est alors :

$$E_{\text{méca}} = E_{\text{cin}} + E_{\text{pot,grav}} + E_{\text{pot,élast}} = \text{Constante}$$

## 6. Mécanique

### 6.3. Notion de force - 1 -

La notion de force est fondamentale en physique et en mécanique.

En termes simples, une force est une interaction qui peut modifier l'état de mouvement ou de repos d'un objet.

**Définition** : Une force est une action capable de changer la vitesse ou la direction d'un objet, ou de déformer un objet. Mathématiquement, une force ( $F$ ) est définie comme le produit de la masse ( $m$ ) de l'objet et de son accélération ( $a$ ), conformément à la deuxième loi de Newton :

$$F=ma$$

#### Caractéristiques :

*Vecteur* : Une force est une grandeur vectorielle, ce qui signifie qu'elle a une magnitude (intensité) et une direction. En notation vectorielle, une force est souvent représentée par une flèche.

*Unité* : L'unité de force dans le système international est le newton (N).

*Point d'Application* : Une force est appliquée à un point particulier d'un objet, appelé le point d'application.

#### Types de Forces :

*Forces de Contact* : Ces forces agissent lorsqu'il y a un contact physique entre deux objets, comme la force de frottement, la force normale, etc.

*Forces à Distance* : Ces forces agissent sans contact physique direct, comme la force gravitationnelle, la force électromagnétique, etc.

## 6. Mécanique

### 6.3. Notion de force - 2 -

#### **Forces Nettes et Forces Équilibrées :**

**Une force nette** résulte de la somme vectorielle de toutes les forces agissant sur un objet. Elle peut entraîner une accélération de l'objet.

**Des forces équilibrées** conduisent à une accélération nulle, car la somme des forces est nulle. L'objet peut être au repos ou en mouvement à vitesse constante.

#### **Forces dans la Nature :**

*Force Gravitationnelle* : L'attraction entre des objets en raison de leur masse.

*Force Électromagnétique* : L'interaction entre charges électriques et aimants.

*Force Nucléaire Forte et Faible* : Forces agissant à l'échelle subatomique, influant sur les particules subatomiques.

La notion de force est essentielle pour comprendre et analyser le mouvement des objets, les interactions fondamentales en physique, et elle constitue la base des lois du mouvement formulées par Isaac Newton.



## 6. Mécanique

### 6.4. Couple - 1 -

Un couple de forces, souvent simplement appelé "couple", est une paire de forces égales, opposées et non colinéaires agissant sur un objet, mais à des points différents de cet objet. Le couple produit un moment (ou torque) qui provoque la rotation de l'objet autour de son axe. Le moment est une mesure de la tendance d'une force à faire tourner un objet autour d'un point ou d'un axe.

#### ***Caractéristiques du couple de forces :***

- 1. Deux Forces Égales et Opposées :** Les deux forces ont la même magnitude, mais des directions opposées. Cela crée un effet de rotation sans provoquer de translation linéaire de l'objet.
- 2. Non Colinéaires :** Les forces ne sont pas alignées le long de la même ligne, mais plutôt situées à des positions différentes sur l'objet. Cela crée un bras de levier (ou bras de moment) entre les deux forces.
- 3. Moment :** Le couple produit un moment, qui est la mesure de la tendance à faire tourner un objet autour d'un axe. Le moment ( $\tau$ ) est donné par la formule :

$$\tau = F \cdot d \quad \text{où : } F \text{ est la force appliquée,}$$

$d$  est la distance entre les lignes d'action des forces.

- 4. Effet de Rotation :** Le couple n'a pas d'effet net sur le mouvement linéaire de l'objet, mais il provoque une rotation autour de l'axe défini par le moment.
- 5. Unité de Mesure :** L'unité de mesure du moment dans le système international est le newton-mètre (Nm).

## 6. Mécanique

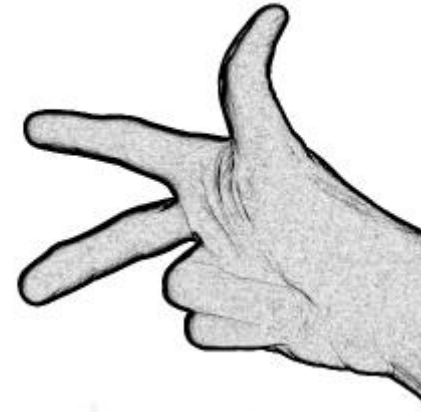
### 6.4. Couple - 2 -

Le couple est une **quantité vectorielle**, et sa direction est donnée par la règle de la main droite .

La règle de la main droite permet de se représenter facilement un repère direct. Le pouce, l'index et le majeur permettent de représenter les trois vecteurs de la base appelée couramment  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ . Les trois doigts forment alors un trièdre dans l'espace.

Par définition, . On peut donc choisir, par exemple,

- Pouce =  $\vec{z}$
- Index =  $\vec{y}$
- Majeur =  $\vec{x}$



Comme c'est un produit vectoriel, toute permutation directe des vecteurs laisse l'égalité inchangée. Ainsi, si l'on veut un  $\vec{z}$  associé à une direction verticale ascendante représentée par le pouce, l'index représentera  $\vec{x}$  et le majeur  $\vec{y}$  .

Les couples sont couramment rencontrés dans divers contextes, comme la mécanique, l'ingénierie et la physique. Ils sont utilisés pour générer ou contrôler des mouvements de rotation, comme dans le cas des moteurs, des roues, des engrenages, et d'autres mécanismes de transmission.

## 6. Mécanique

### 6.5. Extension de la deuxième loi de Newton

Lorsqu'un solide est en **translation**, la somme des forces extérieures auxquelles il est soumis est égale au produit de sa **masse** et de son **accélération**.

Lorsqu'un solide est en **rotation**, la somme des couples auxquelles il est soumis est égale au produit de son **moment d'inertie** et de son **accélération angulaire**.

Le moment d'inertie est une grandeur qui caractérise la manière dont la matière est répartie dans un solide, par rapport à un certain axe.

# 6. Mécanique des solides

## 6.6. Quantité de mouvement

**Définition:** La quantité de mouvement ( $p$ ) d'un objet est le produit de sa masse ( $m$ ) par sa vitesse ( $v$ ) :

$$p=m \cdot v$$

**La conservation de la quantité de mouvement**, également connue sous le nom de principe de conservation de l'impulsion, est un principe fondamental qui stipule que la quantité totale de mouvement dans un système isolé reste constante si aucune force extérieure nette n'agit sur le système. C'est une conséquence directe de la troisième loi de Newton, qui énonce que pour chaque action, il y a une réaction égale et opposée.

La conservation de la quantité de mouvement peut être exprimée comme suit :

**Quantité de Mouvement Initiale du Système = Quantité de Mouvement Finale du Système**

Lorsqu'une force nette agit sur un système, elle peut changer la quantité de mouvement de chaque objet individuel dans le système, mais la somme totale de la quantité de mouvement de tous les objets reste constante. Cette conservation de la quantité de mouvement est souvent utilisée pour analyser les collisions et les interactions entre objets.

Un exemple simple illustrant la conservation de la quantité de mouvement est celui d'une collision entre deux objets. Avant la collision, chaque objet a une certaine quantité de mouvement. Pendant la collision, ils peuvent interagir entre eux, mais la somme totale de leurs quantités de mouvement reste constante. Après la collision, la quantité de mouvement totale du système reste inchangée, à condition qu'aucune force extérieure nette ne soit présente.

## 6. Mécanique des solides

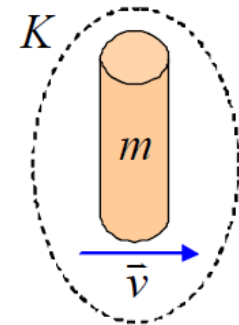
### 6.7. Energie cinétique de translation

L'énergie cinétique est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. L'énergie cinétique d'un corps est égale au travail nécessaire pour faire passer le dit corps du repos à son mouvement. On peut déduire de cela, dans le cadre de la physique newtonienne, qu'une variation d'énergie cinétique d'un corps pendant une certaine durée est égale au travail des forces externes exercées sur ce corps. C'est le théorème de l'énergie cinétique.

L'énergie cinétique  $K$  est par définition l'énergie associée au mouvement d'un corps. Lorsque celui-ci effectue une translation, l'énergie cinétique dépend de l'inertie de translation qui est la masse  $m$  et du module de la vitesse  $v$  au carré :

$$K = \frac{1}{2} mv^2$$

- où
- $K$  : Énergie cinétique de translation (J)
  - $m$  : Masse de l'objet (inertie de translation) (kg)
  - $v$  : Vitesse de l'objet (m/s)



# 6. Mécanique des solides

## 6.8. Energie cinétique de rotation - 1 -

Considérons un corps rigide de masse total  $m$  constitué de  $n$  éléments de masse  $m_i$  effectuant une rotation autour d'un axe de rotation à une vitesse angulaire  $\omega$ .

La vitesse radiale  $v_{ir}$  des masses  $m_i$  étant nulle ( $v_{ir} = 0$ ), l'énergie cinétique de l'ensemble des masses  $m_i$  est égale à:

$$K = \frac{1}{2} m_1(v_{1T})^2 + \frac{1}{2} m_2(v_{2T})^2 + \frac{1}{2} m_3(v_{3T})^2 + \dots + \frac{1}{2} m_i(v_{iT})^2 + \dots + \frac{1}{2} m_n(v_{nT})^2$$

où  $K$  : Énergie cinétique de rotation (J)

$m$  : Masse de l'objet (inertie de translation) (kg)

$v_{iT}$  : Vitesse tangentielle de la masse  $m_i$  (m/s)

Comme  $v_{iT} = \omega_i \cdot r_i$

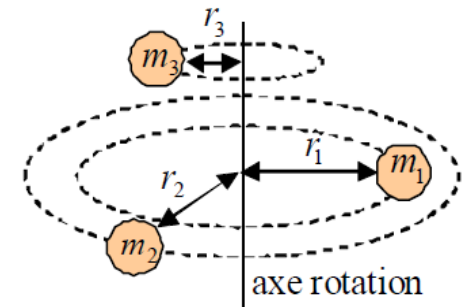
$\omega$  est identique pour tous les points du solide en rotation

$$K = \frac{1}{2} \sum_1^n m_i r_i^2 \omega_i^2$$

$\omega_i = \omega$  (la vitesse angulaire est commune à tous les points du solide en rotation):

$$K = \frac{1}{2} \sum_1^n m_i r_i^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \sum_1^n m_i r_i^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \sum_1^n I_i$$

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2 \text{ avec } I = \sum_1^n I_i$$



## 6. Mécanique des solides

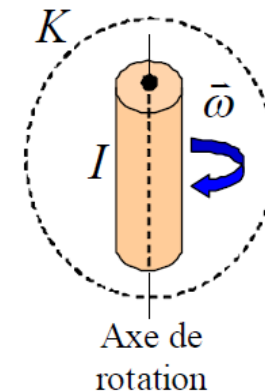
### 6.8. Energie cinétique de rotation -2 -

Lorsqu'un corps effectue une rotation à vitesse  $\omega$  autour d'un axe, le corps est en mouvement et possède une énergie cinétique. Puisque l'ensemble du corps se déplace avec une vitesse angulaire commune  $\omega$ , on peut définir une énergie à partir de cette vitesse. L'inertie de rotation  $I$  pour cette expression d'énergie n'est pas uniquement la masse  $m$  car l'énergie possède comme unité le joule (  $J = N.m = kg.m^2 / s^2$  ).

Afin de préserver la forme de l'expression de l'énergie cinétique, voici l'expression de l'énergie cinétique en rotation qui respecte l'unité du joule :

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2$$

- où
- $K$  : Énergie cinétique de l'objet en rotation (J)
  - $I$  : Inertie de l'objet en rotation autour d'un axe (  $kg.m^2$  )
  - $\omega$  : Vitesse angulaire (rad/s)





# 6. Mécanique des solides

## 6.9. Quelques moments d'inertie

Géométrie	Situation	Schéma	Moment d'inertie
<b>Cylindre</b>	Cylindre creux de rayon $R$ tournant autour de son axe de symétrie		$I = MR^2$
	Cylindre plein de rayon $R$ tournant autour de son axe de symétrie		$I = \frac{1}{2}MR^2$
<b>Sphère</b>	Coquille sphérique mince de rayon $R$ tournant autour de son centre		$I = \frac{2}{3}MR^2$
	Sphère pleine de rayon $R$ tournant autour de son centre		$I = \frac{2}{5}MR^2$
<b>Tige</b>	Tige mince de longueur $L$ tournant autour d'un axe perpendiculaire à elle-même passant par son centre		$I = \frac{1}{12}ML^2$
	Tige mince de longueur $L$ tournant autour d'un axe perpendiculaire à elle-même passant par une extrémité		$I = \frac{1}{3}ML^2$



## 6.10. Exemple: choc élastique entre deux boules de billard - 1 -

Un choc élastique entre deux boules de billard est un type de collision où l'énergie cinétique totale du système est conservée. Cela signifie que la somme des énergies cinétiques initiales des boules est égale à la somme des énergies cinétiques finales après la collision.

Les caractéristiques d'un choc élastique incluent :

- 1. Conservation de l'Énergie Cinétique :** L'énergie cinétique totale du système reste constante avant et après la collision. Aucune énergie n'est perdue sous forme de chaleur ou de déformation permanente des boules.
- 2. Conservation de la Quantité de Mouvement :** La quantité de mouvement totale du système est conservée avant et après la collision. La somme vectorielle des quantités de mouvement initiales est égale à la somme vectorielle des quantités de mouvement finales.
- 3. Rebondissement :** Les boules se séparent après la collision et continuent à se déplacer avec des vitesses différentes. La direction et la magnitude des vitesses finales dépendent des masses et des vitesses initiales des boules.

### 6.10. Exemple: choc élastique entre deux boules de billard - 2 -

Pour une collision bidimensionnelle entre deux objets (comme des boules de billard), la conservation de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement peut être formulée en utilisant les composantes vectorielles de la quantité de mouvement.

Par exemple, pour deux boules de billard  $A$  et  $B$  avec des masses  $m_A$  et  $m_B$  et des vitesses initiales  $v_{A1}$  et  $v_{B1}$  dans une direction, les vitesses finales  $v_{A2}$  et  $v_{B2}$  après la collision peuvent être calculées à l'aide des équations de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement pour la composante  $x$  est :

$$m_A \cdot v_{A1x} + m_B \cdot v_{B1x} = m_A \cdot v_{A2x} + m_B \cdot v_{B2x}$$

L'équation de conservation de l'énergie cinétique est :

$$\frac{1}{2} m_A \cdot (v_{A1})^2 + \frac{1}{2} m_B \cdot (v_{B1})^2 = \frac{1}{2} m_A \cdot (v_{A2})^2 + \frac{1}{2} m_B \cdot (v_{B2})^2$$

Ces équations peuvent être résolues pour déterminer les vitesses finales après la collision. Notez que ces équations sont généralement adaptées à des conditions idéalisées et peuvent nécessiter des ajustements pour prendre en compte des facteurs tels que la friction, la déformation des boules, etc., dans des situations réelles.

## 6. Mécanique

### 6.11. Force centrifuge – force centripète

La force centrifuge et la force centripète sont deux concepts liés au mouvement circulaire et sont souvent évoqués dans le cadre de la dynamique.

#### **Force Centrifuge :**

La force centrifuge est la force apparente ou fictive qui semble agir sur un objet en mouvement circulaire loin du centre de rotation. Elle n'est pas une force réelle exercée par un objet, mais plutôt une conséquence de la perspective d'un observateur dans un référentiel en rotation.

Lorsqu'un objet se déplace en cercle, la force centrifuge semble "pousser" l'objet vers l'extérieur, loin de l'axe de rotation. Cette force est proportionnelle à la masse de l'objet, à sa vitesse angulaire et à la distance entre l'objet et l'axe de rotation.

La formule pour la force centrifuge ( $F_{\text{centrifuge}}$ ) est donnée par :

$$F_{\text{centrifuge}} = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad \text{où : } m \text{ est la masse de l'objet,}$$

$r$  est la distance entre l'objet et l'axe de rotation,  
 $\omega$  est la vitesse angulaire.

Comme:  $\omega = \frac{v}{r}$

la relation peut s'écrire également :  $F_{\text{centrifuge}} = \frac{mv^2}{r}$

## 6. Mécanique

### 6.11. Force centrifuge – force centripète

#### Force Centripète :

La force centripète est la force réelle qui agit sur un objet en mouvement circulaire et qui le maintient sur sa trajectoire circulaire. Elle est dirigée vers le centre de rotation.

La force centripète peut être fournie par différentes interactions, telles que la gravité, la tension d'une corde, la force électromagnétique, etc. Son rôle est de fournir l'accélération nécessaire pour maintenir l'objet en mouvement circulaire.

La formule pour la force centripète ( $F_{\text{centripète}}$ ) est donnée par :

$$F_{\text{centripète}} = - F_{\text{centrifuge}} = - m \cdot r \cdot \omega^2 = - \frac{mv^2}{r}$$

En résumé, la force centripète est la force réelle responsable du maintien d'un objet en mouvement circulaire, tandis que la force centrifuge est une force apparente résultant de l'inertie de l'objet vue depuis un référentiel en rotation. Ces deux forces sont liées par la troisième loi de Newton, qui stipule qu'il y a une action et une réaction égales et opposées entre les forces centripètes et centrifuges.

## 6. Mécanique des solides

### 6.12. Equations de base de la mécanique des solides - 1 -

La mécanique des solides, également appelée mécanique des matériaux, étudie le comportement des matériaux solides sous l'influence des charges externes, en se concentrant sur des aspects tels que la déformation, la contrainte et la rupture. Les équations de base de la mécanique des solides dépendent du type de solide (élastique, plastique, viscoélastique, etc.) et du régime de déformation auquel il est soumis. Voici quelques-unes des équations de base associées à la mécanique des solides élastiques :

#### 1. Loi de Hooke (Comportement Élastique) :

$$\sigma = E\varepsilon$$

où  $\sigma$  : Contrainte (force par unité de surface)

$E$  : Module d'élasticité (constante de proportionnalité)

$\varepsilon$  : Déformation (changement de longueur par unité de longueur)

#### 2. Loi de Hook généralisée (Contrainte et Déformation Tensorielles) :

$$\sigma = C\varepsilon$$

$\sigma$  : Tenseur des contraintes

$C$  : Tenseur de rigidité (matrice des coefficients élastiques)

$\varepsilon$  : Tenseur des déformations

## 6. Mécanique des solides

### 6.12. Equations de base de la mécanique des solides - 2 -

#### 4. Loi de Poisson (Relation entre les Déformations Axiales et Transversales) :

$$\varepsilon_y = -\mu \varepsilon_x$$

où  $\varepsilon_x$  : Déformation axiale

$\varepsilon_y$  : Déformation transversale

$\mu$  : Coefficient de Poisson

#### 5. Équation de Conservation de la Masse (Déformations Volumiques):

$$\varepsilon_v = -\varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z$$

où  $\varepsilon_v$  : Déformation volumique

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  : Déformations principales selon les axes

Ces équations sont quelques-unes des bases de la mécanique des solides élastiques, et elles permettent de caractériser le comportement des matériaux sous diverses conditions de charge et de déformation. Il est important de noter que ces équations peuvent être étendues ou modifiées pour prendre en compte des comportements plus complexes ou des matériaux non linéaires.

## 6. Mécanique

### 6.13. Hydrostatique

#### 6.13.1 Loi fondamentale de l'hydrostatique

La loi fondamentale de l'hydrostatique, également connue sous le nom de loi fondamentale de la statique des fluides, est une expression des principes qui régissent l'équilibre des fluides au repos. Cette loi a été énoncée par le mathématicien et physicien français Blaise Pascal et le mathématicien et physicien italien Evangelista Torricelli au XVIIe siècle.

La loi fondamentale de l'hydrostatique peut être énoncée comme suit :

**"Dans un fluide au repos, la pression est la même à une profondeur donnée, quelle que soit l'orientation ou la forme du contenant. La pression augmente avec la profondeur et dépend uniquement de la densité du fluide et de l'accélération due à la gravité."**

En d'autres termes, la pression dans un fluide au repos dépend uniquement de la profondeur à laquelle on se trouve et des caractéristiques du fluide, indépendamment de la forme du contenant ou de l'orientation du fluide. La variation de la pression ( $\Delta P$ ) avec la profondeur ( $h$ ) dans un fluide homogène et incompressible peut être exprimée à l'aide de l'équation :

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot h \quad \text{où : } \Delta P \text{ est la variation de pression,}$$

$\rho$  est la densité du fluide,  
 $g$  est l'accélération due à la gravité,  
 $h$  est la profondeur.

## 6. Mécanique

### 6.13. Hydrostatique

#### 6.13.2 Principe d'Archimède

Le principe d'Archimède, formulé par le mathématicien et physicien grec Archimède au III<sup>e</sup> siècle av. J.-C., est un principe fondamental de la physique qui décrit le comportement des objets immergés dans un fluide (liquide ou gaz). Ce principe est souvent utilisé pour expliquer la flottabilité des objets dans l'eau, mais il s'applique à tout fluide.

Le principe d'Archimède peut être énoncé comme suit :

**"Tout corps plongé dans un fluide, entièrement mouillé par celui-ci ou immergé, subit une force verticale dirigée de bas en haut, égale au poids du volume du fluide déplacé par le corps."**

Plus simplement, lorsque un objet est plongé dans un fluide, il subit une force de flottabilité dirigée vers le haut, égale au poids du volume du fluide déplacé par l'objet, conformément à la densité du fluide.

La force de flottabilité ( $F_b$ ) peut être exprimée comme suit :

$$F_b = \rho_{\text{fluide}} \cdot V_{\text{immergé}} \cdot g$$

où :  $\rho_{\text{fluide}}$  est la densité du fluide,  
 $V_{\text{immergé}}$  est le volume du fluide déplacé par l'objet immergé,  
 $g$  est l'accélération de la pesanteur

Si la force de flottabilité ( $F_b$ ) est supérieure au poids de l'objet ( $P$ ), l'objet flottera. Si elle est égale au poids, l'objet restera en équilibre, et si elle est inférieure au poids, l'objet coulera.



## 6. Mécanique

### 6.13. Hydrostatique

#### 6.13.3 Principe de Pascal

Le principe de Pascal, formulé par le mathématicien et physicien français Blaise Pascal au XVII<sup>e</sup> siècle, est un principe fondamental de la mécanique des fluides. Cette loi décrit le comportement des fluides incompressibles (liquides ou gaz) soumis à une pression. Il peut être énoncé comme suit :

**"Dans un fluide incompressible en équilibre, une variation de pression exercée en un point du fluide est transmise intégralement et de manière isotrope à tous les points du fluide et aux parois du contenant."**

Plus simplement, cela signifie que toute augmentation ou diminution de la pression appliquée à un point dans un fluide incompressible se propage à l'ensemble du fluide, y compris aux parois du contenant, sans diminution de l'intensité. Cela s'applique également aux fluides confinés dans un système fermé.

Le principe de Pascal peut être exprimé par l'équation suivante :

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \rho g h_2 \quad \text{où : } P_1 \text{ et } P_2 \text{ sont les pressions en deux points différents du fluide,}$$

$\rho$  est la densité du fluide,

$g$  est l'accélération de la pesanteur

$h_1$  et  $h_2$  sont les hauteurs des deux points par rapport à une référence commune.

La loi de Pascal est fondamentale pour comprendre le comportement des fluides dans divers systèmes hydrauliques et a des applications pratiques dans l'ingénierie, notamment dans la conception des systèmes hydrauliques, des freins hydrauliques, des vérins, des presses,...

## 6. Mécanique

### 6.14. Dynamique des fluides

#### 6.14.1 Principes généraux de la dynamique des fluides

La mécanique des fluides est une branche de la physique qui étudie le comportement des fluides (liquides et gaz) et les forces qui agissent sur eux. Elle englobe un large éventail de phénomènes, allant des écoulements simples à des problèmes plus complexes impliquant des turbulences, des interactions thermiques, et des réactions chimiques. Voici quelques notions de base de la mécanique des fluides :

**1.Fluide** : Un fluide est une substance qui peut s'écouler et prendre la forme du récipient qui le contient. Les liquides et les gaz sont des exemples de fluides.

**2.Propriétés des Fluides** : Les principales propriétés des fluides comprennent la densité (masse par unité de volume), la viscosité (résistance à l'écoulement), la pression, la température et la vitesse.

**3.Écoulement** : L'écoulement est le mouvement d'un fluide. Il peut être laminaire (régulier et ordonné) ou turbulent (chaotique et irrégulier).

**4.Équations de la Continuité** : Les équations de la continuité expriment la conservation de la masse dans un écoulement. Elles établissent la relation entre la section transversale d'un conduit et la vitesse du fluide.

**5.Équation de Bernoulli** : L'équation de Bernoulli décrit le comportement de l'écoulement le long d'une ligne de courant et relie la pression, la densité, la vitesse et la hauteur d'un fluide.

**6.Nombre de Reynolds** : Le nombre de Reynolds ( $Re$ ) est un paramètre sans dimension qui caractérise le régime d'écoulement d'un fluide (laminaire ou turbulent) en fonction de la vitesse, de la densité et de la

viscosité du fluide

## 6. Mécanique

### 6.14. Dynamique des fluides

#### 6.14.2 Écoulement incompressible

L'écoulement incompressible et l'écoulement compressible sont deux concepts importants en mécanique des fluides qui décrivent le comportement des fluides sous différentes conditions. Ces termes sont utilisés pour caractériser la compressibilité d'un fluide, c'est-à-dire la capacité du fluide à changer de volume en réponse à une variation de pression.

- 1. Définition :** Un écoulement est considéré comme incompressible si la densité du fluide ne varie pas de manière significative pendant le mouvement du fluide.
- 2. Conditions :** Dans un écoulement incompressible, la variation de pression n'entraîne qu'une variation négligeable de la densité. Les liquides sont généralement considérés comme incompressibles, sauf dans des conditions extrêmes. Les gaz peuvent également être traités comme incompressibles dans certaines situations où les variations de pression sont modestes et la densité reste relativement constante.
- 3. Équation de Continuité :** Pour un écoulement incompressible, l'équation de continuité  $S_1 v_1 = S_2 v_2$  s'applique, indiquant que le produit de la section transversale du conduit par la vitesse du fluide reste constant le long d'une ligne de courant.

## 6. Mécanique

### 6.14. Dynamique des fluides

#### 6.14.3 Ecoulement compressible

- 1. Définition :** Un écoulement est considéré comme compressible lorsque la densité du fluide varie de manière significative en réponse à des variations de pression et de température.
- 2. Conditions :** Les gaz, en particulier à des pressions et des températures élevées, peuvent présenter un comportement compressible important. Dans ces cas, la densité du gaz change significativement avec la pression et la température.
- 3. Équation de Continuité :** Pour un écoulement compressible, l'équation de continuité doit tenir compte de la variation de densité le long de la ligne de courant. L'équation générale de la continuité  $\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$  est utilisée, où  $\rho$  représente la densité.

En résumé, l'écoulement incompressible est souvent une approximation valable pour les liquides et les gaz à des conditions modérées, tandis que l'écoulement compressible doit être pris en compte pour des situations où les variations de densité sont importantes, comme à des vitesses élevées ou à des altitudes élevées. Les modèles mathématiques utilisés pour décrire ces deux types d'écoulements diffèrent en fonction de la compressibilité du fluide.

## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.4 Equations des fluides incompressibles - 1 -

Pour les fluides incompressibles, l'équation d'état est simplifiée car la densité du fluide est considérée comme constante. Cela simplifie considérablement les équations de base utilisées en mécanique des fluides. Voici quelques-unes des équations fondamentales pour les fluides incompressibles :

##### 1.Équation de continuité :

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Cette équation exprime la conservation de la masse le long d'une ligne de courant. Elle indique que le produit de la section transversale du conduit ( $S$ ) par la vitesse du fluide ( $v$ ) reste constant le long du conduit.

##### 2.Équation de conservation de la quantité de mouvement (momentum) :

$$\rho v_1 S_1 - \rho v_2 S_2 = P_1 S_1 - P_2 S_2 + \rho g (h_1 - h_2)$$

Cette équation exprime la conservation de la quantité de mouvement pour un fluide incompressible en écoulement. Elle tient compte de la pression ( $P$ ), de la densité ( $\rho$ ), de la gravité ( $g$ ), et de la hauteur ( $h$ ).

##### 3.Équation de Bernoulli :

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{constante} \quad \text{où: } P \text{ est la pression du fluide, } \rho \text{ la densité du fluide, } v \text{ la vitesse du fluide,}$$

$g$  l'accélération de la pesanteur,  $h$  la hauteur au-dessus d'un point de référence.

L'équation de Bernoulli exprime la conservation de l'énergie le long d'une ligne de courant pour un fluide incompressible en écoulement.

## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.4 Equations des fluides incompressibles - 2 -

##### 4. Équation de conservation de la masse :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Cette équation, également appelée équation de continuité en forme différentielle, exprime la conservation de la masse pour un fluide incompressible. Elle indique que la divergence de la vitesse du fluide ( $\mathbf{u}$ ) est égale à zéro.

##### 5. Équation de conservation de l'énergie interne :

$$\frac{du}{dt} + p \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = 0$$

Cette équation exprime la conservation de l'énergie interne d'un fluide incompressible en mouvement. Ces équations sont basées sur des hypothèses spécifiques, notamment l'incompressibilité du fluide. Elles sont souvent utilisées pour modéliser et comprendre le comportement des fluides incompressibles dans différentes applications où la variation de densité due à la pression est négligeable.

## 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

### 6.14.5 Equation de Bernoulli

L'équation de Bernoulli est une équation fondamentale en mécanique des fluides qui décrit la conservation de l'énergie le long d'une ligne de courant d'un fluide idéalisé, incompressible et non visqueux. Elle porte le nom du physicien suisse Daniel Bernoulli, qui a formulé cette équation au XVIIIe siècle.

L'équation de Bernoulli est généralement exprimée sous la forme suivante :

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad \text{où: } P \text{ est la pression du fluide, } \rho \text{ la densité du fluide, } v \text{ la vitesse du fluide, } g \text{ l'accélération de la pesanteur, } h \text{ la hauteur au-dessus d'un point de référence.}$$

Chaque terme de l'équation représente une forme d'énergie par unité de volume, et la somme de ces termes reste constante le long d'une ligne de courant. Les trois termes sont :

**1.Énergie de Pression ( $P$ ) :** représente l'énergie associée à la pression du fluide. Lorsque la pression diminue le long d'une ligne de courant, l'énergie de pression diminue.

**2.Énergie Cinétique ( $\frac{1}{2} \rho v^2$ ) :** Représente l'énergie cinétique du fluide en mouvement. Lorsque la vitesse augmente, l'énergie cinétique augmente.

**3.Énergie Potentielle Gravitationnelle ( $\rho gh$ ) :** Représente l'énergie potentielle due à la position du fluide dans un champ gravitationnel. Lorsque la hauteur augmente, l'énergie potentielle augmente.

**A noter:** l'équation de Bernoulli est une **simplification** qui s'applique à des conditions spécifiques, et elle peut ne pas être applicable dans toutes les situations, notamment lorsque des phénomènes tels que la viscosité, la turbulence ou la compressibilité sont importants.

## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.6 Equations des fluides compressibles - 1 -

Pour décrire le comportement des fluides compressibles, notamment des gaz, on utilise des équations spécifiques qui tiennent compte de la variation de densité avec la pression et la température. Les équations de base pour les fluides compressibles incluent l'équation d'état, l'équation de continuité, et les équations de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie. Voici quelques-unes de ces équations :

##### 1. Équation d'état idéale pour un gaz :

$$PV=nRT$$

Cette équation d'état relie la pression ( $P$ ), le volume ( $V$ ), la quantité de matière ( $n$ ), la constante spécifique des gaz parfaits ( $R$ ), et la température absolue ( $T$ ). Elle est souvent utilisée pour décrire le comportement des gaz idéaux, mais elle nécessite des ajustements pour les gaz réels.

##### 2. Équation de continuité pour un écoulement compressible :

$$\rho Sv=\text{constante}$$

Cette équation de continuité exprime la conservation de la masse le long d'une ligne de courant. Elle tient compte de la variation de densité ( $\rho$ ) avec la vitesse ( $v$ ) et la section transversale ( $S$ ).



# 6. Mécanique

## 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

### 6.14.6 Equations des fluides compressibles - 2 -

#### 3. Équations de conservation de la quantité de mouvement (momentum) :

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx}$$

Cette équation de conservation de la quantité de mouvement décrit l'accélération locale ( $\frac{dv}{dt}$ ) d'un élément de fluide en fonction de la variation de pression locale ( $\frac{dp}{dx}$ ) et de la densité ( $\rho$ ).

#### 4. Équation de conservation de l'énergie (équation de Bernoulli généralisée) :

$$\frac{dv}{dt} + u \frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + g \sin \theta = 0$$

Cette équation intègre les termes d'accélération, de convection, de variation de pression, et de force gravitationnelle dans la conservation de l'énergie pour un écoulement compressible

#### 5. Équation de conservation de l'énergie interne

$$\frac{dv}{dt} + \rho \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = 0$$

Cette équation exprime la conservation de l'énergie interne d'un fluide compressible.

Ces équations sont des versions adaptées pour les fluides compressibles des équations utilisées pour les fluides incompressibles. Elles sont basées sur des hypothèses spécifiques concernant le comportement du fluide, et des modèles plus complexes peuvent être nécessaires pour prendre en compte des phénomènes tels que la compressibilité réelle des gaz ou la présence de chocs dans l'écoulement.



## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.7 Application: effet Venturi

L'effet Venturi est un phénomène en mécanique des fluides qui se produit lorsqu'un fluide, tel qu'un gaz ou un liquide, passe à travers une section d'écoulement rétrécie, suivie d'une section élargie. Cette configuration particulière conduit à une diminution de la pression dans la section rétrécie, créant ainsi une zone de basse pression. L'effet Venturi tire son nom de Giovanni Battista Venturi, un physicien italien du XVIII<sup>e</sup> siècle qui a étudié ces phénomènes.

Voici comment fonctionne l'effet Venturi :

**1. Constriction de la Section :** Lorsqu'un fluide s'écoule à travers une section rétrécie (constriction), la vitesse de l'écoulement augmente en raison de la conservation de la masse (loi de continuité).

**2. Diminution de la Pression :** Selon l'équation de Bernoulli, qui décrit la conservation de l'énergie dans un écoulement de fluide, une augmentation de la vitesse de l'écoulement est associée à une diminution de la pression. Ainsi, dans la section rétrécie, la pression diminue.

**3. Élargissement de la Section :** En passant à travers la section élargie après la constriction, la vitesse de l'écoulement diminue, ce qui entraîne une augmentation de la pression.

L'effet Venturi a plusieurs applications pratiques :

• **Carburateurs :** Les carburateurs utilisent l'effet Venturi pour mélanger l'air avec le carburant dans les moteurs à combustion interne. L'aspiration de l'air à travers une section rétrécie crée une basse pression, aspirant le

## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.8 Fluide visqueux et fluide non visqueux - 1 -

Les termes "fluide visqueux" et "fluide non visqueux" font référence aux propriétés visqueuses d'un fluide, c'est-à-dire à sa capacité à s'écouler de manière visqueuse ou à présenter une résistance à l'écoulement. La viscosité est une mesure de cette résistance au glissement interne d'un fluide lorsqu'il est soumis à une contrainte de cisaillement. Voici la distinction entre les fluides visqueux et non visqueux :

##### 1. Fluide visqueux :

- Définition :** Un fluide visqueux est caractérisé par une viscosité significative. La viscosité mesure la résistance interne d'un fluide aux déformations et aux cisaillements. Les liquides tels que l'huile, le miel ou le sirop ont une viscosité relativement élevée et sont considérés comme visqueux.
- Comportement :** Les fluides visqueux s'écoulent plus lentement et peuvent présenter des caractéristiques de glissement ou d'adhérence entre les couches adjacentes du fluide. L'écoulement visqueux peut donner lieu à des phénomènes tels que le laminage et la formation de tourbillons.
- Exemple :** L'huile moteur est un exemple de fluide visqueux couramment rencontré.

## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.8 Fluide visqueux et fluide non visqueux - 2 -

##### **Fluide non visqueux (ou fluide idéal) :**

- 1. Définition :** Un fluide non visqueux, ou fluide idéal, est un fluide qui ne présente aucune viscosité. Dans ce cas, il n'y a aucune résistance interne significative au déplacement des couches de fluide les unes par rapport aux autres.
- 2. Comportement :** Les fluides non visqueux s'écoulent sans résistance interne et ne présentent pas de déformations internes lorsqu'ils s'écoulent. Ils sont souvent modélisés de manière idéale pour simplifier les calculs en mécanique des fluides.
- 3. Exemple :** L'eau à des températures modérées est souvent considérée comme un fluide non visqueux dans de nombreuses situations.

Il est important de noter que la distinction entre fluide visqueux et fluide non visqueux est souvent idéalisée. En réalité, de nombreux fluides présentent des propriétés intermédiaires de viscosité, et le comportement visqueux ou non visqueux dépend souvent des conditions spécifiques, de la température, de la pression, et d'autres facteurs. Le modèle du fluide non visqueux est souvent utilisé dans des situations où la viscosité peut être négligée pour simplifier les calculs.

## 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

### 6.14.9 Viscosité d'un fluide

La viscosité dynamique, notée généralement  $\mu$  est une propriété caractérisant la résistance d'un fluide à l'écoulement sous l'effet d'une contrainte de cisaillement. Elle est également appelée viscosité absolue ou simplement viscosité. La viscosité dynamique est une mesure de la "fluidité" d'un fluide, indiquant sa capacité à s'écouler facilement ou, au contraire, à résister à l'écoulement.

La relation fondamentale liant la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ), la viscosité dynamique ( $\mu$ ), et le gradient de vitesse ( $\frac{dv}{dy}$ ) dans un fluide newtonien (où le taux de cisaillement est directement proportionnel à la contrainte de cisaillement) est donnée par la loi de Newton de la viscosité :

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \text{ où : } \tau \text{ est la contrainte de cisaillement,}$$

$\mu$  est la viscosité dynamique,

$\frac{dv}{dy}$  est le gradient de vitesse dans la direction perpendiculaire à la direction du cisaillement

L'unité SI de la viscosité dynamique est le pascal-seconde (Pa·s) ou le poise (P) dans le système CGS. Le poise est une unité équivalente à 0,1 Pa·s.

La viscosité dynamique varie selon le type de fluide et peut dépendre de la température. Elle caractérise la manière dont un fluide s'oppose au déplacement relatif de ses différentes couches lorsqu'une force est appliquée. Les fluides avec une viscosité dynamique élevée sont considérés comme visqueux et s'écoulent plus lentement, tandis que les fluides avec une viscosité dynamique faible s'écoulent plus facilement.

## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.10 Loi de Poiseuille

La loi de Poiseuille décrit le débit d'un fluide à travers un tube ou un conduit cylindrique, lorsque le fluide est en écoulement laminaire (non turbulent), en fonction de la différence de pression à ses extrémités, de sa viscosité et de ses caractéristiques géométriques, notamment son rayon et sa longueur. Cette loi a été formulée par le physicien français Jean Léonard Marie Poiseuille au XIXe siècle.

La loi de Poiseuille pour le débit volumétrique ( $Q$ ) à travers un tube de rayon  $r$  et de longueur  $L$  est donnée par l'équation :

$$Q = \frac{\pi(\Delta P)r^4}{8\mu L} \quad \text{où : } Q \text{ est le débit volumique, } \Delta P \text{ est la différence de pression entre les extrémités}$$

du tube,  $r$  le rayon du tube,  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide,  $L$  la longueur du tube

Cette loi est valable dans le cas d'un écoulement laminaire, c'est-à-dire lorsque le fluide s'écoule de manière régulière et ordonnée, sans tourbillons ni turbulences. Si l'écoulement devient turbulent, la loi de Poiseuille n'est plus applicable, et d'autres modèles, tels que l'équation de Darcy-Weisbach, sont utilisés pour décrire le comportement du fluide.

L'équation de la loi de Poiseuille montre que le débit est directement proportionnel à la quatrième puissance du rayon du tube et à la différence de pression, et inversement proportionnel à la viscosité du fluide et à la longueur du tube. Ainsi, une petite variation du rayon du tube peut avoir un effet significatif sur le débit.

## 6. Mécanique

### 6.14. Equations de base de la dynamique des fluides

#### 6.14.11 Equation de Navier-Stokes

L'équation de Navier-Stokes est un ensemble d'équations aux dérivées partielles qui décrivent le mouvement des fluides visqueux. Ces équations ont été formulées par le mathématicien et physicien français Claude-Louis Navier et le mathématicien britannique George Gabriel Stokes au XIXe siècle. L'équation de Navier-Stokes est fondamentale en mécanique des fluides et est utilisée pour modéliser le comportement des fluides dans une variété de contextes, allant des écoulements atmosphériques aux écoulements sanguins.

L'équation de Navier-Stokes pour un fluide incompressible et newtonien peut être écrite sous la forme suivante pour un écoulement tridimensionnel :

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad \text{où : } \rho \text{ est la densité du fluide, } \mathbf{u} \text{ le champ de vitesse du fluide, } t \text{ le temps,}$$

$P$  la pression,  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide,  $\nabla$  l'opérateur nabla représentant le gradient,  $\nabla^2$  l'opérateur laplacien,  $\mathbf{g}$  le champ de gravité.

Cette équation représente la conservation de la quantité de mouvement pour un fluide. Elle prend en compte la variation temporelle de la vitesse, les termes d'advection  $((\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u})$ , la pression, la viscosité, et les forces gravitationnelles.

Il est important de noter que l'équation de Navier-Stokes est complexe et généralement difficile à résoudre de manière analytique. Des méthodes numériques sont souvent utilisées pour obtenir des solutions numériques à ces équations, en particulier pour des configurations complexes ou des écoulements turbulents.

# 7. Electricité

## 7.1. Electrostatique

### 7.1.2 Loi de Coulomb

La loi de Coulomb exprime l'intensité de la force électrique entre deux particules immobiles en fonction de la charge de ces particules et de la distance qui les sépare:

$$F_{\text{elec}} = k \frac{q_1 q_2}{r}$$

où:

$F_{\text{elec}}$  : intensité de la force électrique en newtons (N)

$k$  : constante de Coulomb =  $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

$q_1$  : charge de la particule 1 en coulombs (C)

$q_2$  : charge de la particule 2 en coulombs (C)

$r$  : distance entre les particules en mètres (m)



# 7. Electricité



## 7.2. Electrocinétique - Courant électrique

Le courant électrique provient du déplacement des charges (électrons) dans un conducteur et l'intensité est donné par:  $I=dQ/dt$  ( I intensité en ampères, Q charge en coulombs, t temps en secondes.

Dans la théorie des bandes, les électrons d'un solide ne sont pas considérés comme situés dans des orbitales atomiques individuelles, mais plutôt comme formant des « bandes » d'énergie. Ces bandes sont constituées des niveaux d'énergie autorisés pour les électrons, et il existe deux bandes principales : la bande de valence et la bande de conduction.

La bande de valence Il s'agit de la bande d'énergie la plus basse et elle est occupée par les électrons dans leur état fondamental. Les électrons de la bande de valence sont étroitement liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer facilement à travers le matériau, ce qui en fait un mauvais conducteur d'électricité.

La bande de conduction, ^par contre, est la bande d'énergie la plus élevée et est vide dans l'état fondamental. Les électrons de la bande de conduction ont une plus grande liberté de mouvement et peuvent se déplacer à travers le matériau, ce qui en fait un bon conducteur d'électricité.

La différence d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée « gap ». Si cet écart est faible ou inexistant, les électrons peuvent facilement passer de la bande de valence à la bande de conduction, permettant ainsi la conduction de l'électricité. En revanche, si le fossé énergétique est important, les électrons ne peuvent pas sauter aussi facilement et le matériau se comporte comme un isolant.

Lorsqu'un matériau possède des électrons dans sa bande de conduction, il est considéré comme un bon conducteur d'électricité. Ces électrons ont la capacité de se déplacer librement dans le matériau et de contribuer au courant électrique.

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.1. Définition des concepts de courant, intensité, tension, et résistance

**1. Intensité du courant :** Le courant électrique est le déplacement ordonné de charges électriques dans un conducteur. Son intensité est mesurée en ampères (A) et est représentée par le symbole  $I$ .  $I$  est égale à la charge  $\Delta Q$  qui traverse une portion de circuit pendant le temps  $\Delta t$ :  $I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$  avec  $I$  en ampères  $Q$  en coulombs et  $t$  en secondes.

**2. Tension :** La tension électrique, également appelée différence de potentiel, mesure l'énergie électrique potentielle par unité de charge dans un circuit. Elle est mesurée en volts (V) et est symbolisée par  $V$ . La tension représente la force qui pousse les charges à se déplacer dans un circuit. Elle peut être analogiquement comparée à la pression dans un système hydraulique, où l'eau (charges électriques) se déplace en réponse à une différence de pression (tension).

**3. Résistance :** La résistance électrique est une propriété des matériaux qui s'oppose au passage du courant électrique. Elle est mesurée en ohms ( $\Omega$ ) et est notée par le symbole  $R$ . La loi d'Ohm, formulée par le physicien Georg Simon Ohm, énonce que la tension ( $V$ ) à travers un conducteur est proportionnelle au courant ( $I$ ) qui le traverse, la constante de proportionnalité étant la résistance ( $R$ ). L'équation de la loi d'Ohm est  $V=I \cdot R$ .

**En résumé,** le courant représente le flux de charges, la tension mesure la force qui pousse ces charges à se déplacer, et la résistance décrit l'opposition au mouvement du courant.

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.2 Générateur récepteur

Un circuit électrique est une association de générateurs et de récepteurs qui échangent de l'énergie.

Le **générateur** est le composant qui fournit l'énergie électrique au reste du circuit. Il établit une différence de potentiel (tension) à ses bornes mesurée en volts(V) appelée également force électromotrice (fem) qui correspond au travail que fournit un générateur au circuit par unité de charge.

Lorsque dans un circuit un générateur est placé en série et en opposition au générateur principal, sa tension s'oppose à celle du générateur principal, on parle de force contre-électromotrice (fcem). Il en est de même avec les récepteur inductifs en courant alternatif

Les **récepteurs** transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en une autre énergie (énergie lumineuse pour une lampe, énergie thermique pour une résistance, mécanique pour un moteur...)

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.3 Lois Fondamentales :

Les lois fondamentales de l'électrocinétique sont les principes qui régissent le comportement des circuits électriques. Parmi les lois les plus importantes, on retrouve la loi d'Ohm et les lois de Kirchhoff.

#### 1. Loi d'Ohm :

1. **Énoncé** : La loi d'Ohm énonce la relation entre la tension ( $V$ ), le courant ( $I$ ), et la résistance ( $R$ ) dans un circuit électrique. Elle est formulée comme suit :  $V=I \cdot R$ .
2. **Signification** : Cette équation exprime que la tension à travers un composant (résistance) est directement proportionnelle au courant le traversant, avec la constante de proportionnalité étant la résistance. C'est l'une des lois les plus fondamentales de l'électrocinétique.

#### 2. Lois de Kirchhoff :

1. **Loi des Nœuds** : La somme des courants entrants dans un nœud d'un circuit est égale à la somme des courants sortants. Cela découle du principe de conservation de la charge.
2. **Loi des Mailles** : La somme algébrique des tensions autour de n'importe quelle boucle d'un circuit est égale à zéro. Cela reflète la conservation de l'énergie électrique dans un circuit fermé.

#### 3. Loi de Joule :

1. **Énoncé** : La loi de Joule décrit la conversion d'énergie électrique en chaleur dans une résistance. Elle est formulée comme suit :  $P=I^2 \cdot R$ , où  $P$  est la puissance dissipée en watts ( $W$ ).
2. **Signification** : Cette loi souligne que plus le courant traverse une résistance importante, plus la puissance dissipée sous forme de chaleur est élevée. Elle est cruciale pour comprendre l'effet de chauffage dans les circuits.

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.3.1 Loi d'Ohm

La **loi d'Ohm** est une loi fondamentale de l'électrocinétique qui établit une relation linéaire entre la tension ( $V$ ), le courant ( $I$ ), et la résistance ( $R$ ) dans un circuit électrique. Elle est formulée comme suit :

$$V=I \cdot R$$

où :

$V$  est la tension aux bornes du composant en volts (V),

$I$  est le courant qui traverse le composant en ampères (A),

$R$  est la résistance du composant en ohms ( $\Omega$ ).

Cette équation exprime que la tension à travers un composant (résistance) est directement proportionnelle au courant qui le traverse, la constante de proportionnalité étant la résistance. Cette relation linéaire est valable dans des conditions où la température et d'autres facteurs ne varient pas significativement.

La loi d'Ohm a été formulée par le physicien allemand Georg Simon Ohm.

**Résistance:** une résistance électrique est un composant électronique qui s'oppose au passage du courant électrique dans un circuit électrique. Elle est conçue pour limiter le courant qui circule à travers un circuit en transformant l'énergie électrique en chaleur

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.3.2 Lois de Kirchhoff

Les lois de Kirchhoff expriment la conservation de l'énergie et de la charge dans un circuit électrique. Elles portent le nom du physicien allemand qui les a établies en 1845 : Gustav Kirchhoff.

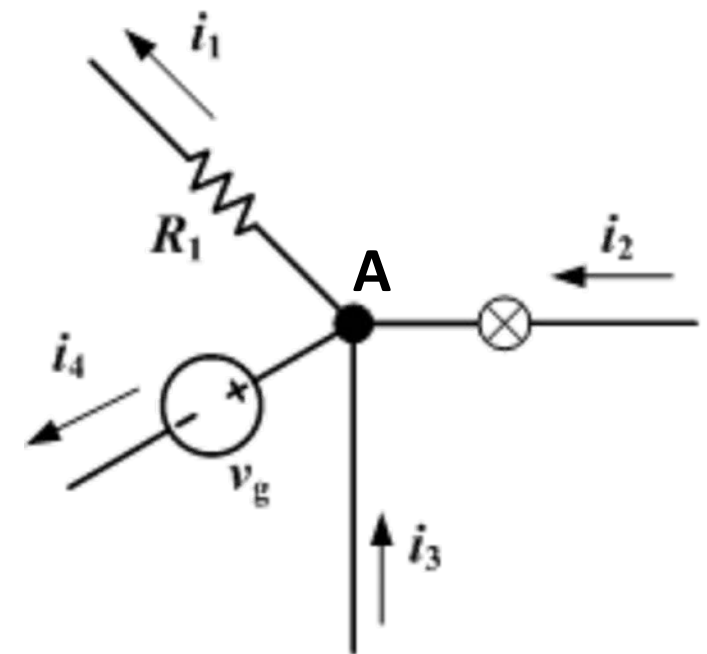
Dans un circuit complexe, il est possible de calculer les différences de potentiel aux bornes de chaque résistance et l'intensité du courant continu dans chaque branche de circuit en appliquant les deux lois de Kirchhoff (qui découlent de la loi d'Ohm) : la loi des nœuds et la loi des mailles.

#### Loi des nœuds (conservation de la charge):

La somme algébrique des intensités des courants qui entrent par un nœud est égale à la somme algébrique des intensités des courants qui en sortent. Les intensités des courants sont des grandeurs algébriques (positives ou négatives). Sur la figure est représenté le sens (choisi arbitrairement) des courants entrant ou sortant du nœud A.

D'après la loi des nœuds, on a donc :  $i_1 + i_4 = i_2 + i_3$ .

Pour bien comprendre cette loi, il faut savoir que l'intensité est définie comme un débit de charge par unité de temps ( $i = \frac{dq}{dt}$ ). Sachant que les charges ne peuvent pas s'accumuler à un endroit quelconque du circuit, elles circulent, donc l'intégralité des charges qui " arrivent " à un nœud en repart.



# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.3.2 Lois de Kirchhoff

#### Loi des mailles (conservation de l'énergie):

La somme algébrique des tensions autour de n'importe quelle boucle fermée d'un circuit électrique est égale à zéro.

Elle indique que la somme des élévations de potentiel (tensions) dans une boucle fermée est égale à la somme des chutes de potentiel dans cette boucle.

Cette loi découle de la définition de la tension comme différence de potentiel entre deux points. La tension entre a et b est  $U = V_b - V_a$ .  $V_a$  et  $V_b$  étant les potentiels respectifs aux points a et b. En additionnant toutes les tensions d'une maille et en se servant de cette définition, on obtient un résultat nul.

#### Méthode:

On trace le sens de parcours du courant et les tensions associées à chaque dipôle.

On dessine la maille.

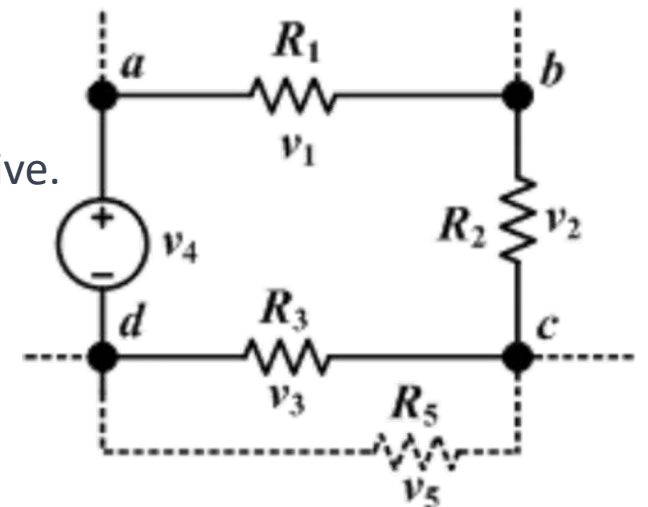
Si le sens de la maille est différent de la tension associé au dipôle, c'est une tension négative.

On remplace dans l'équation des mailles.

Schéma d'un montage électrique illustrant la loi des mailles.

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} = U_{ad}$$

$$\text{soit } U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0 \text{ (car } U_{da} = -U_{ad}\text{)}.$$



# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.3.3 Effet Joule

L'effet Joule fait référence à la conversion d'énergie électrique en chaleur lorsqu'un courant électrique traverse un conducteur électrique présentant une résistance. Cette conversion d'énergie est nommée d'après James Prescott Joule, un physicien britannique du XIXe siècle qui a contribué à l'étude des phénomènes thermiques et à la compréhension de la conservation de l'énergie.

Lorsqu'un courant électrique circule à travers un matériau conducteur, les électrons se déplacent à travers le matériau en heurtant les atomes qui le composent. Ces collisions provoquent une résistance au passage du courant. L'énergie cinétique des électrons est ainsi convertie en chaleur en raison de ces collisions.

**La puissance dissipée par effet Joule (P) peut être calculée à l'aide de la loi d'Ohm :  $P = I^2R$ , où I est l'intensité du courant électrique en ampères, et R est la résistance en ohms.**

L'effet Joule est présent dans de nombreuses applications pratiques, telles que les appareils de chauffage électrique, les ampoules électriques et d'autres dispositifs où la conversion d'énergie électrique en chaleur est souhaitée. Cependant, dans de nombreuses applications, les ingénieurs cherchent à minimiser l'effet Joule afin de réduire les pertes d'énergie et d'optimiser l'efficacité du système électrique, c'est le cas des lignes de transport d'électricité.



# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.3.4 Analyse des circuits complexes en courant continu (CC) - 1 -

L'analyse des circuits en courant continu (CC) complexes implique l'utilisation de différentes techniques pour résoudre des circuits comportant plusieurs composants tels que des résistances, des sources de tension et de courant, des condensateurs et des inductances. Voici une approche générale pour l'analyse des circuits CC complexes :

#### 1. Identification des Composants :

1. Identifiez tous les composants présents dans le circuit, y compris les résistances, les sources de tension, les sources de courant, les condensateurs et les inductances.

#### 2. Utilisation des Lois Fondamentales :

1. Appliquez la loi d'Ohm pour les résistances ( $V=I \cdot R$ ).
2. Utilisez les lois de Kirchhoff (loi des nœuds et loi des mailles) pour les circuits en série et en parallèle.
3. Appliquez la loi des condensateurs ( $Q=C \cdot V$ ) pour les circuits contenant des condensateurs.

#### 3. Analyse des Circuits en Série et en Parallèle :

1. Pour les résistances en série, la résistance équivalente ( $R_{eq}$ ) est la somme des résistances individuelles.
2. Pour les résistances en parallèle, l'inverse de la résistance équivalente ( $\frac{1}{R_{eq}}$ ) est la somme des inverses des résistances individuelles.

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.3.4 Analyse des circuits complexes en courant continu (CC) - 2 -

#### 4. Méthode des tensions de maille :

1. Utilisez la méthode des tensions de maille pour résoudre des circuits complexes comportant plusieurs boucles.
2. Appliquez la loi des mailles pour écrire des équations basées sur les tensions autour de chaque boucle.

#### 5. Méthode des courants de nœud :

1. Utilisez la méthode des courants de nœud pour résoudre des circuits comportant plusieurs nœuds.
2. Appliquez la loi des nœuds pour écrire des équations basées sur les courants entrants et sortants de chaque nœud.

#### 6. Équations Simultanées :

1. Formez un système d'équations simultanées basé sur les lois fondamentales du circuit et les équations dérivées des méthodes des courants de maille ou des tensions de nœud.

#### 7. Résolution du Système d'Équations :

1. Résolvez le système d'équations simultanées pour trouver les courants, tensions et autres grandeurs inconnues dans le circuit.

#### 8. Vérification :

1. Vérifiez les résultats obtenus et assurez-vous qu'ils sont cohérents avec les lois fondamentales de l'électrocinétique.

# 1. Courant alternatif

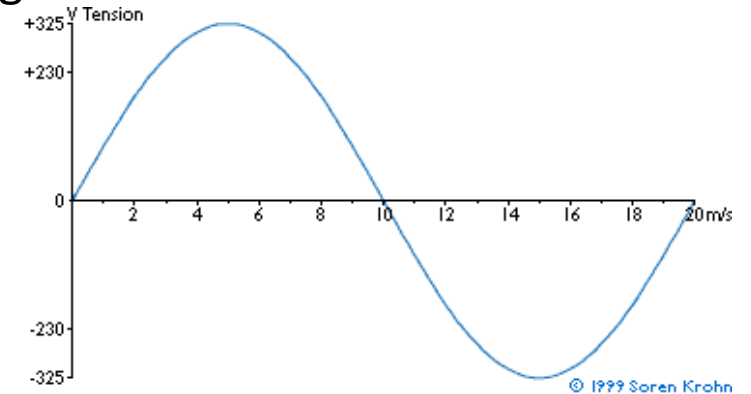
## Courant alternatif - 1 -

Le courant alternatif (CA) est un type de courant électrique dans lequel la direction du flux de charge électrique s'inverse périodiquement. Contrairement au courant continu (CC), où la charge électrique circule de manière constante dans une seule direction, le courant alternatif alterne régulièrement entre une direction positive et une direction négative.

Les principales caractéristiques du courant alternatif comprennent :

### 1. Variation périodique :

- Le courant alternatif varie périodiquement au fil du temps.
- Il est généralement représenté sous forme de sinusoïde, où la tension (ou le courant) atteint successivement des valeurs positives et négatives.



### 2. Fréquence :

- La fréquence du courant alternatif mesure le nombre de cycles complets (alternance positive et négative) qui se produisent en une seconde.
- L'unité de fréquence est le hertz (Hz). Dans de nombreux systèmes électriques, la fréquence standard est 50 Hz ou 60 Hz.

### 3. Tension efficace (RMS) :

- La tension efficace (RMS pour Root Mean Square) est utilisée pour représenter la puissance équivalente d'une tension alternative par rapport à une tension continue.
- La valeur efficace du courant alternatif est celle qui produirait la même puissance dans une résistance que

# 1. Courant alternatif

## Courant alternatif - 2 -

### 4. Applications :

- Le courant alternatif est largement utilisé pour la distribution d'électricité sur de longues distances. La plupart des réseaux électriques publics utilisent le courant alternatif car il est plus facile à transformer et à réguler.
- De nombreux appareils électriques dans les maisons et les industries fonctionnent également à l'aide du courant alternatif.

### 5. Transformateurs :

- Les transformateurs sont utilisés pour modifier la tension du courant alternatif. Ceci permet d'augmenter la tension pour une transmission efficace sur de longues distances, puis de la diminuer pour l'utilisation dans les foyers et les industries.

### 6. Génération :

- La plupart des centrales électriques produisent du courant alternatif. Les générateurs convertissent généralement l'énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant alternatif.

Le courant alternatif a été largement adopté pour la distribution d'électricité en raison de ses avantages en termes de transformation, de transport et de distribution de l'énergie électrique sur de longues distances. Les normes de courant alternatif, telles que la fréquence et la tension, varient dans le monde entier en fonction des régions et des systèmes électriques spécifiques.

# 1. Courant alternatif

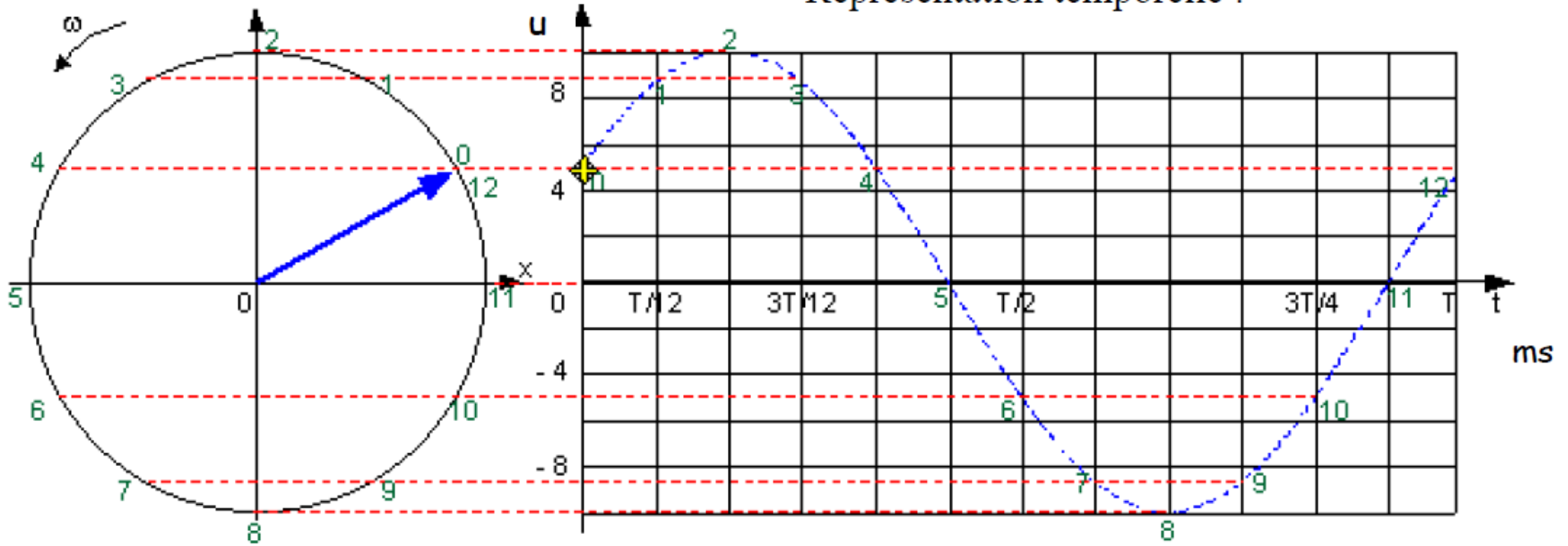
## Représentation de Fresnel

Tout signal alternatif sinusoïdal de type  $u(t) = U\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  peut être représenté par un vecteur tournant à la vitesse angulaire  $\omega$  ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ), avec  $U$  : tension efficace [V] et  $\varphi$  : phase à l'origine [rad]

Le vecteur de Fresnel est la représentation de ce vecteur à l'instant  $t = 0$

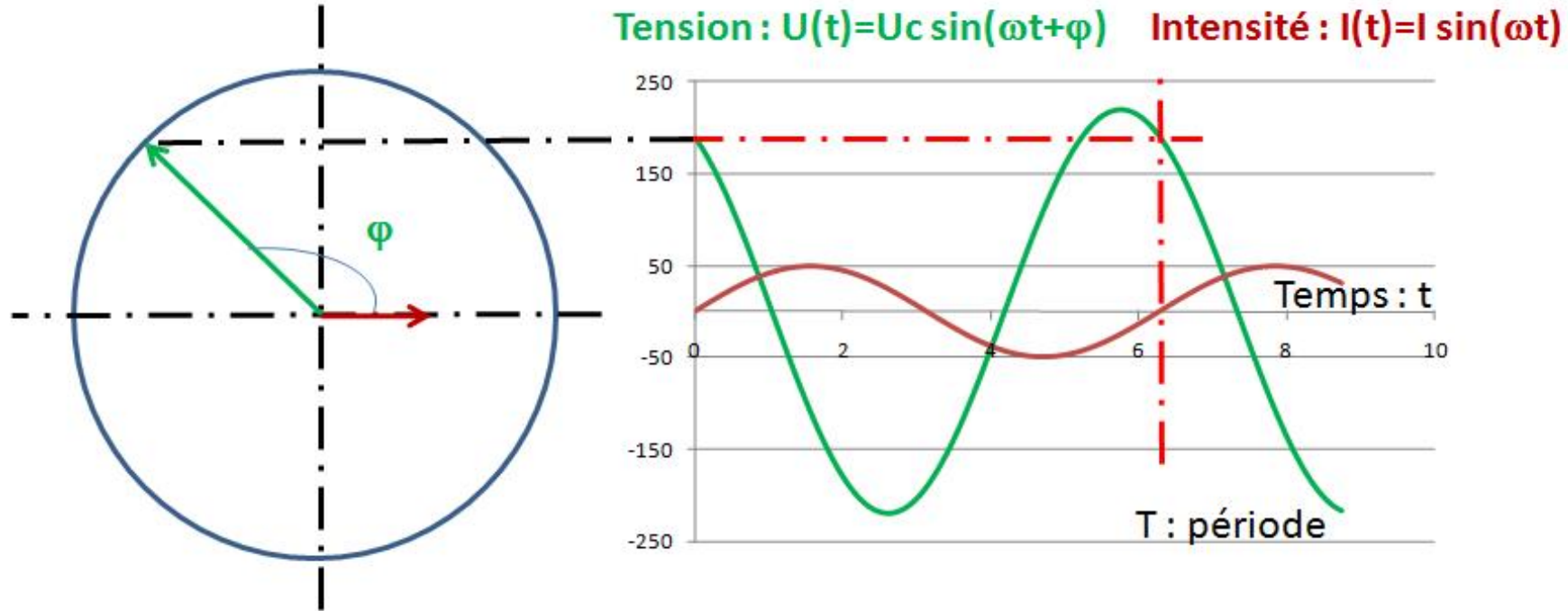
La phase à l'origine  $\varphi$  est l'angle entre l'axe Ox et le vecteur.

Représentation temporelle :



# 1. Courant alternatif

Représentation de la tension et du courant dans un diagramme de Fresnel



Représentation vectorielle de la tension et du courant (diagramme de Fresnel)

# 1. Courant alternatif

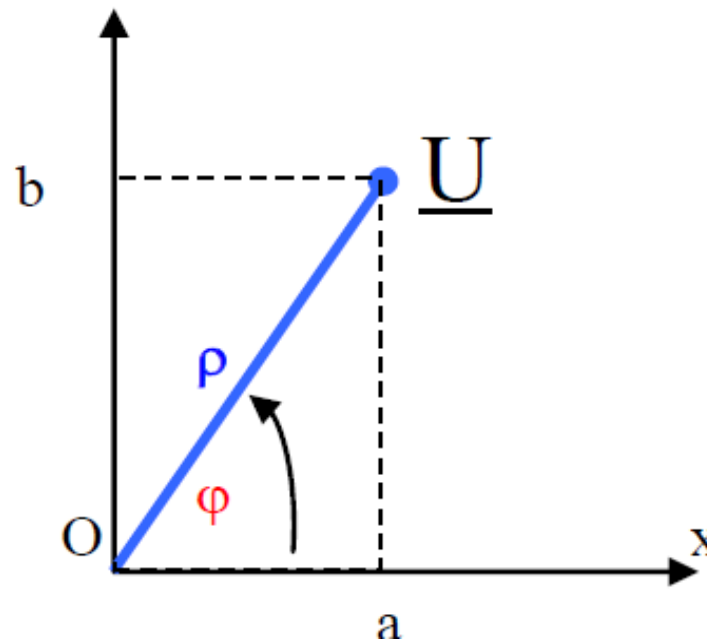
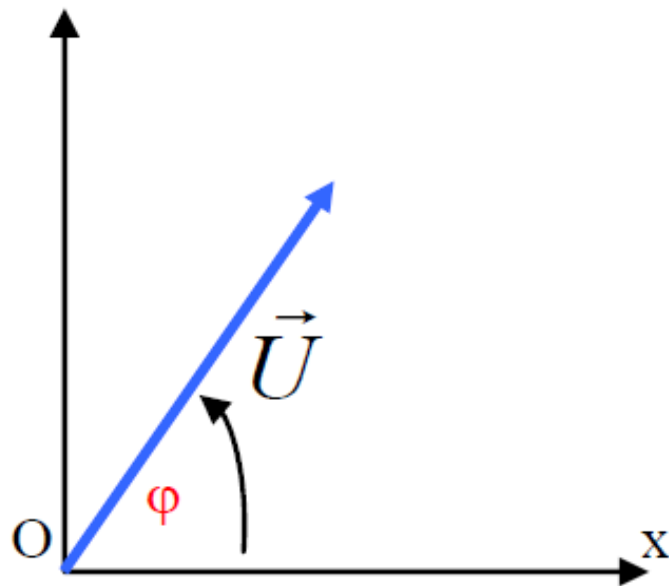
## Représentation complexe

L'utilisation des vecteurs pour les calculs (somme, soustraction) nécessite souvent une résolution graphique qui n'est pas forcément rapide. On peut associer à un vecteur son équivalent en complexe.

Les grandeurs électriques sont souvent exprimées sous forme de nombres complexes de la forme  $A\angle\theta$ , où  $A$  est l'amplitude et  $\theta$  est la phase.

Le plan complexe est utilisé pour représenter graphiquement les nombres complexes. L'axe horizontal représente la partie réelle, et l'axe vertical représente la partie imaginaire.

Le nombre complexe  $A\angle\theta$  est représenté dans le plan complexe en traçant une flèche (vecteur) à partir de l'origine du plan jusqu'au point correspondant aux coordonnées  $(A\cos(\theta), A\sin(\theta))$ .



a : partie réelle  
b : partie imaginaire  
 **$\rho$  : module**  
 **$\varphi$  : argument**

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique



### 7.2.4. Impédance et phase (CA) :

En circuits en courant alternatif (CA), l'impédance ( $Z$ ) et la phase sont des concepts qui décrivent la manière dont les composants réactifs, tels que les inductances et les condensateurs, affectent le comportement du courant et de la tension.

#### 1. Impédance ( $Z$ ) :

1. L'impédance est la mesure de l'opposition totale qu'un composant présente au passage du courant alternatif.
2. L'impédance ( $Z$ ) d'un composant est une grandeur complexe qui peut inclure la résistance ( $R$ ) et la réactance ( $X$ ), où  $X$  peut être inductive ( $X_L$ ) ou capacitive ( $X_C$ ).
3. Mathématiquement, l'impédance est représentée par  $Z=R+jX$ , où  $j$  est l'unité imaginaire ( $j^2=-1$ ).
4. Pour une résistance pure, l'impédance est égale à la résistance ( $Z=R$ ).
5. Pour une inductance ( $L$ ), la réactance inductive ( $X_L$ ) est donnée par  $X_L=j\omega L$ , où  $\omega$  est la pulsation ( $2\pi$  fois la fréquence) et  $L$  est l'inductance.
6. Pour un condensateur ( $C$ ), la réactance capacitive ( $X_C$ ) est donnée par  $X_C=-\frac{1}{j\omega C}$ , où  $C$  est la capacité.

#### 2. Phase :

1. La phase représente le décalage temporel entre le courant ( $I$ ) et la tension ( $V$ ) dans un circuit CA.
2. Pour un composant purement résistif, le courant et la tension sont en phase, ce qui signifie qu'ils atteignent leur maximum ou minimum simultanément.
3. Pour une inductance, le courant est retardé par rapport à la tension, ce qui crée un déphasage positif.
4. Pour un condensateur, le courant est en avance sur la tension, créant un déphasage négatif.
5. La relation entre la tension et le courant peut être exprimée par  $V=I \cdot Z$  avec une composante sinusoïdale.

En résumé, l'impédance ( $Z$ ) caractérise l'opposition totale d'un composant au courant alternatif, et la phase décrit le



# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.1 Loi d'Ohm généralisée (courant alternatif) Impédance

La loi d'Ohm généralisée s'applique aux circuits en courant alternatif (CA) et prend en compte la résistance ( $R$ ), l'inductance ( $L$ ), et la capacité ( $C$ ) des composants dans le circuit. Cette généralisation est exprimée à l'aide de la notion d'impédance ( $Z$ ), qui est une grandeur complexe représentant la résistance, la réactance inductive, et la réactance capacitive. La loi d'Ohm généralisée est formulée comme suit :

$$V=I \cdot Z$$

où :  $V$  tension en volts (V),  
 $I$  courant en ampères (A),  
 $Z$  l'impédance en ohms ( $\Omega$ ).

L'impédance ( $Z$ ) est une grandeur complexe définie par :

$$Z=R+jX$$

où :  $R$  est la résistance en ohms ( $\Omega$ ),  
 $j$  est l'unité imaginaire ( $j^2=-1$ ),  
 $X$  est la réactance, qui peut être inductive ( $X_L$ ) ou capacitive ( $X_C$ ).

Ainsi, la loi d'Ohm généralisée peut être étendue pour inclure la notion de réactance dans les circuits en courant alternatif. La réactance inductive ( $X_L$ ) est liée à l'inductance ( $L$ ), tandis que la réactance capacitive ( $X_C$ ) est liée à la capacité ( $C$ ). L'impédance totale ( $Z$ ) d'un circuit est la somme vectorielle de la résistance et des réactances.

# Electricité

## 7.2. Electrocinétique

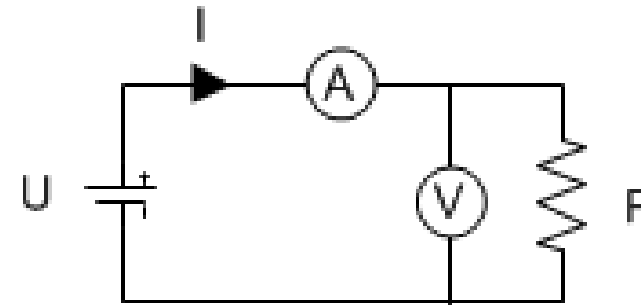
### 7.2.2.5. Lois de Kirchhoff pour le courant alternatif :

- Les lois de Kirchhoff pour le courant alternatif sont les mêmes que celles en courant continu.
- La loi des nœuds stipule que la somme des courants entrants à un nœud est égale à la somme des courants sortants.
- La loi des mailles stipule que la somme des tensions dans une boucle fermée est égale à la somme des produits des courants par les impédances dans cette boucle.

# 7. Electricité

## Courant alternatif

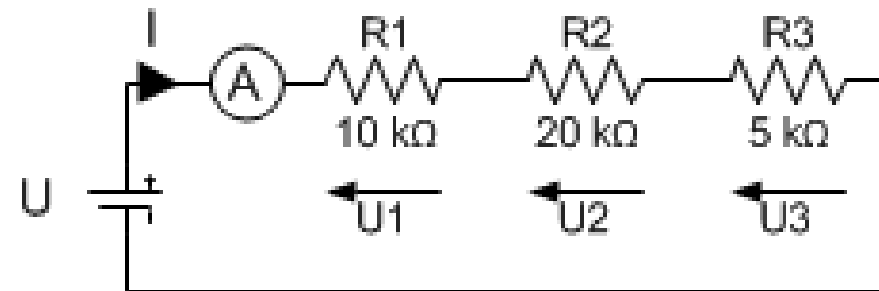
- La loi d'Ohm :  $U = R I$



-- Circuits en série : I constant

$$U_t = \sum U$$

$$R_t = \sum R$$



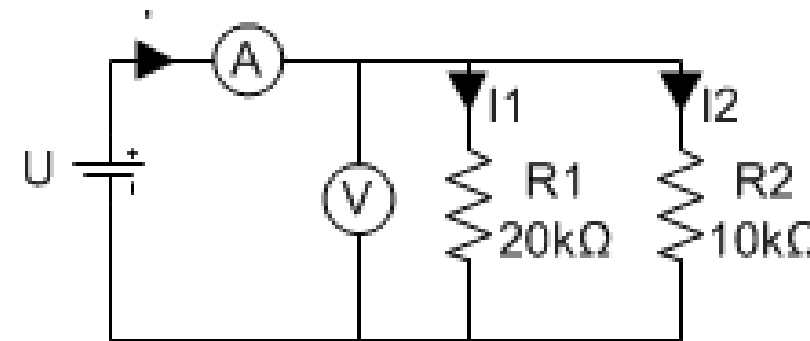
$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 = 35 \text{ k}\Omega$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

- Circuits en parallèle : même tension

$$I_t = \sum I$$

$$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$$



$$R_t = 1 / (1/R_1 + 1/R_2) = 6,67 \text{ k}\Omega$$

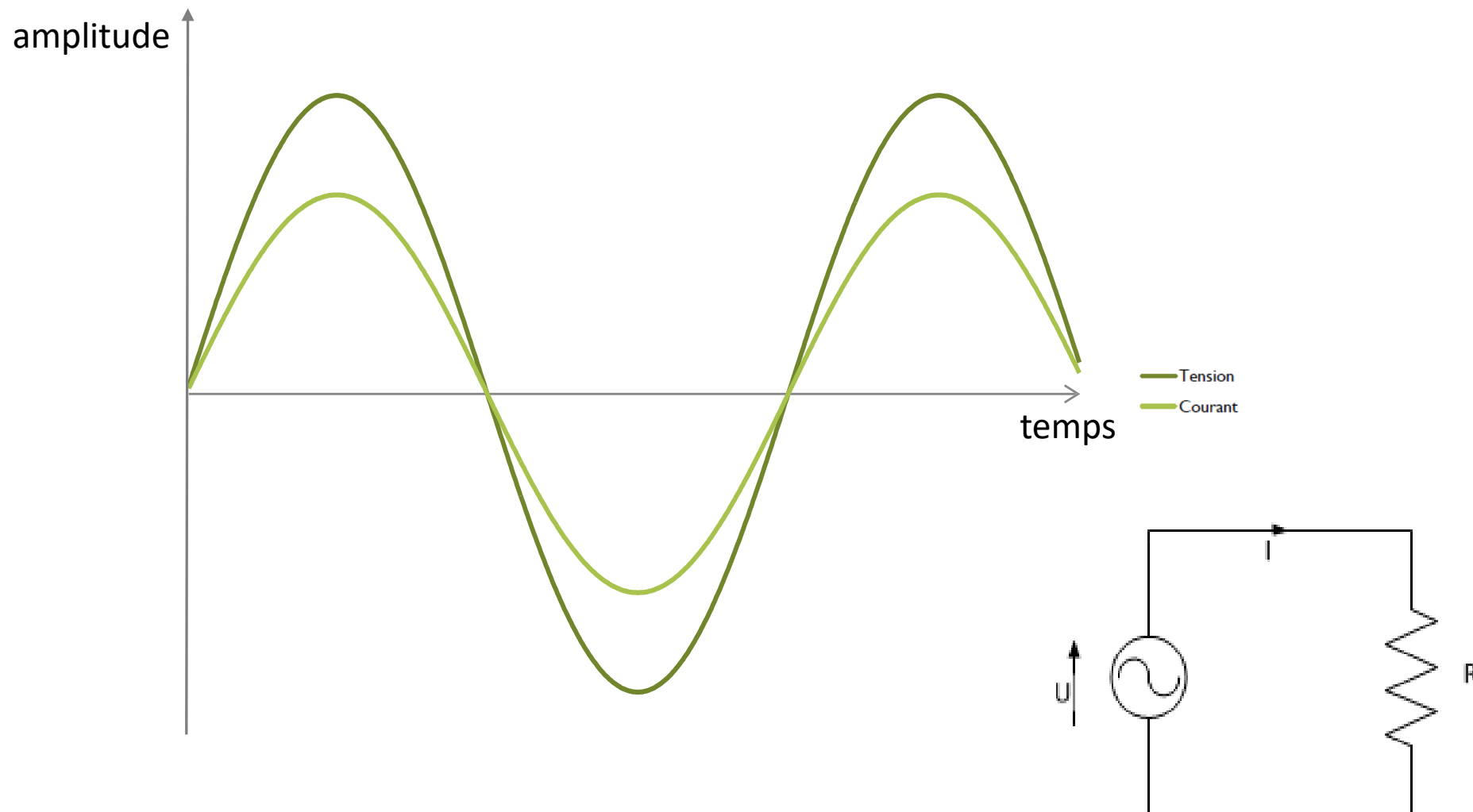
$$I = I_1 + I_2$$

# 7. Electricité

## Courant alternatif



**Circuit résistif:** Courant et tension sont en phase



# 7. Electricité

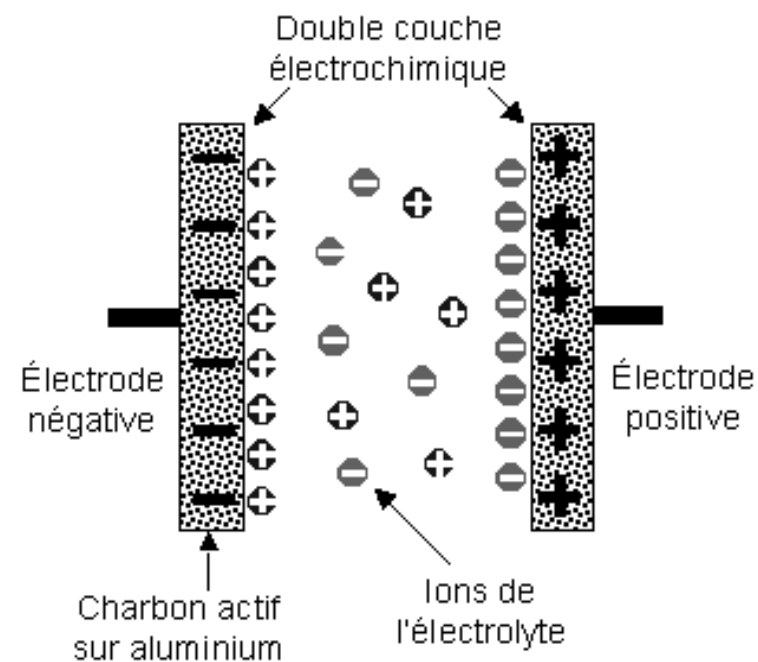
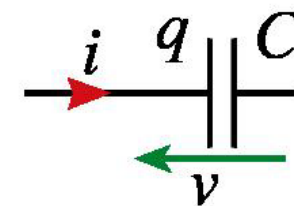
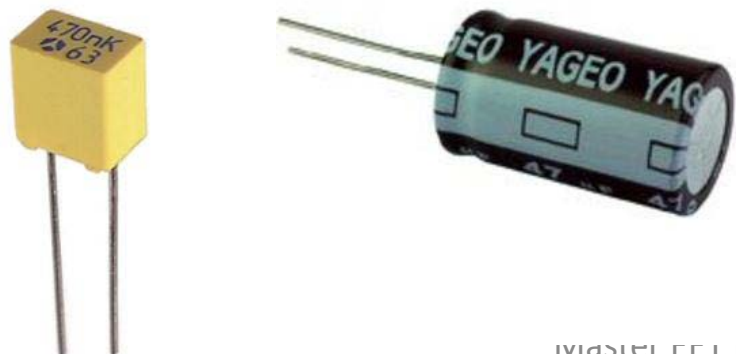
## Courant alternatif

### Circuit capacitif :

composé principalement de capacités

- symbole « C »
- unité : Farad « F »
- caractéristiques :
  - stocke les charges électriques (en DC),
  - s'oppose aux variations de tension (en AC)
- calcul de la réactance totale :
  - en // les capacités s'ajoutent,
  - en série

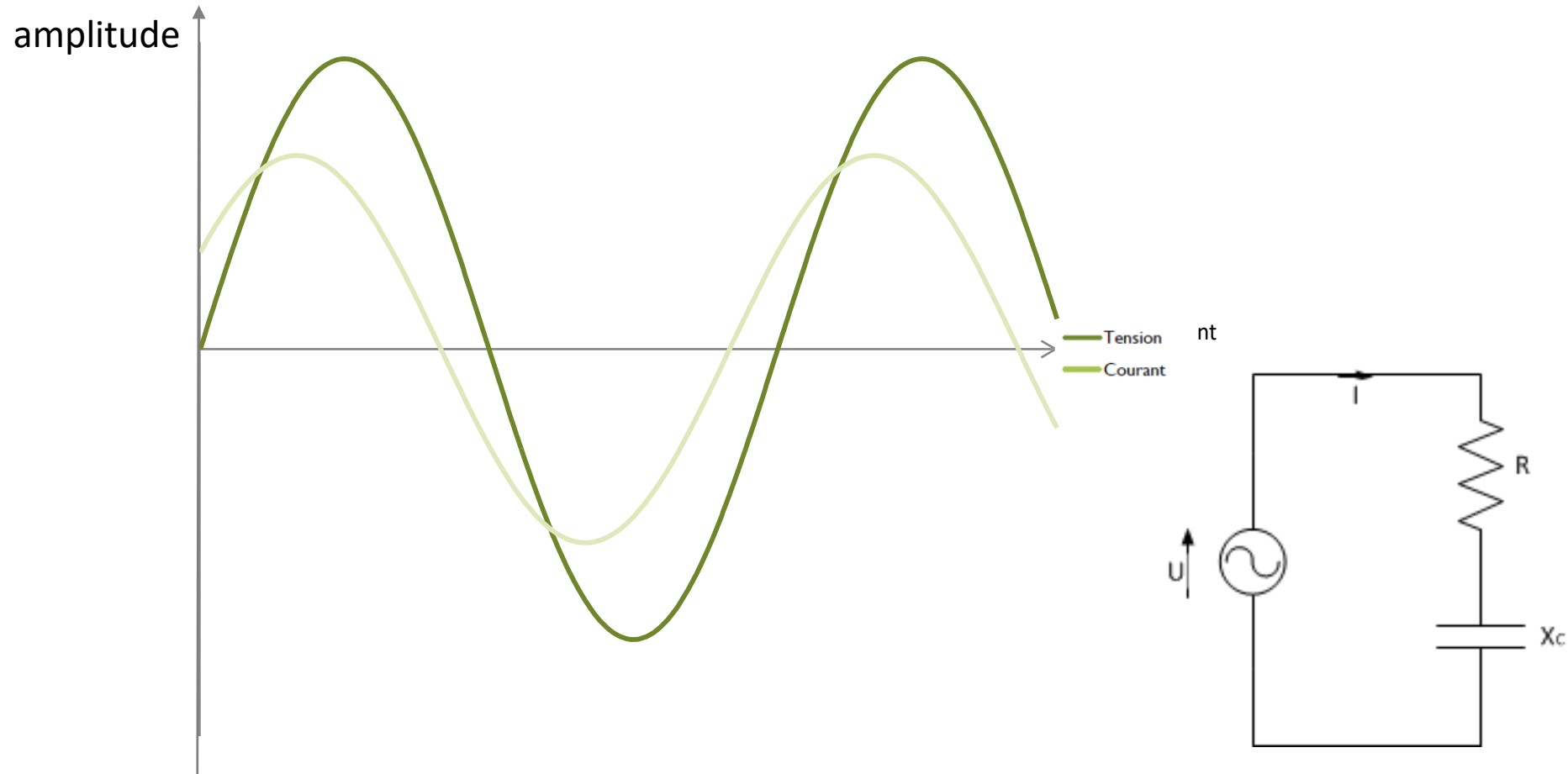
$$1/C_{eq} = 1/C_1 + 1/C_2$$



# 7. Electricité

## Courant alternatif

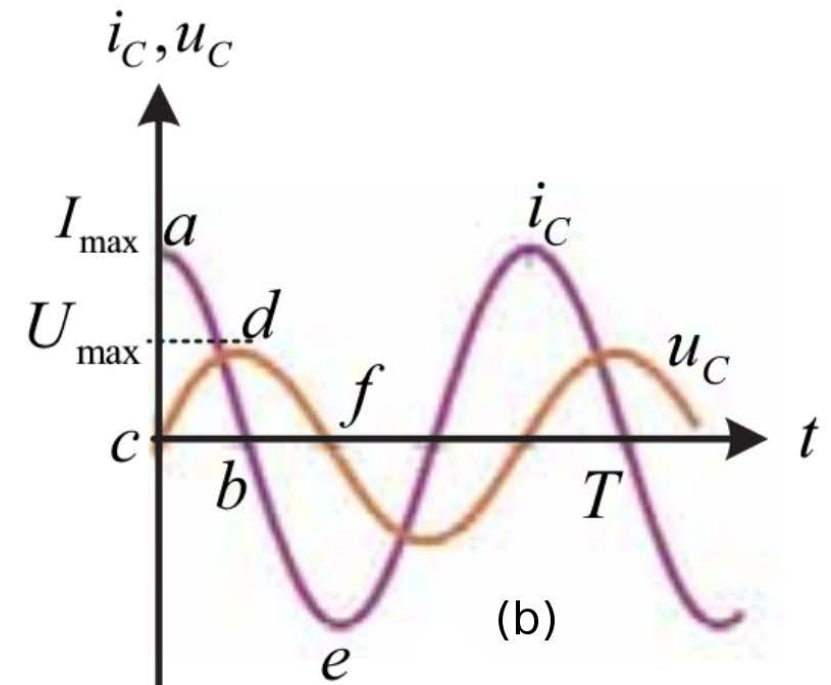
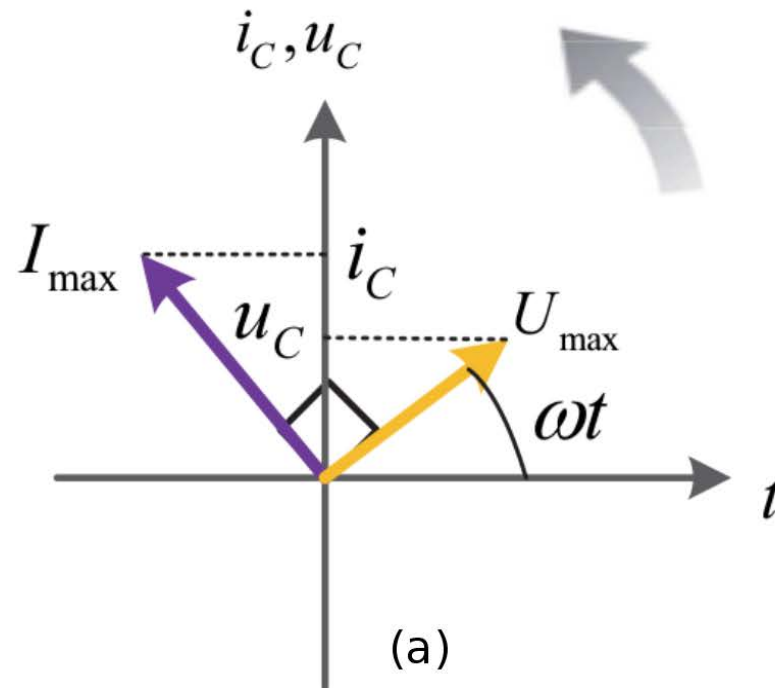
**Circuit capacitif:** avance de phase du courant / Tension



# 1. Courant alternatif

## Capacité

On est au point (c) de la courbe de la tension en fonction du temps. À ce moment, il n'y a aucune charge sur le condensateur et le courant peut se rendre « librement », le courant prend alors sa valeur maximale. À mesure que la tension augmente, la charge sur le condensateur augmente aussi et le courant diminue proportionnellement à cause des charges déjà en place qui repoussent celles qui veulent y venir. Quand la tension est maximale, le condensateur est complètement chargé et le courant devient nul (point b) ; quand la tension décroît, le courant devient négatif, c'est à dire change de sens. On voit que le courant et la tension ne « marchent » pas ensemble ; quand l'un est maximum, l'autre est nul et réciproquement ; on dit que le courant n'est pas en phase avec la tension. D'après la figure, l'angle de phase entre ces deux quantités est de  $\frac{\pi}{2}$ . Le courant est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  sur la tension (ou la tension est en retard de  $\frac{\pi}{2}$  sur le courant).



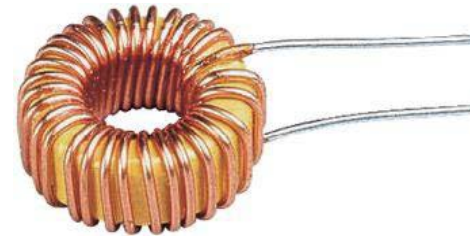
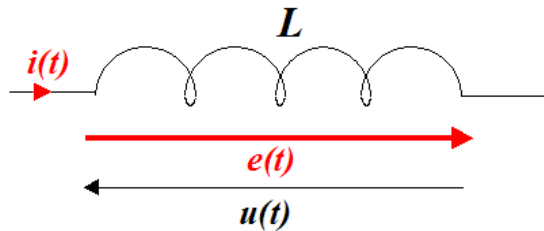
# 7. Electricité

## Courant alternatif



Circuit inductif : composé principalement d'inductance

- symbole «  $L$  » ; (bobine, ...)
- unité : henry «  $H$  »
- caractéristique : s'oppose aux causes qui lui donnent naissance (loi de Lenz) s'oppose à la variation du courant (en AC)
- calcul de la réactance totale : mêmes règles que pour les résistances en série et en //



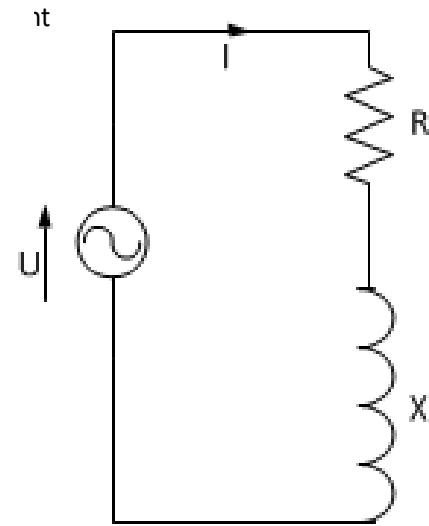
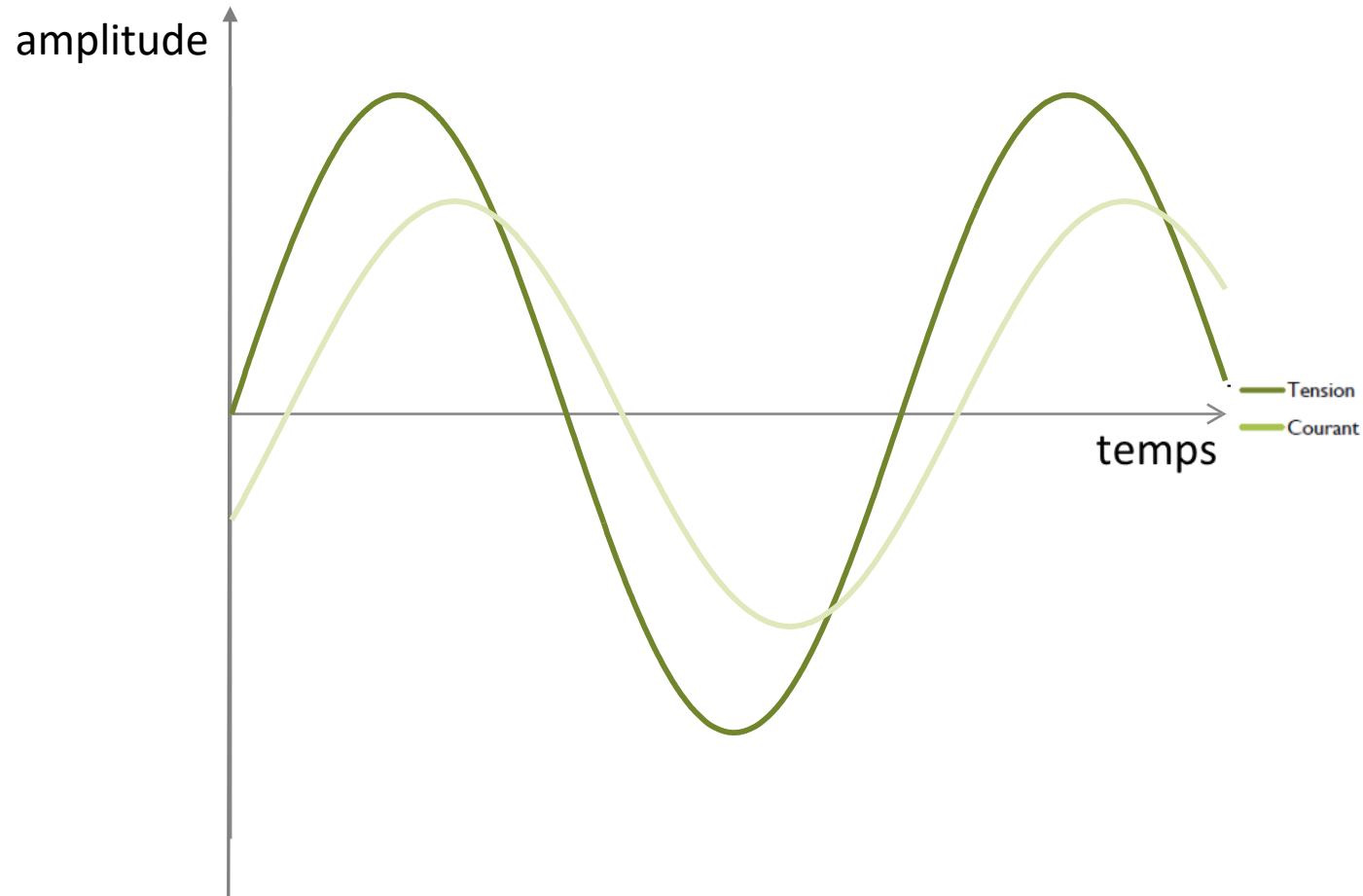


# 7. Electricité

## Courant alternatif



**Circuit inductif:** retard de phase du courant / Tension



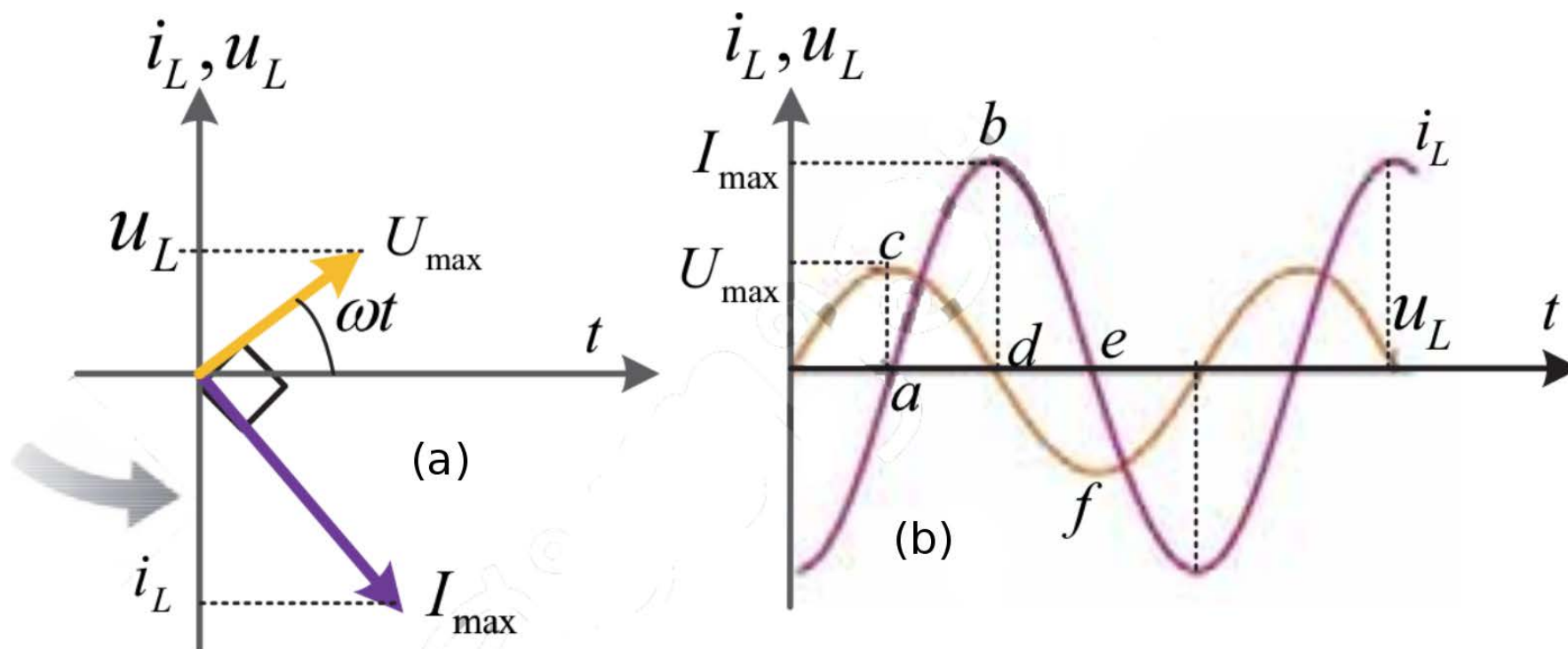


# 7. Electricité

## Inductance



Comparons les courbes représentatives de la tension et le courant alternatif, lorsque la tension aux bornes de l'inductance est maximale, le courant est nul : c'est que la force électromotrice induite, étant de sens inverse, annule complètement la tension fournie par la source. Notons que la tension est soit positive soit négative suivant que le courant est croissant ou décroissant. De même la force contre électromotrice aux bornes de l'inductance est nulle lorsque le taux de variation du courant dans le circuit est nul. Ceci se produit lorsque l'amplitude du courant est maximale. La tension précède le courant d'un angle de  $\frac{\pi}{2}$  (on dit que le courant retarde sur la tension d'un angle de  $\frac{\pi}{2}$ ).



# 7. Electricité

## Courant alternatif



Circuit comportant résistance, capacité et inductance

Impédance  $Z$  ( $\Omega$ ):

- circuit constitué de résistance ( $R$ ) et de réactance ( $X$ )
- valeur de la réactance :
  - bobine :  $X_L = \omega L$  ;  $\omega = 2\pi f$
  - capacité :  $X_C = 1/(\omega C)$

*Circuit en série :*

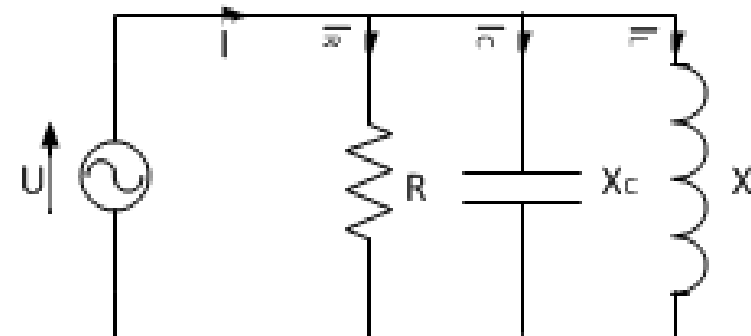
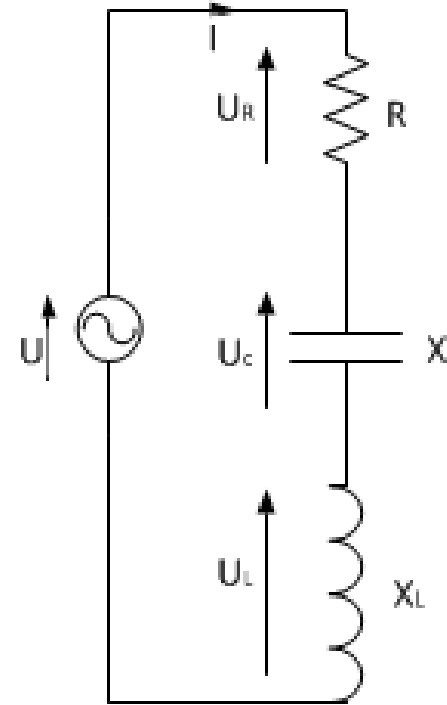
$$Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2$$

En notation complexe

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

*Circuit en // :*

$$1/Z^2 = 1/R^2 + (1/X_L - 1/X_C)^2$$



# 7. Electricité

## Puissance en alternatif - 1 -

La puissance électrique peut être divisée en deux composantes principales : la puissance active (P) et la puissance réactive (Q). Ces deux composantes sont importantes pour comprendre le comportement et la qualité d'un système électrique. Voici une explication de chaque type de puissance :

### 1. Puissance Active (P) :

- La puissance active est la composante de la puissance électrique qui effectue un travail utile dans un circuit. Elle est mesurée en watts (W).
- La puissance active est responsable de l'accomplissement du travail réel, tel que la rotation d'un moteur, le chauffage d'un appareil ou l'éclairage d'une ampoule.
- Elle est souvent associée à la "vraie" puissance ou à la "puissance réelle" du système.

### 2. Puissance Réactive (Q) :

- La puissance réactive est la composante de la puissance électrique qui ne réalise pas de travail utile mais qui est nécessaire pour maintenir la tension du système. Elle est mesurée en voltampères réactifs (VAR).
- La puissance réactive est souvent associée aux composants inductifs ou capacitifs d'un circuit, tels que les moteurs, les transformateurs et les condensateurs.

### 3.

## 7. Electricité

### Puissance en alternatif - 2 -

#### 3. Puissance Apparente (S) :

- La puissance apparente est la combinaison vectorielle de la puissance active (P) et de la puissance réactive (Q). Elle est mesurée en voltampères (VA).
- La puissance apparente représente la somme vectorielle des puissances active et réactive et indique la puissance totale transférée dans le circuit.
- La relation entre la puissance apparente, la puissance active et la puissance réactive est donnée par la formule  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

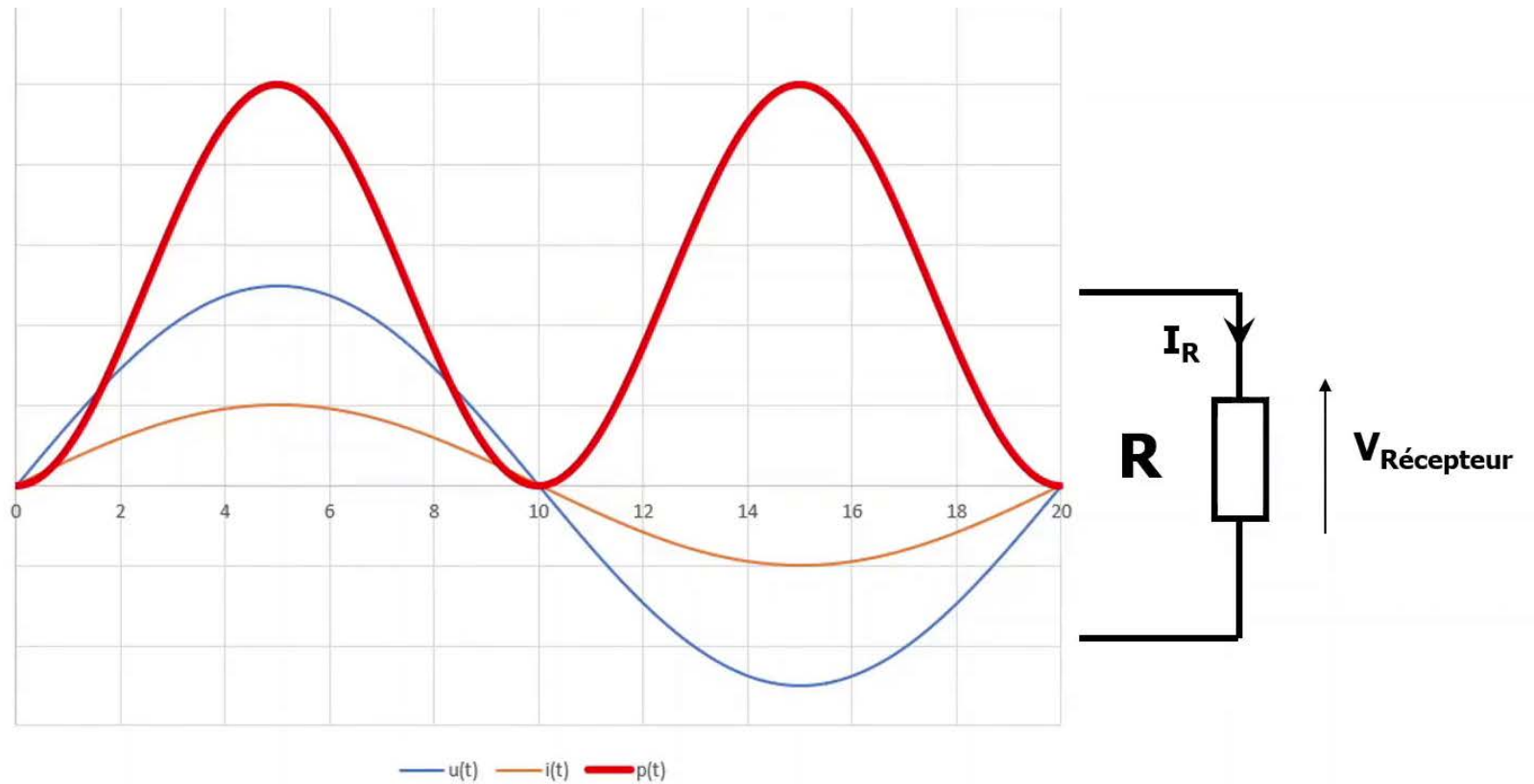
#### 4. Facteur de Puissance (cos $\phi$ ) :

- Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente dans un circuit. Il est défini par la **formule  $\cos\phi = P/S$**  en régime sinusoïdal.
- Le facteur de puissance varie de 0 à 1, où 1 indique une utilisation efficace de l'énergie sans puissance réactive excédentaire, et 0 indique une situation où toute la puissance est réactive. L'utilisation efficace de la puissance électrique, en particulier la minimisation de la puissance réactive excédentaire, contribue à améliorer le facteur de puissance, réduire les pertes d'énergie et optimiser l'efficacité du système électrique. Les équipements tels que les condensateurs et les compensateurs synchrones sont souvent utilisés pour corriger le facteur de puissance et améliorer la qualité de l'électricité fournie par un réseau électrique.

# 7. Electricité

## Puissance en alternatif - 3 -

Courant et tension en phase ( dans un circuit purement résistif):  
Il n'y a pas de puissance réactive.

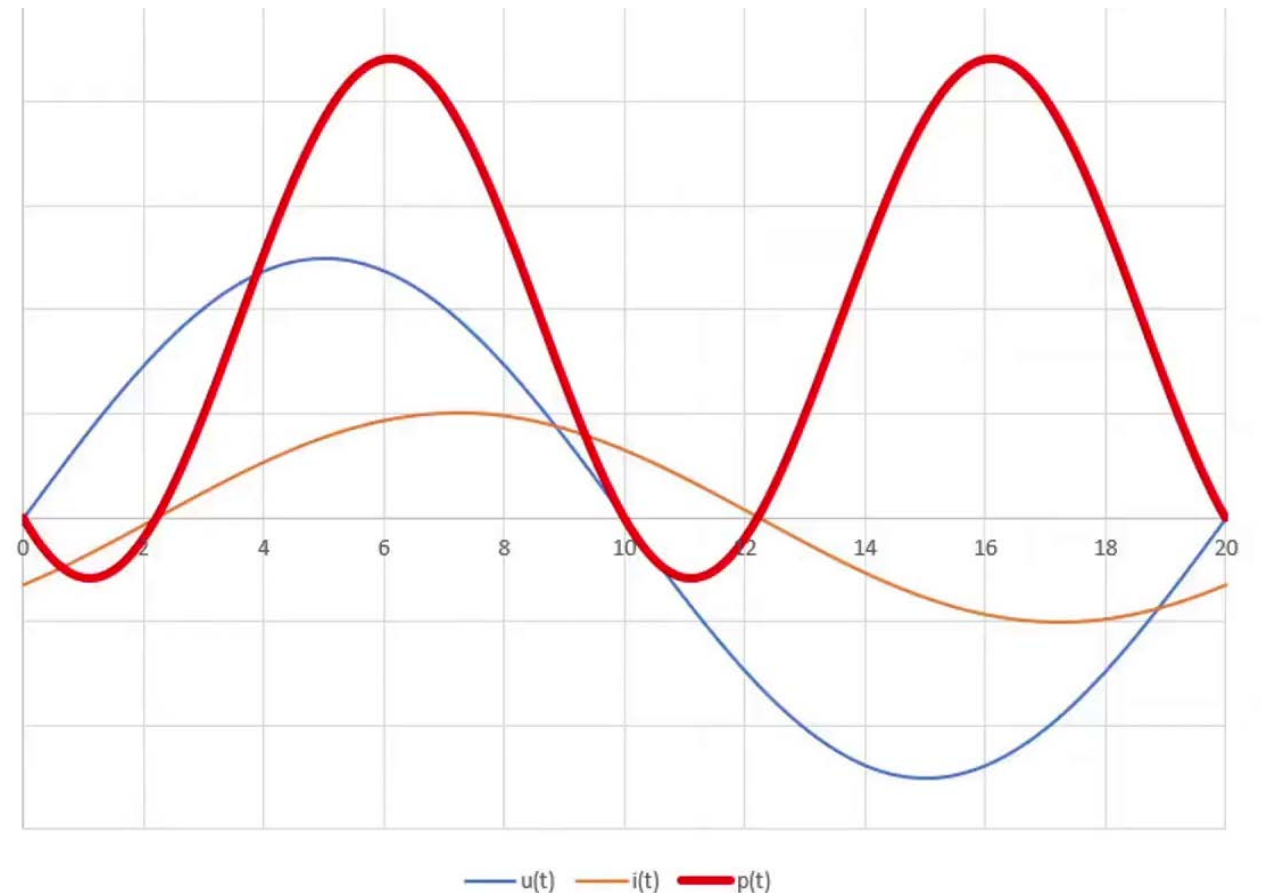


# 7. Electricité

## Puissance en alternatif - 4 -

Courant et tension déphasés: Apparition d'une puissance réactive ( partie de la puissance située en négatif) de charge

Retard de  $i$  par rapport à  $U$   $P_{\min} < 0$   
 Une partie de l'énergie est renvoyée vers le générateur

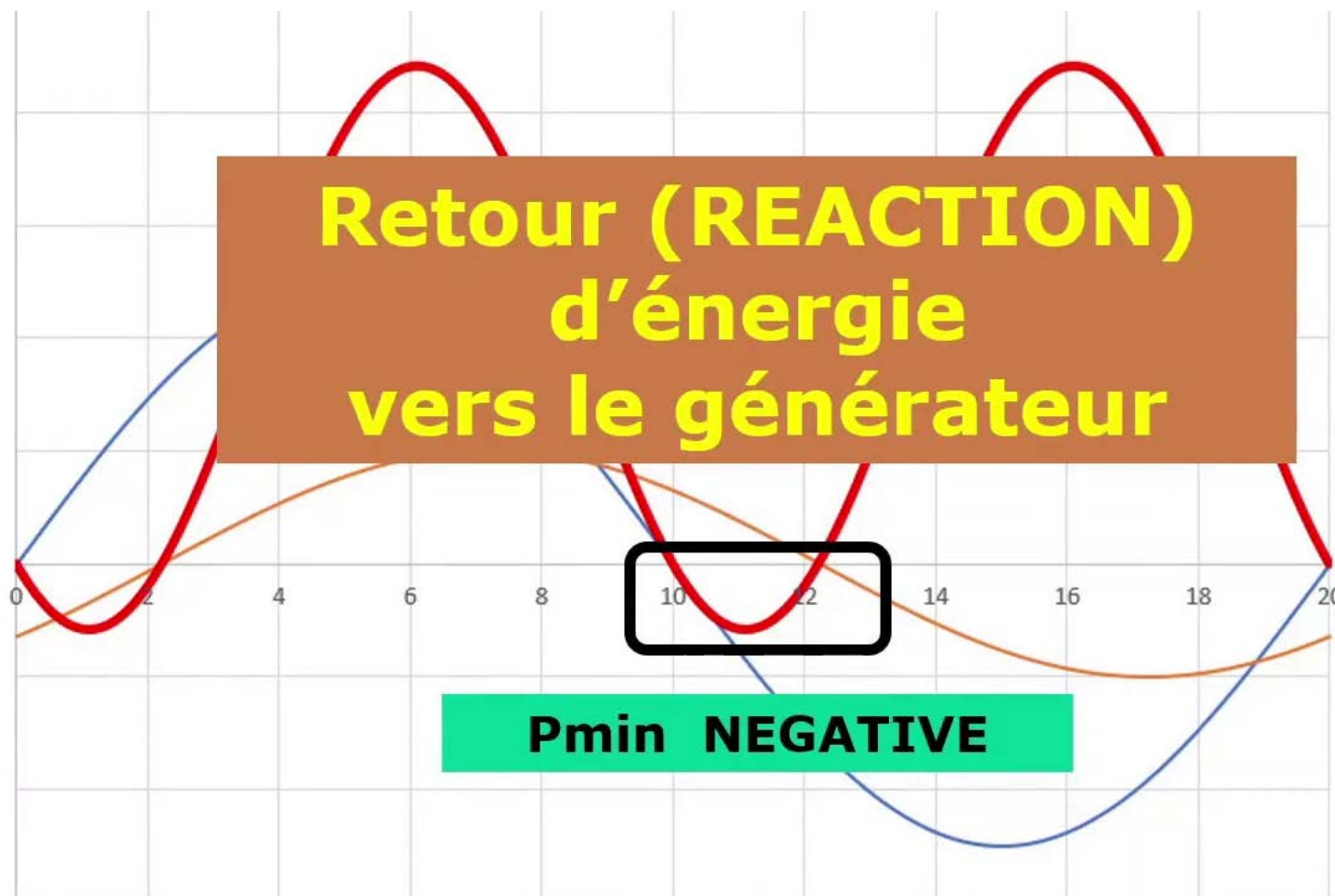




## 7. Electricité

### Puissance en alternatif - 5 -

Courant et tension déphasés: Apparition d'une puissance réactive ( partie de la puissance située en négatif)  
de





# Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 3. Relation entre la tension, le courant et la puissance en courant alternatif :

- la puissance en courant alternatif ( $P$ ) est liée à la tension ( $V$ ) et au courant ( $I$ ) par l'équation  $P=V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ , où  $\cos(\varphi)$  est le facteur de puissance.
- Le facteur de puissance mesure l'efficacité de la conversion d'énergie dans le circuit. Il est généralement compris entre 0 et 1, et il est idéalement proche de 1 pour un circuit avec une puissance active optimale.

# 7. Electricité

## 7.2. Electrocinétique

### 7.2.4. Analyse des circuits en courant alternatif (CA) :

L'analyse des circuits en courant alternatif (CA) implique l'étude du comportement des circuits électriques dans lesquels la tension et le courant varient périodiquement au fil du temps. Voici les principales étapes pour l'analyse des circuits CA :

#### 1.Représentation Sinusoïdale :

1. Les signaux CA sont souvent représentés par des formes d'ondes sinusoïdales en raison de leur nature périodique.
2. La représentation générale d'une tension ou d'un courant sinusoïdal est  $v(t)=V_m \cdot \cos(\omega t + \phi)$ , où  $V_m$  est la valeur maximale,  $\omega$  est la pulsation ( $2\pi$  fois la fréquence),  $t$  est le temps, et  $\phi$  est la phase.

#### 2.Impédance et Phase :

1. Calculez l'impédance ( $Z$ ) des composants du circuit, en tenant compte de la résistance ( $R$ ) et des composants réactifs tels que les inductances ( $L$ ) et les condensateurs ( $C$ ).
2. Considérez la phase ( $\phi$ ) associée à chaque composant.

#### 3.Lois de Kirchhoff pour les Courants Alternatifs :

1. Appliquez les lois de Kirchhoff (loi des nœuds et loi des mailles) en tenant compte des grandeurs complexes (tensions et courants phasoriels) pour les circuits CA.

#### 4.Calcul des Courants et Tensions :

1. Résolvez le système d'équations phasoriennes pour obtenir les valeurs des courants et des tensions complexes.
2. Convertissez les résultats phasoriens en formes sinusoïdales pour obtenir les grandeurs en fonction du temps.

# 7. Electricité

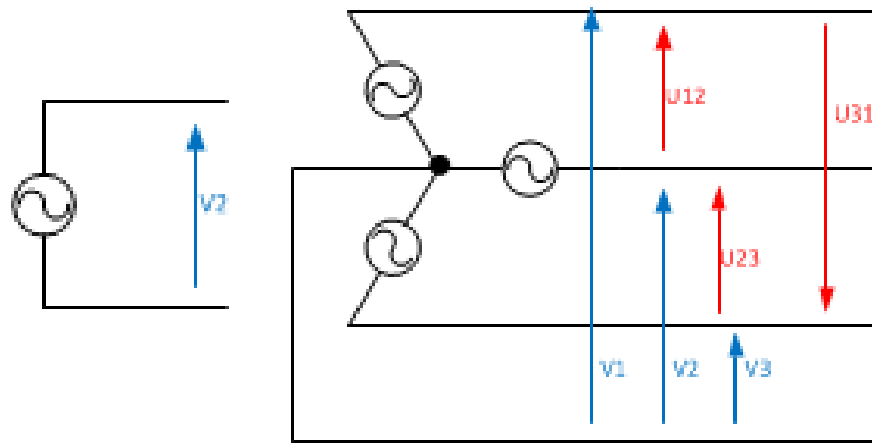
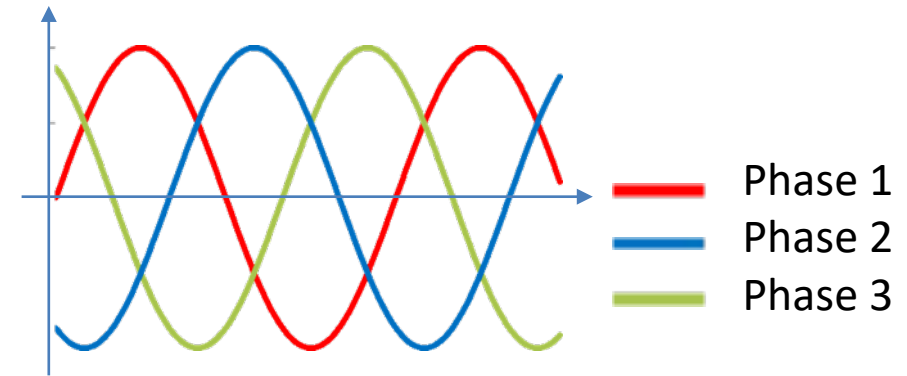
## Courant alternatif

### Le transport de l'énergie s'effectue en triphasé :

-Trois tensions sinusoïdales (50Hz) identiques mais déphasées de 120°

### Avantages du triphasé :

	Monophasé	Triphasé
Nombre de fils	2	3 ou 4
Volume de fils	$V_f = 2 \times L \times S$	$V_f = 4 \times L \times S$
Puissance	$P = VI$	$P = UI\sqrt{3}$



## 7. Electricité

### Avantages du courant triphasé - 1 -

Le courant triphasé est un système d'alimentation électrique qui utilise trois conducteurs porteurs de courant alternatif, déphasés les uns par rapport aux autres de 120 degrés. Ce type de système offre plusieurs avantages par rapport au courant monophasé, notamment en termes de puissance, d'efficacité et d'applications industrielles. Voici quelques-uns des avantages du courant triphasé :

#### 1. Puissance constante :

- La principale caractéristique du courant triphasé est que la puissance disponible est constante. À tout moment, la somme algébrique des courants dans les trois phases est nulle, ce qui signifie que la puissance totale reste relativement stable.

#### 2. Efficacité énergétique :

- Le courant triphasé permet une transmission d'énergie plus efficace que le courant monophasé. Les moteurs triphasés ont un rendement énergétique généralement plus élevé que les moteurs monophasés, ce qui les rend plus efficaces dans de nombreuses applications industrielles.

#### 3. Moteurs électriques plus compacts :

- Les moteurs triphasés sont généralement plus compacts et plus légers que leurs équivalents monophasés pour une puissance donnée. Cela les rend adaptés à un large éventail d'applications industrielles, notamment dans les usines, les systèmes de pompage et les systèmes de climatisation.

## Avantages du courant triphasé - 2 -

### 4. Utilisation efficace de l'énergie :

- Les charges triphasées sont réparties de manière équilibrée entre les trois phases, minimisant ainsi les pertes d'énergie et permettant une utilisation plus efficace de l'électricité.

### 5. Économies sur le câblage :

- Pour une puissance donnée, les systèmes triphasés nécessitent généralement moins de câblage que les systèmes monophasés, ce qui peut entraîner des économies en termes de coûts de câblage.

### 6. Applications industrielles :

- Le courant triphasé est largement utilisé dans les environnements industriels pour alimenter des équipements tels que les moteurs électriques, les compresseurs, les systèmes de chauffage, la climatisation, etc.

### 7. Distribution d'énergie à grande échelle :

- Le courant triphasé est couramment utilisé dans les réseaux de distribution d'énergie à grande échelle, ce qui permet une transmission plus efficace de l'électricité sur de longues distances.

### 8. Contrôle plus précis :

- Les systèmes triphasés permettent un contrôle plus précis de la puissance et de la vitesse des moteurs, ce qui est particulièrement important dans les applications industrielles exigeantes.

A noter que le choix entre le courant triphasé et monophasé dépend des besoins spécifiques de l'application.

Alors que le courant triphasé offre de nombreux avantages dans des contextes industriels, le courant monophasé est souvent utilisé dans les applications résidentielles et légères.

# 7. Electricité

## 7.6. Relation entre puissance, tension et courant

### 7.6. Relation entre puissance, tension et courant

La puissance en courant continu (CC) et la puissance en courant alternatif (CA) sont calculées différemment en raison des caractéristiques distinctes de ces deux types de courants.

#### 1. Puissance en Courant Continu (CC) :

1. En courant continu, la puissance ( $P$ ) est donnée par la formule :  $P=VI$  où  $V$  est la tension en volts et  $I$  est le courant en ampères.
2. Il s'agit d'une formule simple où la puissance est le produit de la tension et du courant.

#### 2. Puissance en Courant Alternatif (CA) :

1. En courant alternatif, la puissance dépend des composants actifs (résistifs) et réactifs du circuit. La puissance apparente ( $S$ ) est le produit de la tension efficace ( $V$ ) et du courant efficace ( $I$ ) :  $S=VI$
2. La puissance active ( $P$ ) est la partie du courant qui accomplit un travail utile dans le circuit (par exemple, chauffage dans une résistance) :  $P=VI\cos(\phi)$  où  $\phi$  (phi) est l'angle de déphasage entre la tension et le courant.
3. La puissance réactive ( $Q$ ) est la partie du courant qui ne réalise pas de travail utile, mais est nécessaire pour maintenir le flux d'énergie dans le circuit :  $Q=VI\sin(\phi)$
4. La puissance totale ( $S$ ) peut également être exprimée en termes de puissance active et réactive :  $S=\sqrt{P^2 + Q^2}$
5. Le facteur de puissance ( $\cos \phi$ ) est défini comme le rapport de la puissance active à la puissance apparente :

## 8. Magnétisme Electromagnétisme

### 8. Induction mutuelle - 1 -

L'induction mutuelle se réfère à l'induction d'une force électromotrice (FEM) dans une bobine due à la variation du courant dans une autre bobine située à proximité. Cela se produit dans un transformateur, par exemple, où deux bobines magnétiquement couplées sont utilisées pour transférer de l'énergie d'une bobine à l'autre.

L'induction mutuelle est un concept en électromagnétisme qui se réfère à l'interaction entre deux circuits magnétiquement couplés. Plus précisément, elle décrit le phénomène par lequel un changement de courant dans un circuit induit une force électromotrice (FEM) dans un autre circuit avec lequel il partage un certain couplage magnétique.

Les points clés à retenir sur l'induction mutuelle sont les suivants :

**1. Bobines Magnétiquement Couplées :** Pour qu'il y ait induction mutuelle, deux bobines doivent être magnétiquement couplées, ce qui signifie qu'elles partagent un champ magnétique commun. Cela se produit généralement lorsque les bobines sont placées à proximité l'une de l'autre.

**2. Variation du Courant :** Lorsqu'il y a une variation du courant dans l'une des bobines, cela crée un champ magnétique variable qui traverse l'autre bobine.

## 8. Magnétisme Electromagnétisme

### 8. Induction mutuelle - 2 -

**3.Loi de Faraday** : La loi de Faraday de l'induction électromagnétique est applicable ici. Elle énonce que le changement du flux magnétique à travers une boucle de fil conducteur induit une force électromotrice (FEM) dans la boucle.

L'induction mutuelle ( $M$ ) entre deux bobines est définie par la relation :  $\varepsilon_2 = -M \frac{di_1}{dt}$  où  $\varepsilon_2$  est la FEM induite dans la deuxième bobine,  $i_1$  est le courant dans la première bobine, et  $M$  est le coefficient d'induction mutuelle.

**4.Orientation de la FEM** : La polarité de la FEM induite dépend du sens du courant dans la première bobine. La loi de Lenz stipule que la FEM induite s'oppose au changement de flux magnétique qui l'a produite.

**5.Unité de Mesure** : L'unité de mesure de l'induction mutuelle est le henry (H). Un henry représente une induction mutuelle d'un volt-seconde par ampère ( $V \cdot s/A$ ).

**6.Applications** : L'induction mutuelle est largement utilisée dans les transformateurs, les dispositifs de couplage inductif, et d'autres applications où la transmission d'énergie entre des circuits magnétiquement couplés est nécessaire.

Les transformateurs sont un exemple classique d'application de l'induction mutuelle. Dans un transformateur, deux bobines magnétiquement couplées sont utilisées pour transférer l'énergie d'une bobine à l'autre, en modifiant généralement les niveaux de tension et de courant. L'induction mutuelle est un concept fondamental pour comprendre le fonctionnement de ces dispositifs.



## 8. Magnétisme Electromagnétisme

### 8. Autoinduction - 1 -

**Autoinduction** : L'autoinduction est un concept en électromagnétisme qui décrit l'induction d'une force électromotrice (FEM) dans une bobine due à la variation de courant dans cette même bobine. En d'autres termes, il s'agit de l'induction électromagnétique qui se produit dans une bobine en raison d'une variation de son propre courant.

Les points clés de l'autoinduction sont les suivants :

**1. Bobine et Champ Magnétique Propre** : Pour qu'il y ait autoinduction, une bobine doit être parcourue par un courant qui varie dans le temps. Lorsque le courant dans la bobine varie, il crée un champ magnétique variable autour de la bobine.

**2. Force Électromotrice (FEM) Induite** : Le champ magnétique variable induit une force électromotrice (FEM) dans la même bobine conformément à la loi de Faraday de l'induction électromagnétique.

**3. Expression Mathématique** : L'expression mathématique de la FEM induite ( $\varepsilon$ ) dans une bobine due à l'autoinduction est donnée par :  $\varepsilon = -L \frac{di}{dt}$  où  $L$  est l'inductance de la bobine,  $i$  est le courant dans la bobine, et  $\frac{di}{dt}$  est la variation temporelle du courant.

**4. Unité de l'Autoinductance** : L'unité de l'inductance ( $L$ ) est le Henry (H).

## 8. Magnétisme Electromagnétisme

### 8. Autoinduction - 2 -

**5. Effet d'Opposition** : L'autoinduction a un effet d'opposition au changement de courant. Cela signifie que la FEM induite s'oppose à la variation de courant qui l'a produite, conformément à la loi de Lenz.

**6. Énergie Stockée** : L'énergie magnétique stockée dans une bobine due à l'autoinduction est donnée par :

$W = \frac{1}{2} LI^2$  où  $W$  est l'énergie,  $L$  est l'inductance, et  $I$  est le courant.

**7. Applications** : L'autoinduction est un phénomène important dans la conception de bobines d'induction, de relais, de transformateurs, et d'autres dispositifs électromagnétiques.

L'autoinduction est un aspect clé du comportement électromagnétique des bobines et est pris en compte dans la conception de nombreux dispositifs électriques où la variation de courant est impliquée.

## 9. Formes et production d'énergie

### 9. 9.3. kWh PCI / PCS

#### 9. Formes et production d'énergie

9.1. Comparaison des énergies (primaire, finale, utile...)

9.2. Rendement

9.3. kWh PCI / PCS

## 9. Formes et production d'énergie

### 9. 9.1. Energie primaire, finale, utile

**L'énergie primaire** est celle disponible dans la nature avant toute transformation.

**L'énergie finale** est celle que reçoit l'utilisateur, comme l'électricité ou le gaz, et qui est facturée.

**L'énergie utile** est la part de l'énergie finale réellement utilisée pour des services spécifiques, comme l'éclairage ou le chauffage.

## 9. Formes et production d'énergie

### 9. 9.3. kWh PCI / PCS - 1 -

**Le pouvoir calorifique**, également appelé « chaleur de combustion », représente la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de volume ou de masse donnée, dans des conditions normales de température et de pression.

La **combustion** est la réaction chimique liée à la combinaison entre une matière combustible (gaz, fioul..), le dioxygène de l'air (appelé « comburant ») et une énergie d'activation en quantité suffisante (une flamme, une étincelle, une source de chaleur, etc.), qui a pour rôle de déclencher le phénomène de combustion.

La combustion complète du combustible, il se dégage du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ainsi que de la chaleur : par unité de masse ou de volume il s'agit de la chaleur de combustion.

On distingue **deux types de pouvoirs calorifiques** : le **Pouvoir calorifique supérieur (PCS)** et le **Pouvoir calorifique inférieur (PCI)**.

## 9. Formes et production d'énergie

### 9. 9.3. kWh PCI / PCS - 2 -

**Le pouvoir calorifique supérieur** est l'énergie thermique libérée lors de la combustion complète d'une unité de combustible. Celle-ci comprend :

- la chaleur dégagée par la combustion, appelée « chaleur sensible » ;
- la chaleur issue de la vapeur d'eau (fumée) produite par la combustion, condensée et ramenée à l'état liquide, appelée « chaleur latente ».

Lors de sa combustion, un matériau combustible génère de l'eau à l'état de vapeur. Pour la vaporisation de 1 kg d'eau, 2 511 kilojoules sont nécessaires : cette énergie, appelée « chaleur latente de vaporisation », se perd généralement avec les gaz de combustion. Certains dispositifs, néanmoins, permettent de récupérer cette énergie contenue dans l'eau de combustion, en la condensant : c'est le cas, par exemple, des chaudières à condensation.

**Le pouvoir calorifique inférieur** est l'énergie thermique libérée lors de la combustion complète d'une unité de combustible, à l'exclusion de la chaleur latente issue de la vapeur d'eau.

Lorsqu'on parle de PCI, la vapeur d'eau produite par la combustion est donc supposée non condensée et non récupérée.

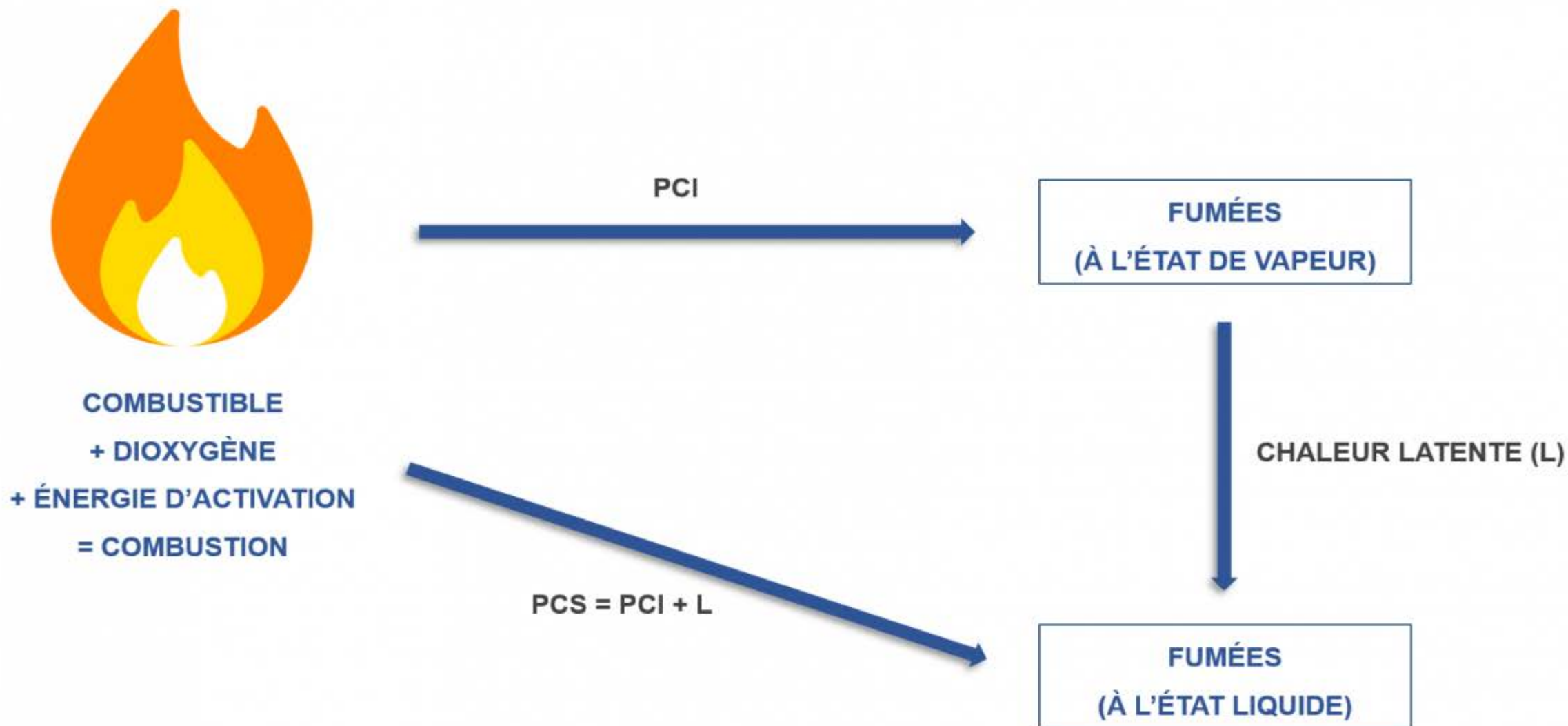
**Le PCI d'un combustible est donc nécessairement inférieur à son PCS.**

Si le combustible ne produit pas d'eau, alors le PCS est égal au PCI. C'est le cas du monoxyde de carbone.



## 9. Formes et production d'énergie

### 9.3. kWh PCI / PCS - 3 -



# 9. Formes et production d'énergie



## 9.9.3. kWh PCI / PCS - 2 -

PCI PCS des principaux combustibles

Combustible	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Rapport PCS/PCI	Rapport PCI/PCS
<b>Gaz naturel</b>	42,5	38,1	1,115	0,896
<b>Fioul domestique</b>	45,9	43,0	1,067	0,937
<b>Essence</b>	46,7	42,5	1,099	0,910
<b>Diesel</b>	45,9	43,0	1,067	0,937
<b>Charbon</b>	34,1	33,3	1,024	0,977
<b>Méthane</b>	55,5	50,1	1,108	0,903
<b>Propane</b>	48,9	45,8	1,068	0,937
<b>Monoxyde de carbone</b>	10,9	10,9	1,000	1,000



# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbines

Une turbine est un dispositif rotatif destiné à utiliser la force d'un fluide (eau, vapeur, air, gaz de combustion), dont le couple est transmis au moyen d'un arbre.

L'énergie du fluide, caractérisée par sa vitesse et son enthalpie, est partiellement convertie en énergie mécanique pour entraîner un alternateur, une pompe ou tout autre récepteur mécanique rotatif.

Les différentes sortes de turbines:

10.1.1. Turbine hydraulique

10.1.2. Turbine à gaz combustible

10.1.3. Turbine à vapeur

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine hydraulique

Une turbine produit un mouvement de rotation à partir d'un mouvement de translation. La puissance fournie, qui peut aller de quelques milliers de watts pour une centrale individuelle (destinée à alimenter une seule habitation) à 500 MW (mégawatts,  $10^6$  Watts) voire plus.

#### Généralités

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs principaux : la pression et le débit.

Une turbine, de quelque type soit-elle, est toujours composée des éléments suivants :

- **Le distributeur** : c'est un organe fixe ou réglable, selon la turbine et les besoins plus ou moins importants de flexibilité dans la production d'énergie. Son rôle est de mettre l'énergie du fluide sous une forme exploitable pour la roue de la turbine.
- **La roue** : Elle est portée par un arbre et transforme l'énergie apportée par le fluide en un mouvement de rotation utilisable directement par l'alternateur.

#### 2 types de turbine:

**Les turbines à action** ont pour caractéristique d'avoir une pression d'entrée égale à la pression de sortie.

**Les turbines à réaction** dans lesquelles la pression à l'entrée de la roue est supérieure à la pression de sortie

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine hydraulique

Puissance mécanique d'une turbine

La puissance mécanique est la puissance disponible à la sortie de la turbine et donc à l'entrée du générateur électrique. L'eau entre sous pression et exerce une force hydrodynamique sur la turbine. Le couple mécanique  $C$  exercé met celle-ci en rotation autour de son axe.

La vitesse de rotation  $\omega$  de la turbine est déterminée par les conditions d'exploitation. La puissance mécanique  $P_{\text{mec}}$  est donnée par le produit du couple par la vitesse de rotation  $\omega$  :

$$P_{\text{mec}} = C \cdot \omega \quad \text{où :} \quad \begin{array}{l} \omega: \text{vitesse de rotation (rad.s}^{-1}\text{),} \\ C: \text{couple (Nm),} \\ P_{\text{mec}}: \text{puissance mécanique (W).} \end{array}$$

Toute transformation d'énergie donne lieu à des pertes. Elles sont de deux types :

les pertes internes de nature purement hydraulique, c'est-à-dire les pertes par frottements et par chocs, les pertes externes par fuite.

Aussi la puissance mécanique obtenue est inférieure à la puissance hydraulique disponible. Le rapport entre ces deux puissances est le rendement de la turbine :

$$\eta_t = \frac{P_{\text{mec}}}{P_{\text{hydt}}}$$

<http://turbines.free.fr/presentation.htm>

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine hydraulique

#### *Puissance hydraulique*

La puissance hydraulique est la puissance fournie à la turbine par l'eau qui l'alimente. Elle dépend de l'énergie hydraulique  $E$  et du débit  $Q$ .

#### *Energie hydraulique*

L'énergie hydraulique massique  $E$  en un point du tube de courant est, selon la loi de Bernoulli, la somme de l'énergie de pression, de l'énergie cinétique et de l'énergie géodésique :

$$E = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + g \cdot Z \quad \text{où:} \quad E : \text{énergie hydraulique massique (J.kg-1),}$$

$V$  : vitesse (m.s-1),

$P$  : pression (N.m-2),

$\rho$  : masse volumique (de l'eau : 1000 kg.m-3),

$g$  : accélération de la pesanteur terrestre : 9,81 m.s-2 à Paris,

$Z$  : hauteur géodésique (m).

La relation entre l'énergie hydraulique massique et la charge hydraulique  $H$  mise à disposition des turbines pour produire de l'énergie mécanique est :  $H = E / g$

$H$  est aussi appelée la chute nette. Elle est égale à la différence entre la chute brute (différence entre le niveau d'énergie à la prise d'eau et le niveau d'énergie en aval de la centrale) et les pertes de charges  $HL$ .

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine hydraulique

Ces pertes correspondent à l'énergie nécessaire pour faire passer l'eau à travers les grilles et vannes et vaincre le frottement avec les parois des canaux. Elles varient selon le carré du débit :  $H_L = A \cdot Q^2$

où :  $H_L$  : pertes de charge (m),

$Q$  : débit ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),

$A$  : coefficient dépendant de la nature des parois et des singularités de forme.

En affectant les indices e et s aux valeurs des grandeurs mesurées à l'entrée et à la sortie de la turbine, le bilan énergétique au passage de la turbine s'écrit :

$$E = g \cdot H = g (H_e - H_s) = \left( \frac{P_e}{\rho} + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot Z_e \right) - \left( \frac{P_s}{\rho} + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot Z_s \right)$$

### *Puissance hydraulique*

La puissance hydraulique fournie à la turbine est donnée par le produit de E par le débit massique :

$$P_{hydr} = \rho \cdot Q \cdot E = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q$$

où  $P_{hydr}$  : puissance hydraulique (W),

$E$  : énergie hydraulique ( $J \cdot kg^{-1}$ ),

$H$  : hauteur de chute nette (m)

$Q$  : débit ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ).

La puissance hydraulique est donc proportionnelle au débit  $Q$  et à la hauteur de chute nette  $H$ .



# 10. Production d'énergie électrique



## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine hydraulique

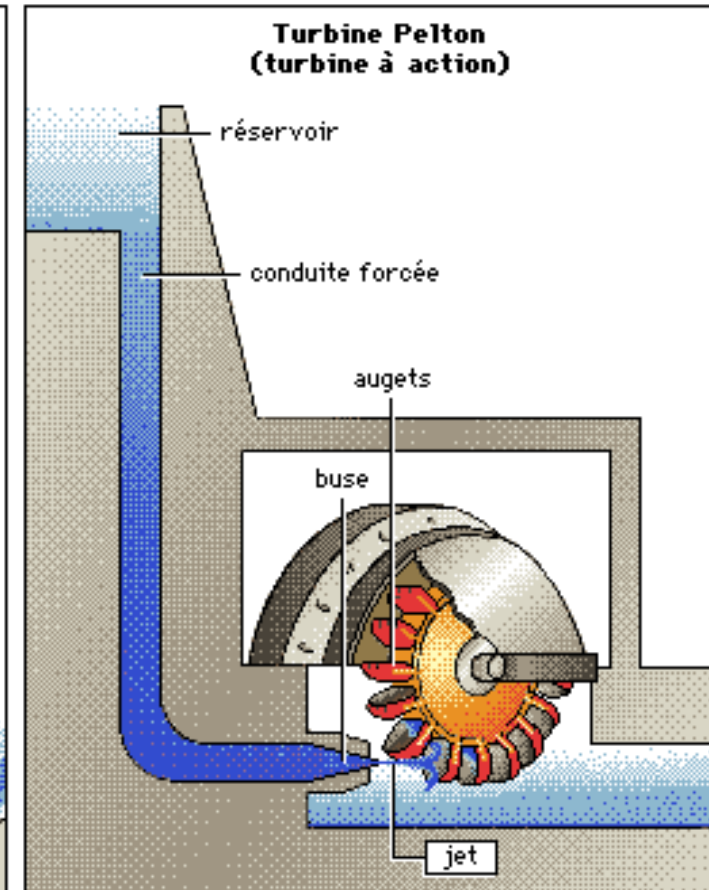
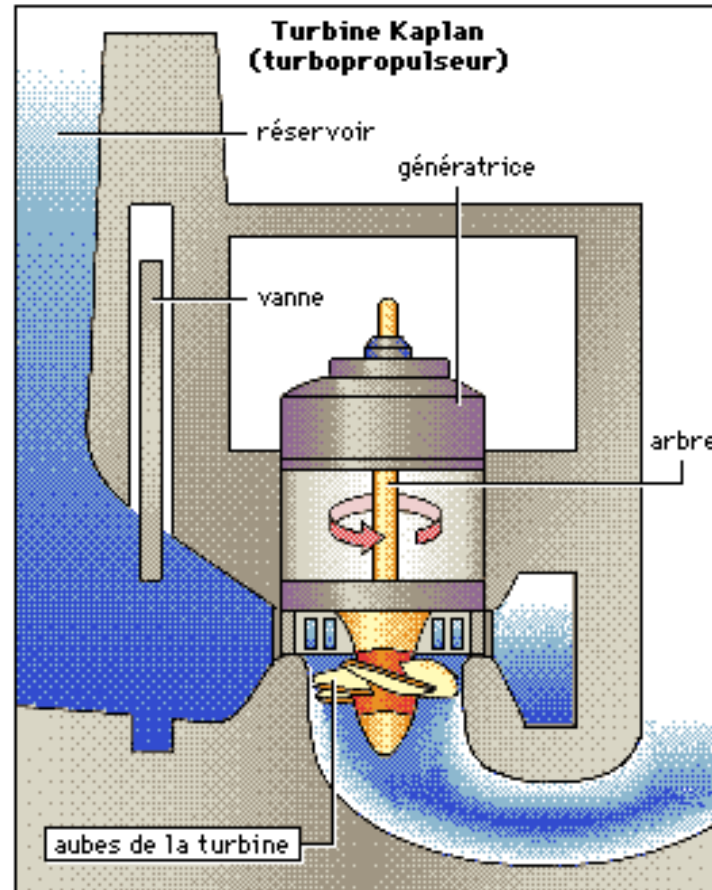
Il existe deux sortes de turbines :

**Les turbines à action** ont pour caractéristique d'avoir une pression d'entrée égale à la pression de sortie.

Elles sont réparties en deux types : Pelton et Crossflow. Ce sont les turbines les plus simples à utiliser, mais ce sont également les moins efficaces du fait de leur faible surface de contact avec l'eau. Un jet intense et concentré exerce une force sur les augets, placés à la périphérie de la pièce tournante, ce même jet est transformé en couple et en puissance mécanique sur l'aube de la turbine.

**Lorsque la pression à l'entrée de la roue est supérieure à la pression de sortie, on parle de turbines à réaction.** Ce sont les turbines Francis et Kaplan.

Grâce à une conception complexe, elles disposent de bons rendements. Une turbine à réaction est une turbine immergée qui utilise à la fois l'énergie résultante de l'eau (énergie cinétique) et celle provenant de la différence de pression. Elle travaille en trois étapes : On crée d'abord un grand tourbillon à l'entrée, grâce à ses aubes, la roue freine ce tourbillon et en transfère l'énergie à l'alternateur qui en fait de l'électricité. Par la suite, l'eau est retournée à la rivière le plus doucement possible.



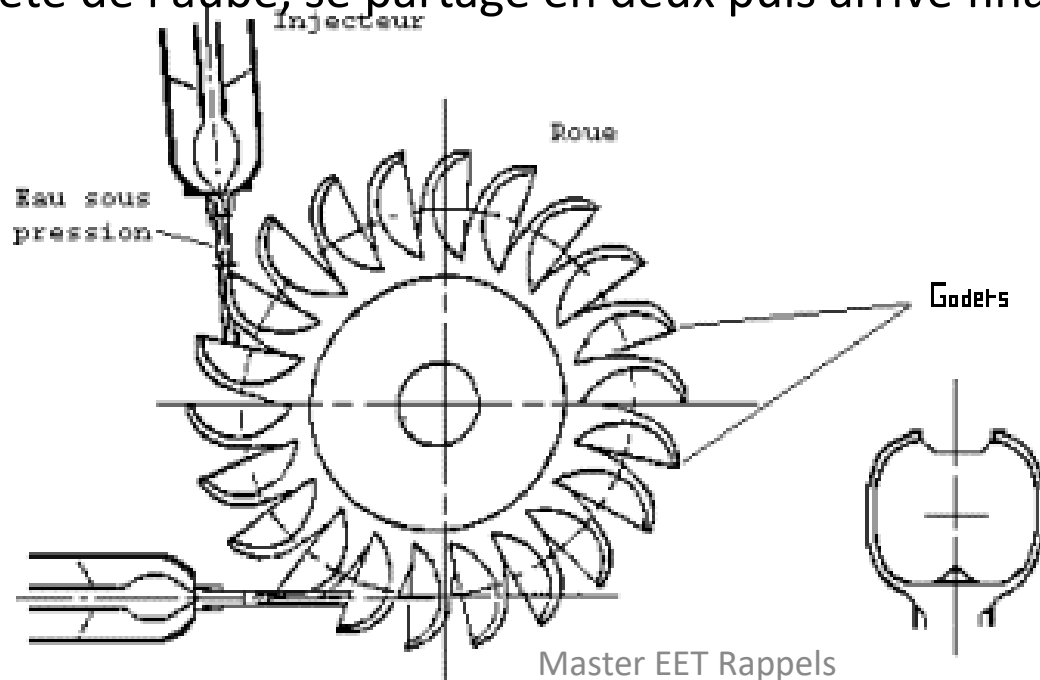
# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine hydraulique à action **Turbine Pelton** :

La turbine Pelton est utilisée dans les hautes chutes, jusqu'à 1800 mètres et de débit assez faible (~25m<sup>3</sup>/seconde). Son diamètre varie de 0.6 à 3.5 mètres.

La roue Pelton est entraînée par un ou plusieurs jets d'eau. Ceux-ci sortent de l'injecteur à une vitesse de 500 km à l'heure (140 mètres par seconde), après une chute de 1000 mètres. On trouve un pointeau mobile qui permet de régler le débit à l'intérieur de l'injecteur. Les aubes de la turbine sont partagées par une arête médiane qui relie deux godets. Ces godets sont constitués de manière à laisser l'eau s'échapper sur les côtés. Le jet d'eau frappe l'arête de l'aube, se partage en deux puis arrive finalement dans les godets.



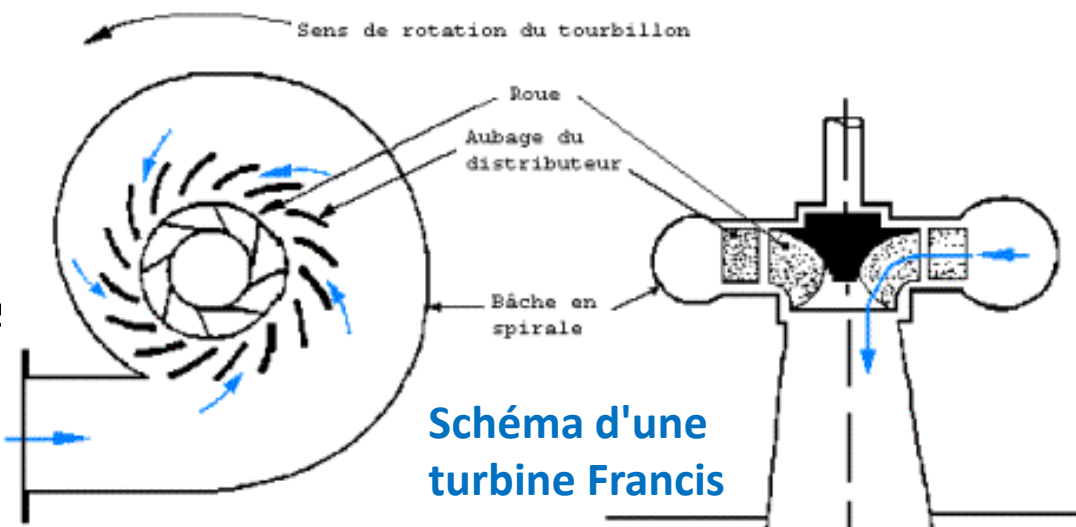


# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine Francis :

Cette turbine est la plus répandue. Elle permet la valorisation de chutes de faible ou moyenne hauteur (de 40 à 700 mètres) et peut développer une puissance très importante. Son diamètre varie de 0.6 à 8 mètres. Elle est constituée d'une conduite en colimaçon (bâche en spirale) qui conduit l'eau à un distributeur. Le distributeur est constitué par une série de directrices (aubages) qui guident l'eau vers la roue. La roue de la turbine est placée à l'intérieur des distributeurs.





# 10. Production d'énergie électrique



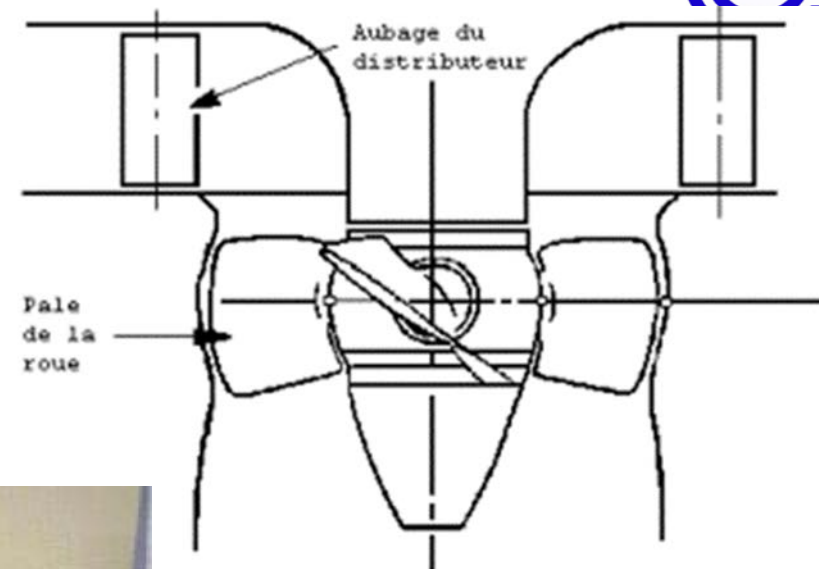
## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine hydraulique à réaction **Turbine Kaplan:**

Les turbines Kaplan et à hélices sont employées en cas de faibles chutes (de 15 à 30m). Les puissances correspondantes peuvent varier de quelques kW à plusieurs centaines de kW. Ce sont des turbines que l'on retrouve au fil de l'eau et qui donc n'ont pas de réservoir, leur diamètre varie de 1 à 11 mètres. En général les turbines hélices se retrouvent en grand nombre dans une centrale. Ces turbines se caractérisent par une roue en forme d'hélice dont les pales peuvent être réglables en marche (dans le cas d'une Kaplan).

On les classe en fonction du type d'écoulement :

- débits constants : une turbine hélice à pales et distributeur fixes.
- débits élevés et peu variables : une turbine hélice à pales fixes et un distributeur mobile.
- débits variants entre 30 et 100 % du débit nominal : une turbine Kaplan à pales variables et distributeur fixe.
- débits variants entre 15 et 100 % du débit nominal : une turbine Kaplan à pales et distributeur réglables.



# 10. Production d'énergie électrique

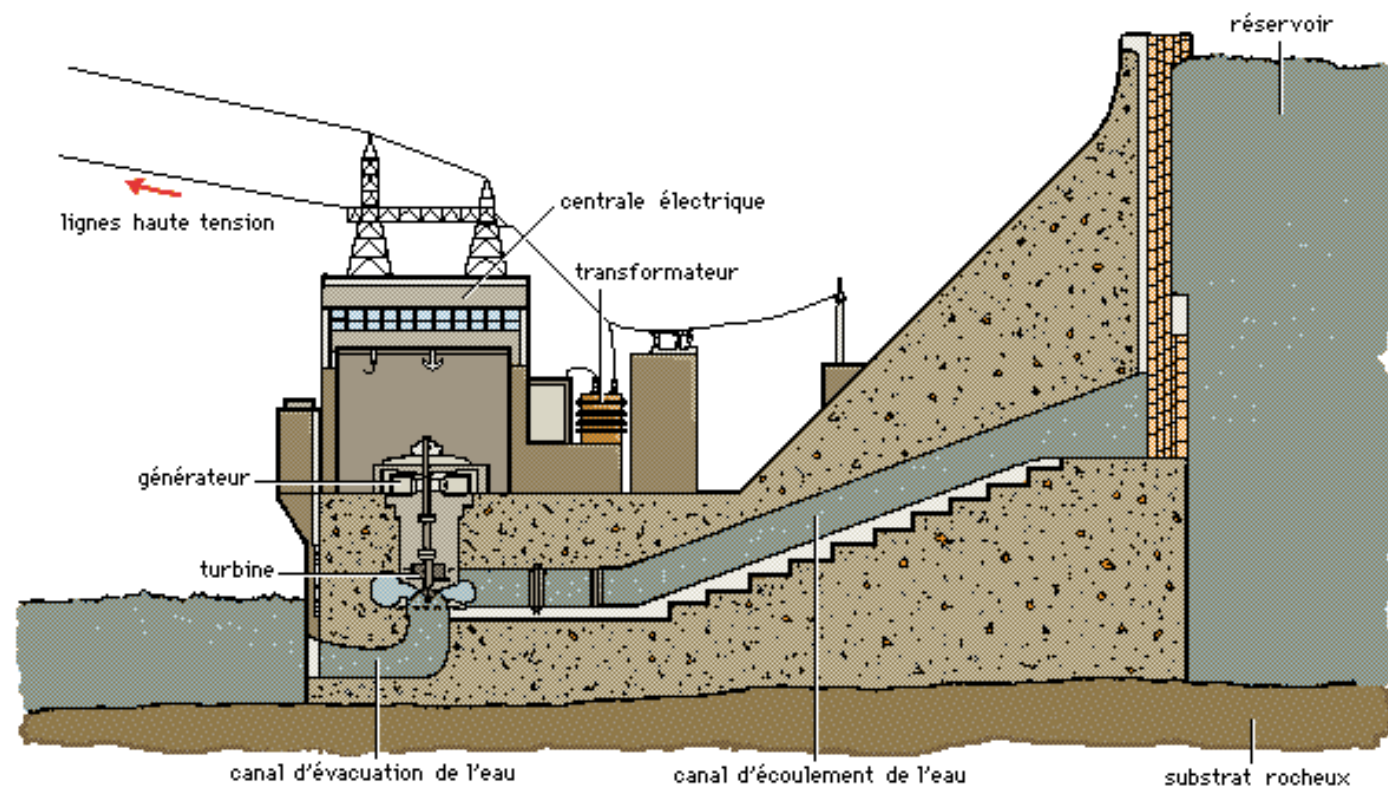
## 10.1. Turbine

### 10.1. Rôle de la turbine hydraulique par rapport aux autres éléments de la centrale

Une centrale hydraulique utilise l'énergie cinétique fournie par une masse d'eau en mouvement pour produire de l'énergie électrique. Un barrage, lui, transforme d'abord l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau qu'il retient en énergie cinétique par écoulement, puis en énergie électrique.

Dans tous les cas, la turbine possède toujours le même rôle : c'est un système destiné à transformer un mouvement de corps fluide (ici, il s'agit de l'eau), qui peut s'apparenter à un mouvement de translation rectiligne, en un mouvement de rotation.

La turbine entraîne à son tour un alternateur, qui va produire de l'énergie électrique, qui, par le biais d'un réseau électrique (EDF pour les centrales importantes françaises), va alimenter des foyers et des entreprises en électricité.



# 10. Production d'énergie électrique



## 10.1. Turbine

### 10.1.1. Turbine à gaz

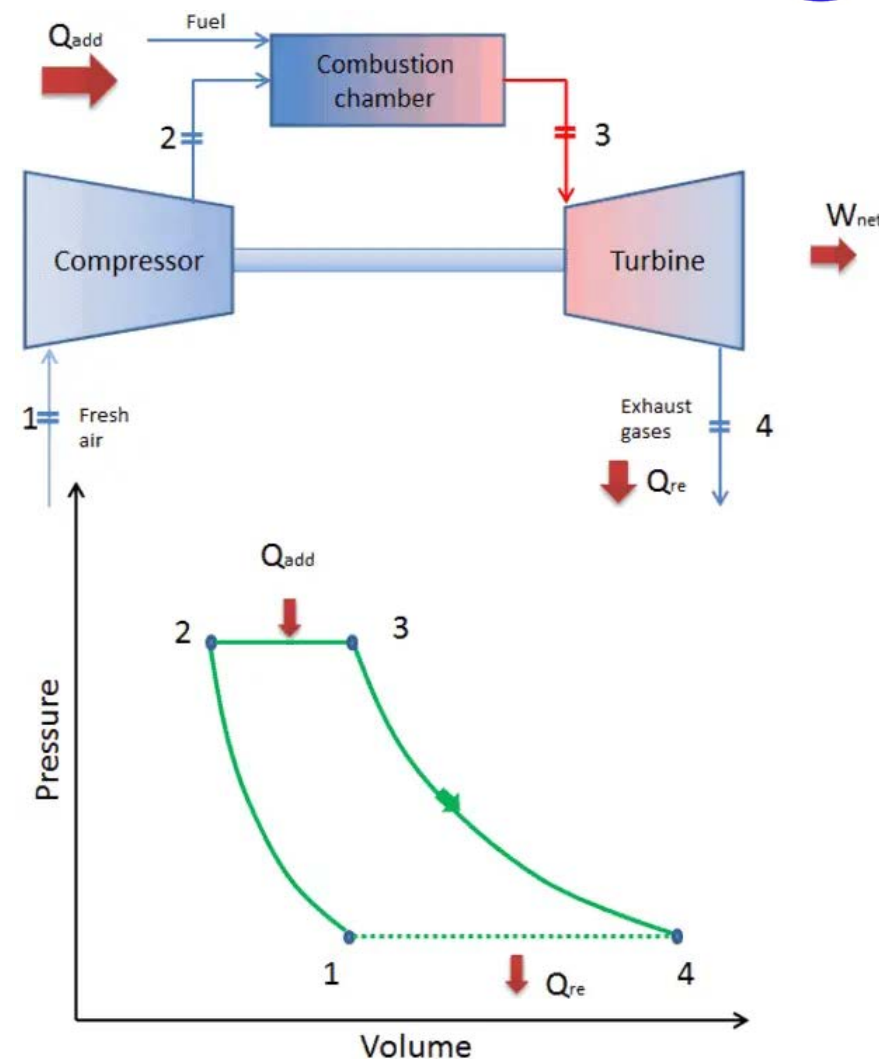
Une turbine à gaz est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire de l'énergie mécanique (rotation d'un arbre) à partir de l'énergie contenue dans un hydrocarbure (fuel, gaz...).

#### Principe de fonctionnement

La turbine à gaz est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu. C'est une différence fondamentale par rapport aux moteurs à pistons qui réalisent une succession temporelle des phases dans un même organe (généralement un cylindre). Dans sa forme la plus simple, la turbine à gaz fonctionne selon le cycle de **Brayton** (1872, George Bailey Brayton) comprenant successivement:

- 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.

Le rendement est le rapport du travail utile (travail de détente – travail de compression) à la chaleur fournie par la source chaude. Le rendement théorique croît avec le taux de compression et la température de combustion. Il est supérieur à celui du cycle Diesel car sa détente n'est pas écourtée.



# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine à gaz

La turbine à gaz est le plus souvent à cycle ouvert et à combustion interne. Dans ce cas, la phase de refroidissement est extérieure à la machine et se fait par mélange à l'atmosphère. La turbine à gaz peut également être à cycle fermé et à combustion externe. Le chauffage et le refroidissement sont alors assurés par des échangeurs de chaleur. Cette disposition plus complexe permet l'utilisation de gaz particuliers ou de travailler avec une pression basse différente de l'ambiante.

Le cycle de base décrit plus haut peut être amélioré par différents organes complémentaires :

- récupération de chaleur à l'échappement : les gaz détendus en sortie de turbine traversent un échangeur pour préchauffer l'air comprimé avant son admission dans la chambre de combustion,
- compression refroidie : la compression comprend deux étages (ou plus) séparés par un échangeur de chaleur (air/air ou air/eau) refroidissant l'air. La puissance nécessaire à la compression s'en trouve réduite au bénéfice du rendement.
- combustion étagée : la détente comprend deux étages (ou plus) séparés par un ou des réchauffages additionnels. La puissance fournie est accrue d'où amélioration du rendement.

Les deux dernières dispositions visent à tendre vers des transformations isothermes en lieu et place des adiabatiques et se justifient surtout sur les machines à taux de compression élevé. Les trois dispositifs peuvent être réalisés indépendamment ou simultanément. Dans ce cas, on retrouve le cycle dit de Ericsson qui comme le cycle de Stirling présente un rendement théorique égal au rendement maximal du cycle de Carnot. Cette supériorité théorique par rapport aux cycles Otto et Diesel est cependant contrebalancée par l'impossibilité pratique de réaliser les transformations isothermes. Dans tous les cas, ces dispositifs sont réservés aux installations stationnaires du fait de l'encombrement et du poids des échangeurs gaz/gaz

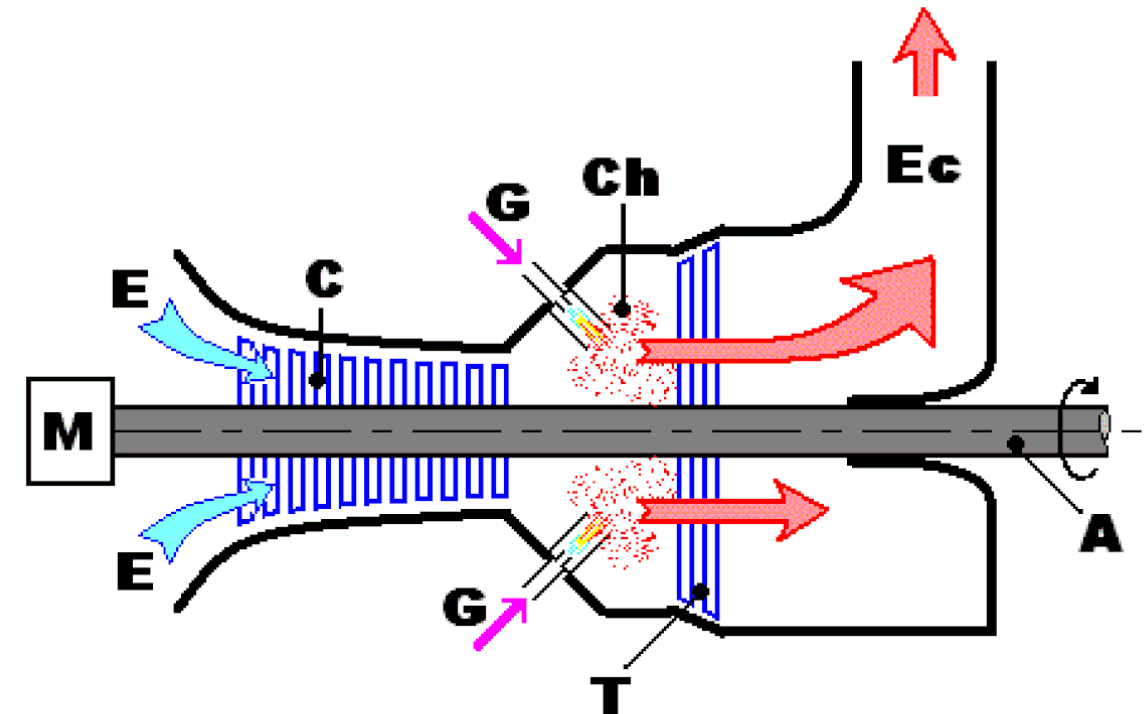
# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Schéma d'une turbine à gaz

Le compresseur (repère C), constitué d'un ensemble de roues munies d'ailettes, comprime l'air extérieur (rep. E), simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars, voire 30 bars pour certains modèles. Du gaz (rep. G), ou un combustible liquide atomisé, est injecté dans la chambre de combustion (rep. Ch) où il se mélange à l'air comprimé et s'enflamme. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine (rep. T), où l'énergie thermique des gaz chauds est transformée en énergie mécanique, la dite Turbine est constituée d'une ou plusieurs roues également munies d'ailettes et s'échappent par la cheminée (rep. 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'une machine réceptrice (pompe, alternateur...).

accouplé à son extrémité droite. Pour la mise en route, on utilise un moteur de lancement (rep. M) qui joue le rôle de démarreur. Le réglage de la puissance et de la vitesse de rotation est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant.



*Coupe longitudinale d'une turbine à gaz  
Principaux organes*

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine à gaz

#### **Rendement**

Le rendement faible de la turbine à gaz (25 à 35%) est dû au fait que l'énergie fournie par le combustible est détournée par le compresseur ou perdue sous forme de chaleur dans les gaz d'échappement.

- Il est possible d'améliorer légèrement le rendement en augmentant la température dans la chambre de combustion (plus de 1200°C) mais on se heurte au problème de tenue des matériaux utilisés pour la réalisation de la partie turbine. C'est en récupérant la chaleur des gaz d'échappement (chauffage, production de vapeur...) que le rendement global de la machine peut dépasser 50%. On utilise alors la chaleur des gaz d'échappement (plus de 500 degrés) pour produire de la vapeur dans une chaudière.
- Une autre possibilité d'augmenter le rendement de la turbine, est de réchauffer les gaz en sortie des étages de compression (avant les chambres de combustion) en les faisant passer dans un échangeur situé dans le flux des gaz d'échappement. On arrive ainsi à se rapprocher des rendements d'un moteur diesel semi rapide. C'est par exemple le principe de fonctionnement de la turbine WR21 de Rolls Royce.
- La vapeur produite est ensuite utilisée de deux manières :
  - La centrale à cycle combiné où une turbine à vapeur complète la turbine à gaz pour actionner un alternateur, le rendement global atteint alors 55% voire 60% dans les dernières centrales à l'étude.
  - la cogénération où la vapeur produite est utilisée dans un autre domaine (papeterie...)

On fabrique des turbines à gaz de puissances allant de quelques kilowatts à plusieurs centaines de mégawatts.

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine à gaz

#### Limites techniques. Avantages

Bien que théoriquement supérieure au moteur Diesel, la turbine à gaz présente de sévères limitations dues aux contraintes techniques de sa réalisation. Ces **principales limites** sont les suivantes :

- taux de compression (et donc rendement) limité par le nombre d'étage de compression nécessaires,
- baisse importante de rendement des compresseurs centrifuges à un régime plus faible que le régime nominal,
- température de combustion (et donc rendement) limitée par la résistance mécanique de la turbine.
- chute importante du rendement à charge partielle en particulier pour les machines à simple arbre.
- coût d'usinage des aubages notamment de la turbine.
- Inaptitude aux arrêts et démarrages fréquents et peu progressifs.
- Coût de maintenance plus élevé que pour un moteur diesel
- Bien qu'à l'étude, les turbines à gaz ne peuvent pas brûler de fioul lourd contrairement au moteur diesel. Elles utilisent donc des carburants chers.

**Les avantages** inhérents à ce type de machine sont les suivants :

- puissance massique et volumique très élevée du fait du fonctionnement continu,
- simplicité apparente de construction (un rotor dans un carter et un brûleur) et équilibrage (peu de vibrations),
- pollution limitée en HC et NOx du fait de l'excès d'air et de la température limitée,
- aptitude à la récupération de chaleur (cogénération),
- longévité en marche stationnaire.
- aptitude potentielle à utiliser des combustibles variés et de moindre qualité (gaz pauvre, fuel lourd).

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1. Turbine à gaz

#### Applications

Les applications des turbines à gaz découlent directement de leurs avantages spécifiques. Ainsi, la puissance massique élevée se prête bien à la **propulsion aéronautique** en particulier sur les hélicoptères. La **propulsion navale** fait également de plus en plus appel aux turbines à gaz notamment pour les navires à grande vitesse. Il existe enfin des exemples d'application à la **propulsion ferroviaire** mais limités le plus souvent à l'Amérique du Nord et à des véhicules militaires comme des chars d'assaut (XM-1 Abrams ou Leclerc).

Par contre, **la turbine à gaz est mal adaptée aux véhicules routiers**. En effet, les variations de charge et de régime sont trop importantes et trop rapides pour être réalisables avec un rendement correct. De plus, le rendement atteint difficilement 30% pour des moteurs compacts et de faible puissance alors que les Diesel actuels dépassent 40%. Par contre, elles pourraient trouver un regain d'intérêt pour les chaînes de propulsion hybrides en particulier sur les poids lourds, où l'installation des échangeurs (notamment récupérateur sur échappement) est moins problématique.

L'autre grand domaine d'emploi des turbines à gaz est la **production d'électricité**. En effet, il s'agit d'applications à régime constant et à charge relativement constante pour lesquelles le rendement de ces machines est le meilleur. La puissance varie de quelques centaines de kW à près de 300 MW. Les machines les plus puissantes sont en général associées à des turbines à vapeur dans des cycles combinés dont le rendement global tend actuellement vers 60%. En cycle simple, le rendement est de l'ordre de 30 à 35% voire plus pour les grosses machines. Dans les faibles puissances, le rendement est même inférieur à 30% mais on met alors à profit l'aptitude des turbines à combustion pour la récupération de chaleur dans des applications de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur).



# 10. Production d'énergie électrique



## 10.1. Turbine

### 10.1.1. Turbine à vapeur

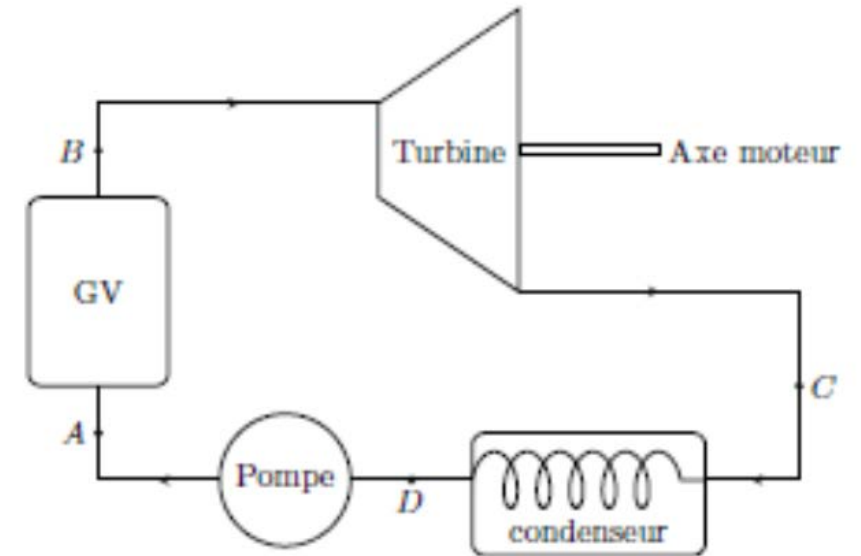
#### •Cycle de Rankine ( 1859)

Aujourd'hui, le cycle de Rankine est le cycle de fonctionnement fondamental de toutes les centrales thermiques où un fluide de fonctionnement est continuellement évaporé et condensé.

#### *Installation:*

Le fluide moteur utilisé est l'eau, facilement vaporisable et condensable. L'eau parcourt en circuit fermé l'installation (voir schéma) :

- . de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement isobare du liquide à la pression  $P_2 = 55 \text{ bar}$  jusqu'à un état de liquide saturant (état A0), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (état B);
- . de B à C : détente adiabatique réversible dans la turbine, de la pression  $P_2$  à la pression  $P_1 = 43 \text{ mbar}$
- . en C, le fluide est diphasé
- . de C à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant
- . de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ , du liquide saturant sortant du condenseur.



crédit Étienne Thibierge

## 10.1. Turbine

### 10.1.1. Turbine à vapeur

#### •Cycle de Rankine avec détente étagée

*Installation:*

Le cycle réel est plus compliqué que celui étudié précédemment. En effet, d'une part, la détente est étagée : elle se fait d'abord dans une turbine « haute pression » puis dans une turbine « basse pression ». D'autre part, entre les deux turbines, l'eau passe dans un « surchauffeur ». Les transformations subies:

. de A à B : dans le générateur de vapeur, échauffement

isobare du liquide à la pression  $P_2 = 55$  bar, jusqu'à un état de liquide saturant (état noté A0), puis vaporisation totale isobare jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B)

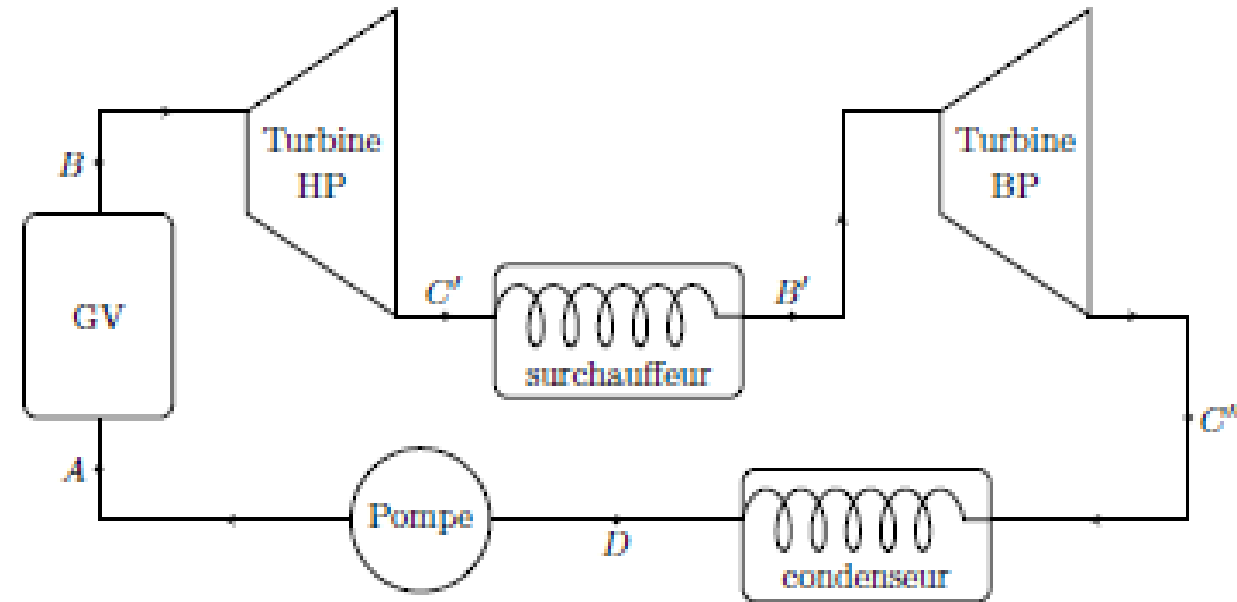
. de B à C0 : détente adiabatique réversible dans la turbine haute pression, de la pression  $P_2$  à la pression  $P_3 = 10$  bar

. de C0 à B0 : échauffement isobare à la pression  $P_3$ , dans le surchauffeur, jusqu'à un état de vapeur saturante sèche (point B0) ;

. de B0 à C00 : détente adiabatique réversible dans la turbine basse pression, de la pression  $P_3$  à la pression  $P_1 = 43$  mbar;

. de C00 à D : liquéfaction totale isobare dans le condenseur, jusqu'à un état de liquide saturant

. de D à A : compression adiabatique réversible, dans la pompe d'alimentation, de la pression  $P_1$  à la pression  $P_2$ , du liquide saturant sortant du condenseur.



crédit Étienne Thibierge

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1.1. Turbine à vapeur turbine HP

La plupart des centrales nucléaires utilisent un turbogénérateur à un seul arbre composé d'une turbine HP à plusieurs étages et de trois turbines parallèles à plusieurs étages, d'un générateur principal et d'un exciteur.

#### **Turbine HP – Turbine à vapeur haute pression**

HP Turbine ( turbine à haute pression) est généralement un élément de turbine à double flux avec un étage de contrôle des impulsions suivi par des aubes de réaction à chaque extrémité de l'élément. Il y a environ 10 étages avec des aubes enveloppées dans la turbine HP. Il produit environ 30 à 40% de la puissance brute de la centrale.

La turbine HP est généralement équipée de 3 ou 4 lignes d'extraction à autorégulation, qui servent à fournir de la vapeur pour:

le dégazeur

les réchauffeurs d'eau d'alimentation haute pression

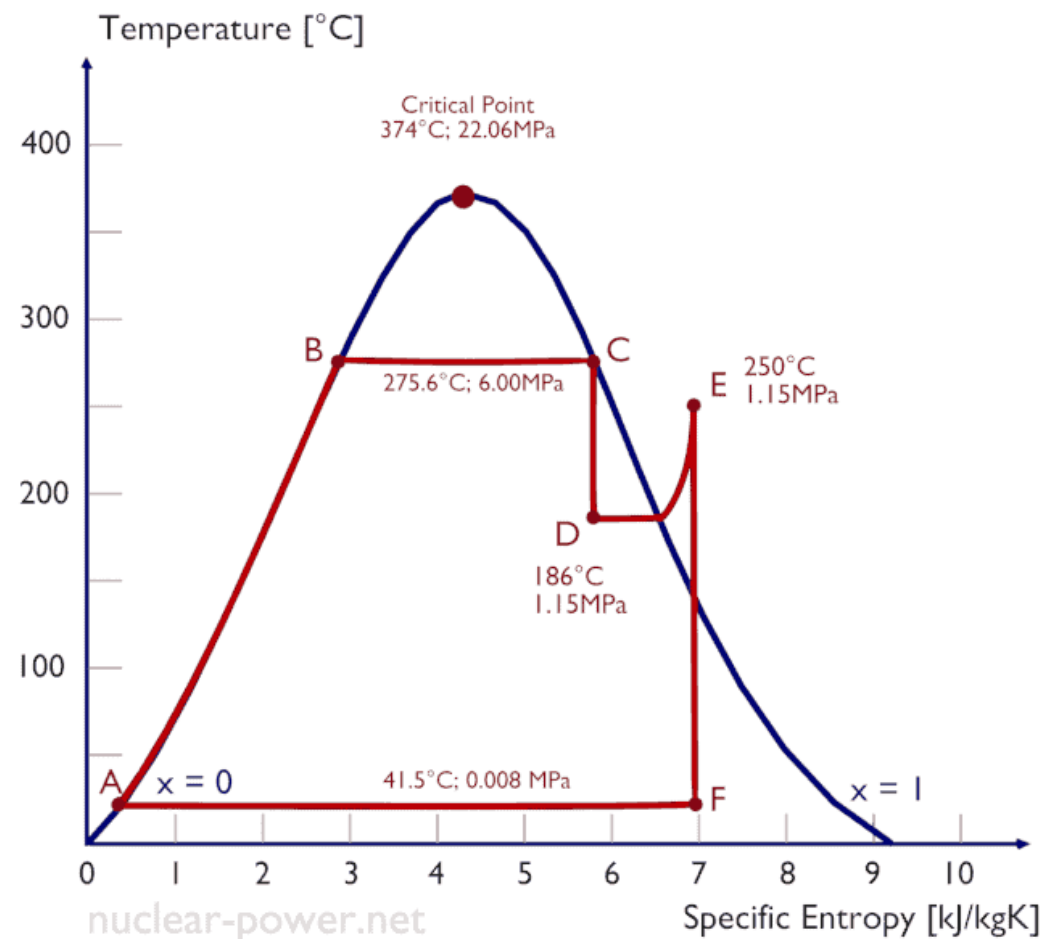
les pompes d'eau d'alimentation (lorsqu'elles sont entraînées par des turbines à vapeur)

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Turbine

### 10.1.1. Turbine à vapeur turbine HP

Dans la turbine HP, l'étage haute pression reçoit de la vapeur (cette vapeur est une vapeur presque saturée –  $x = 0,995$  – point C sur la figure; 6 MPa ; 275,6 ° C) provenant d'un générateur de vapeur et l'évacue vers un séparateur-réchauffeur d'humidité (MSR – point D –  $\sim 1,15$  MPa ;  $\sim 186$  ° C;  $x \approx 0,9$ ). La vapeur doit être réchauffée afin d'éviter des dommages pouvant être causés aux aubes de turbine à vapeur par de la vapeur de qualité inférieure . Une teneur élevée en gouttelettes d'eau peut provoquer l'impact et l'érosion rapides des pales lors de la projection d'eau condensée sur les pales. Le réchauffeur réchauffe la vapeur (point D), qui est ensuite dirigée vers l'étage basse pression de la turbine à vapeur, où elle se détend (points E à F).



# 10. Production d'énergie électrique



## 10.1. Turbine

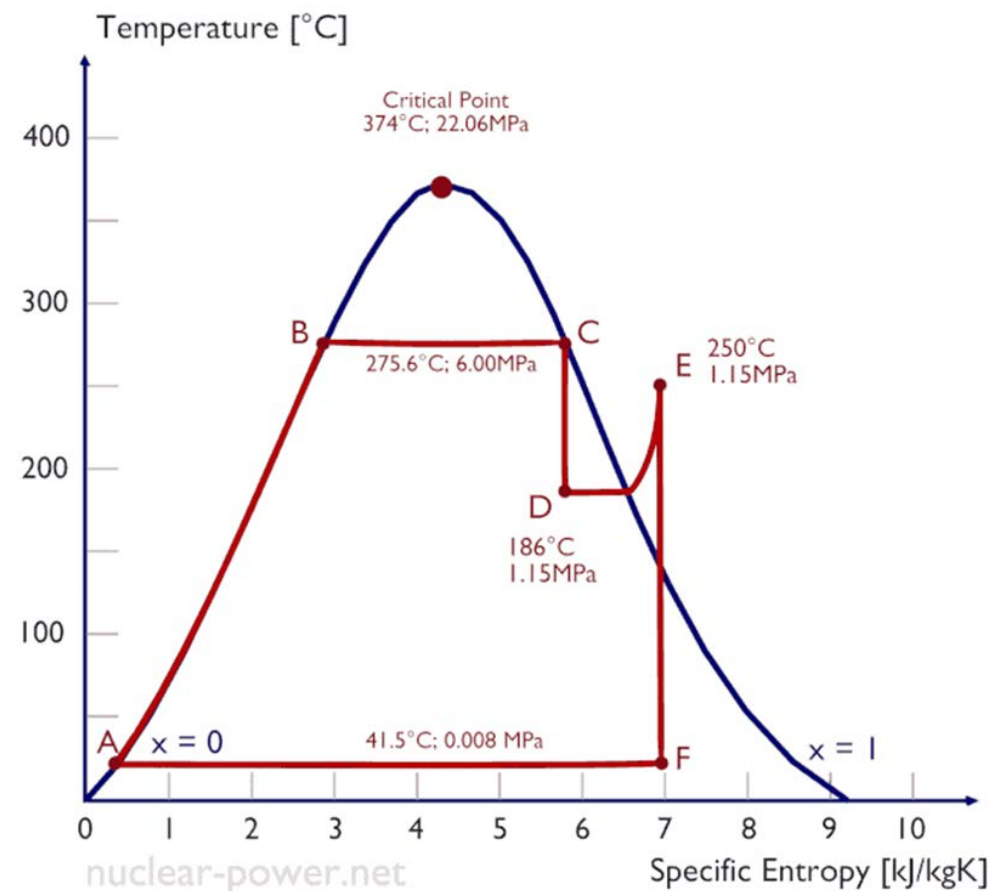
### 10.1.1. Turbine à vapeur LP – 1 -

Chaque turbine LP ( turbine à basse pression) est généralement une turbine à réaction à double flux comportant environ 5 à 8 étages (avec des aubes à enveloppe et des aubes libres des 3 derniers étages). Les turbines BP produisent environ 60 à 70% de la puissance brute produite par le groupe électrogène.

Chaque rotor de turbine est monté sur deux roulements, c'est-à-dire qu'il existe des doubles roulements entre chaque élément de la turbine.

La turbine BP est généralement équipée de 3 ou 4 lignes d'extraction à autorégulation, qui servent à fournir de la vapeur pour les réchauffeurs d'eau d'alimentation basse pression.

Dans la turbine BP, l'étage basse pression reçoit de la vapeur (cette vapeur est généralement de la vapeur surchauffée – point E sur la figure; ~ 1,15 MPa ; 250 ° C) provenant d'un réchauffeur séparateur d'humidité (MSR). La vapeur exempte d'humidité est surchauffée par la vapeur d'extraction de l'étage haute pression de la turbine et par la vapeur directement des lignes de vapeur principales.



# 10. Production d'énergie électrique

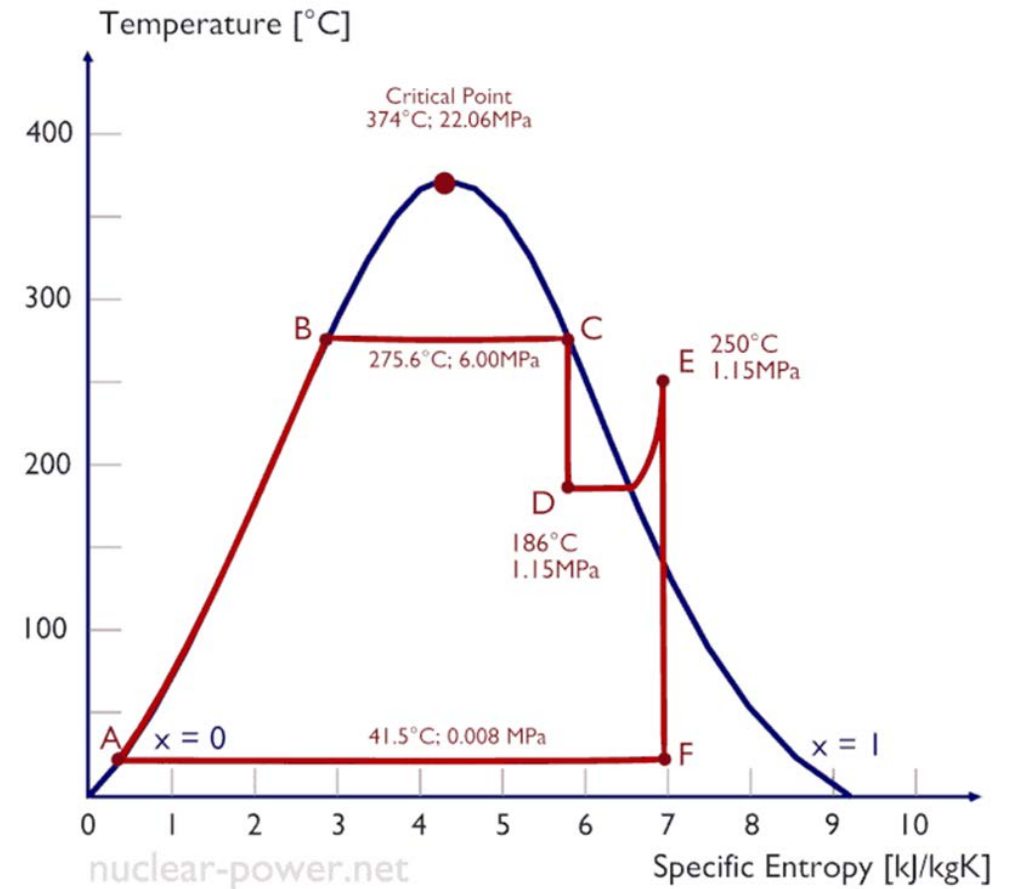


## 10.1. Turbine

### 10.1.1. Turbine à vapeur LP - 2 -

Dans la turbine à basse pression, la vapeur se détend en continu du point E au F. La vapeur évacuée se condense ensuite dans le condenseur et se trouve à une pression bien inférieure à la pression atmosphérique (pression absolue de 0,008 MPa ). La vapeur est à l'état partiellement condensé (point F), d'une qualité voisine de 90%.

Les étages haute pression et basse pression de la turbine sont généralement sur le même arbre pour entraîner un générateur commun, mais ils ont des boîtiers distincts. Le générateur principal produit de l'énergie électrique qui est fournie au réseau électrique.

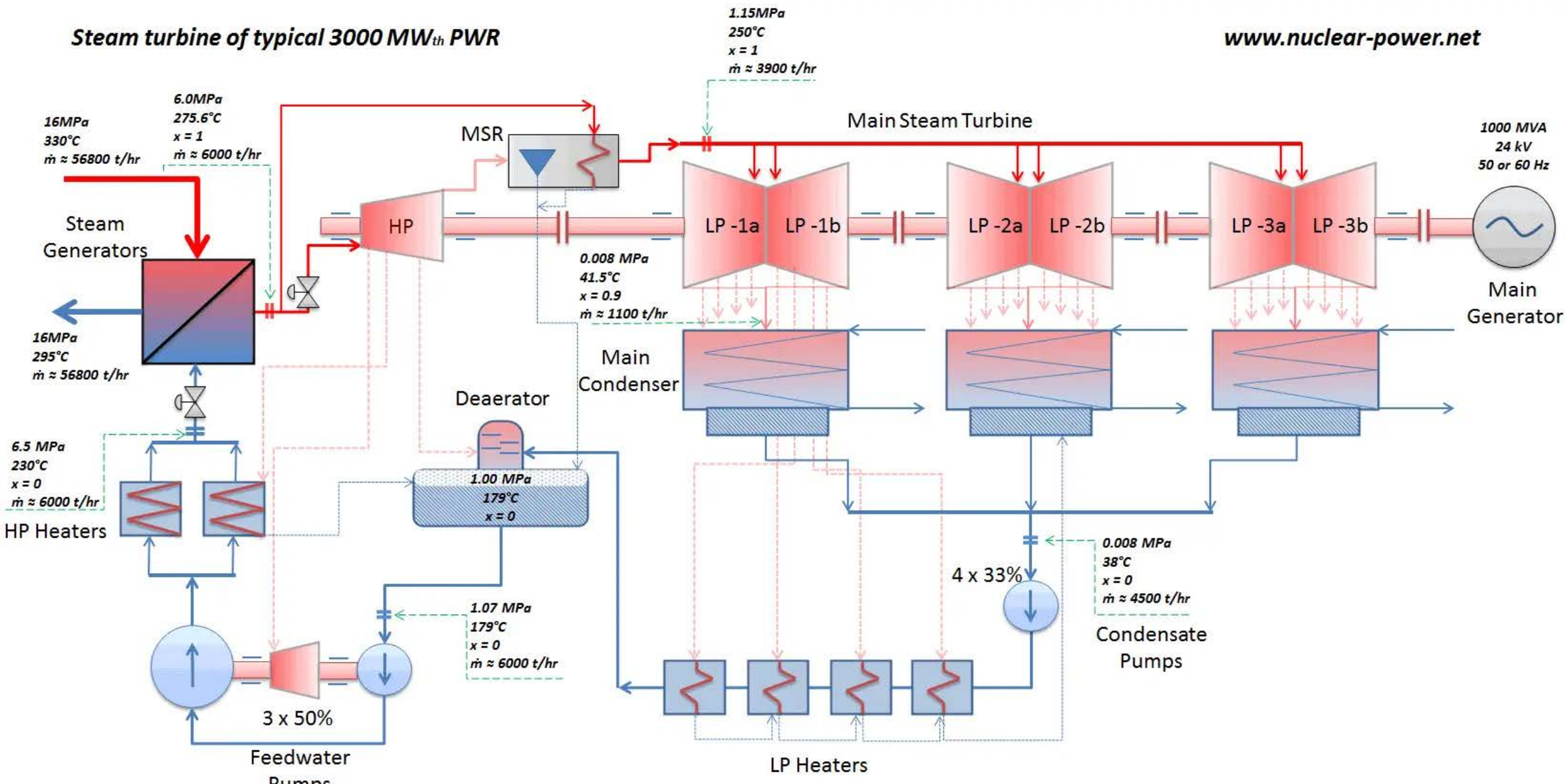


# 10. Production d'énergie électrique



**Steam turbine of typical 3000 MW<sub>th</sub> PWR**

[www.nuclear-power.net](http://www.nuclear-power.net)





# 10. Production d'énergie électrique

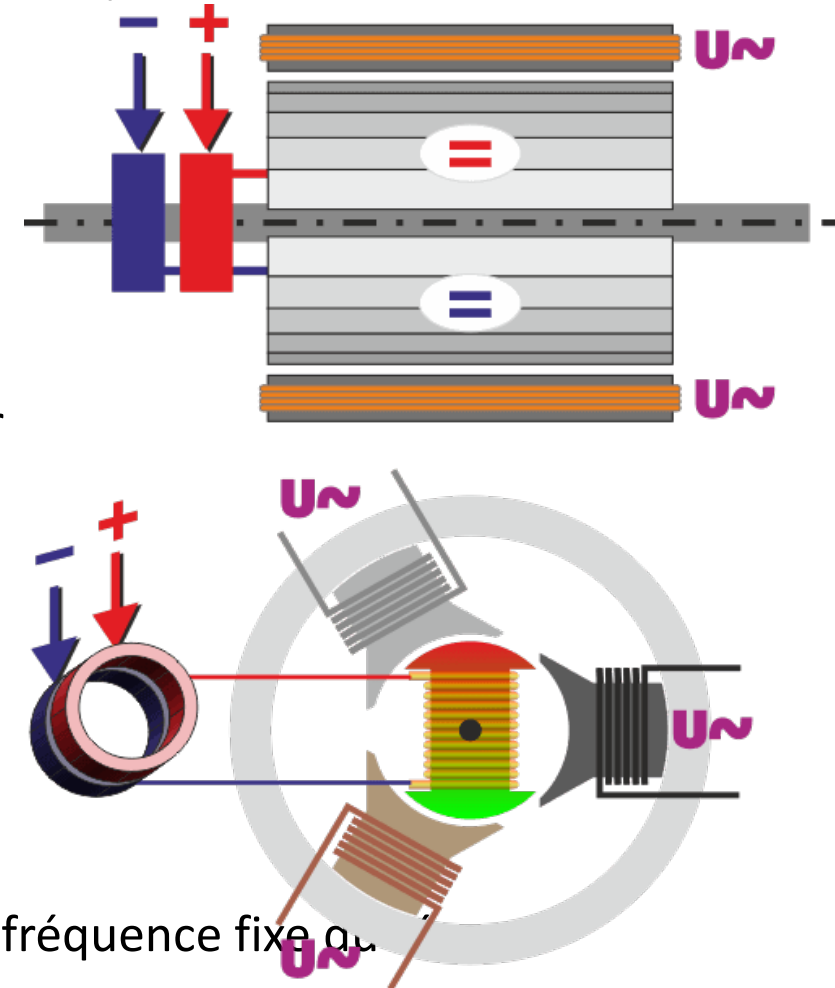
## 10.2. Alternateur Fonctionnement général

L'inducteur (roue polaire ou bobine d'excitation) qui produit le champ magnétique est un rotor.

L'inducteur produit un champ magnétique tournant. Pour produire ce champ, il faut du courant électrique, qui est apporté par deux balais qui glissent sur deux anneaux isolés. Le courant dans l'inducteur doit être continu. La rotation du bobinage (rotor) produit un champ alternatif dans l'induit. L'inducteur est toujours alimenté en continu.

Le courant est récolté sur l'induit. Ce sont des bobinages fixes (stator). L'avantage est que le courant ne doit pas être capté par des balais du rotor comme dans le cas d'une dynamo. Les balais qui encaissent un très fort courant chauffent, s'usent.

On utilise parfois un rotor avec des aimants permanents, ce qui permet d'éliminer la bobine d'excitation. Ce type de générateur est utilisé avec un convertisseur, car la tension en sortie ne peut pas être stabilisée par modification du courant d'excitation. Ce montage est utilisé dans les éoliennes de petite et moyenne taille, car elles nécessitent de toute façon un convertisseur pour adapter la fréquence variable de la génératrice à la fréquence fixe qu'





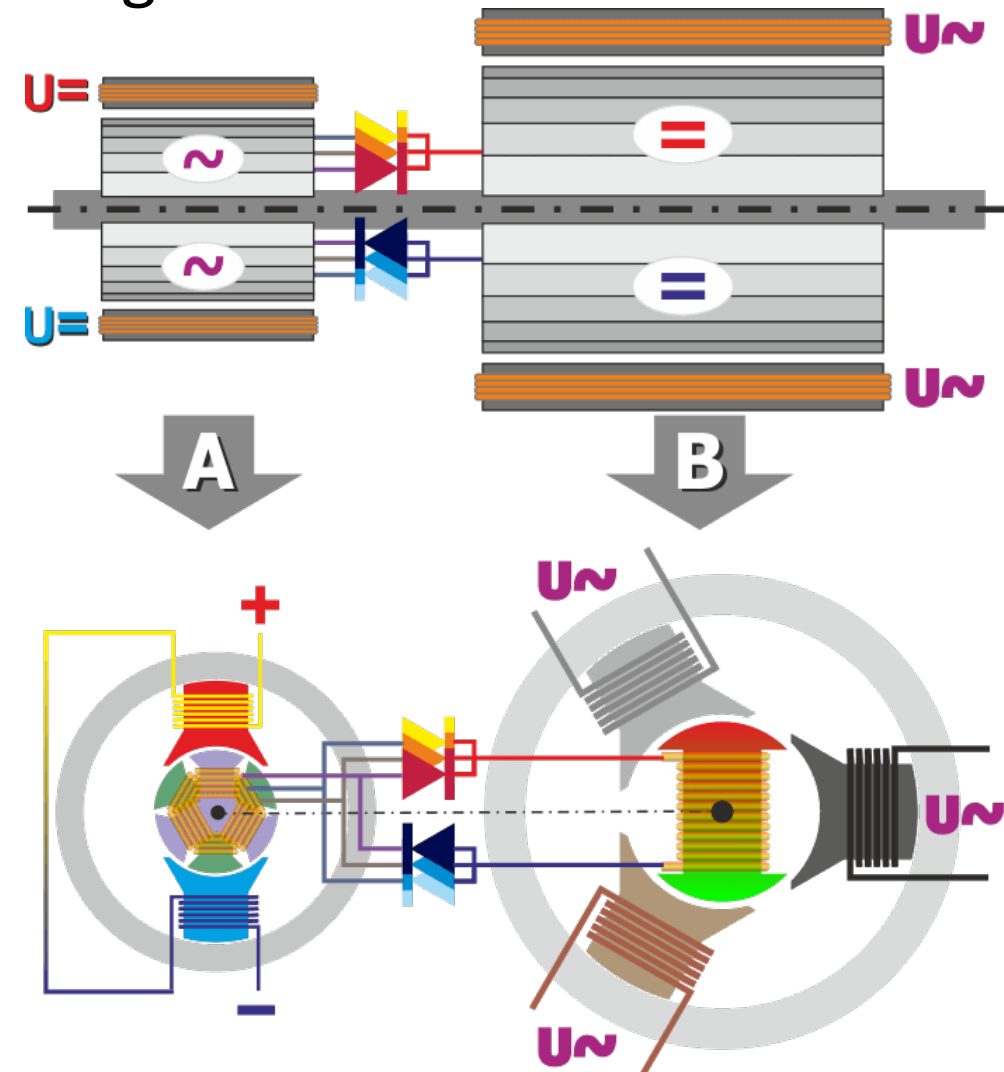


# 10. Production d'énergie électrique



## 10.2. Alternateur double étage

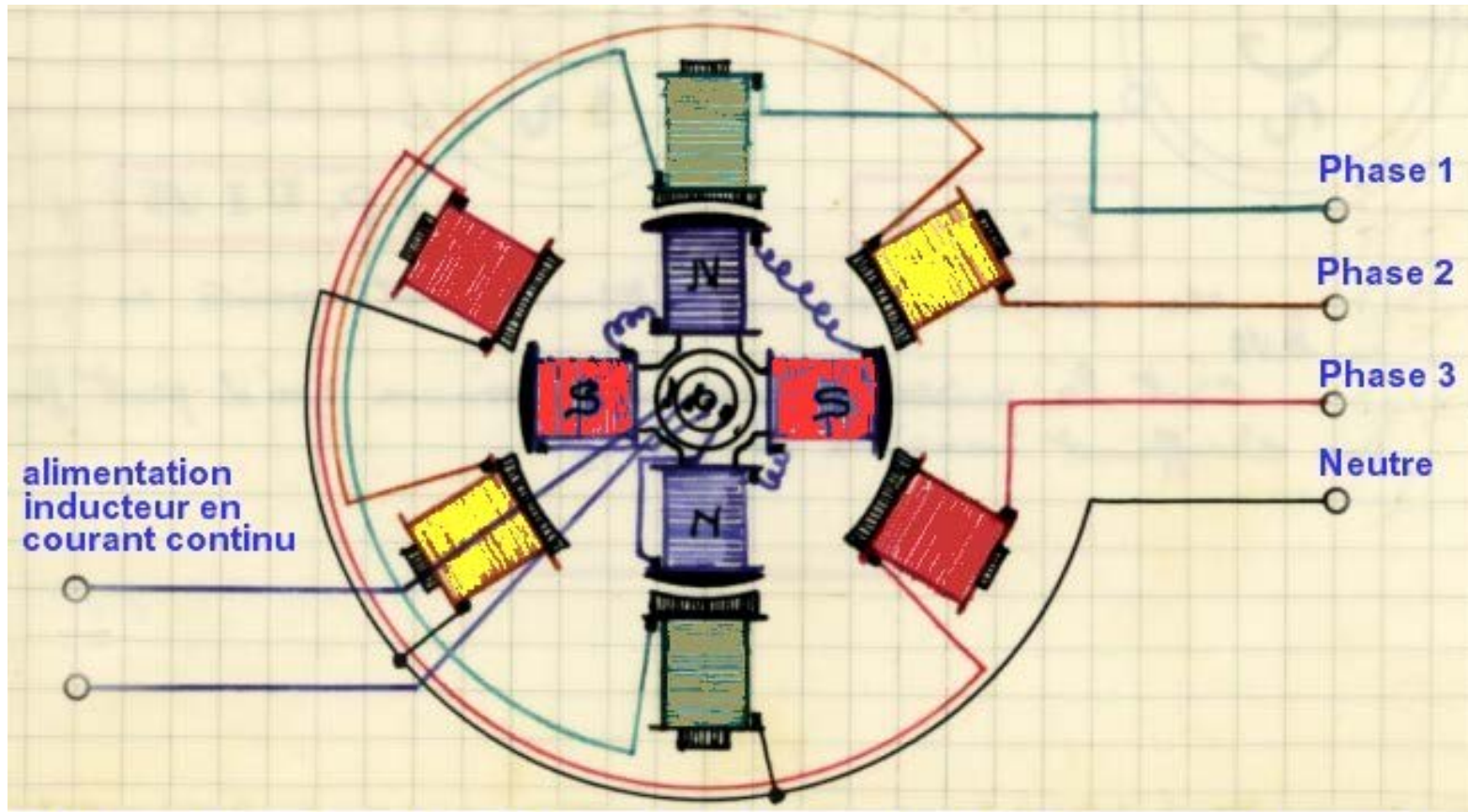
- L'alternateur a deux étages est utilisé pour les fortes puissance à partir d'une puissance de 10kW environ.
- L'alternateur double étage ne nécessite plus de balais.
- Le premier étage fournit le courant d'excitation de l'étage de puissance.
- L'alternateur d'excitation (A) est un alternateur inverse, avec le stator qui contient la bobine d'excitation et le rotor qui produit le courant.
- Le courant est redressé par un pont de diodes et alimente la roue polaire du second étage qui est un alternateur classique (B).





# 10. Production d'énergie électrique

## 10.1. Alternateur triphasé



**Schéma d'un alternateur triphasé, à deux paires de pôles, couplage étoile**



# 10. Production d'énergie électrique



## 10.1. Alternateurs de centrales

Le stator est constitué d'une couronne dans laquelle sont empilées des tôles en acier spécial, isolées électriquement entre elles afin de réduire au maximum les pertes Joule dues aux courants de Foucault ainsi que les pertes par hystérésis. Des encoches pratiquées dans ces tôles magnétiques reçoivent les conducteurs des bobines induites.



ci-dessus: empilage des tôles magnétiques dans un stator de petit diamètre, on remarque les encoches qui recevront les conducteurs de l'induit. document CEM



ci-dessus: montage des bobines de l'induit dans un stator de grand diamètre. document Alstom

# 1. Centrale thermique

## Centrale thermique combinée - 1 -

Une centrale thermique combinée est une installation de production d'électricité qui combine deux cycles thermodynamiques : le cycle de Rankine pour la production d'électricité à partir de la chaleur et le cycle de Brayton pour la production d'électricité à partir de la combustion de gaz.

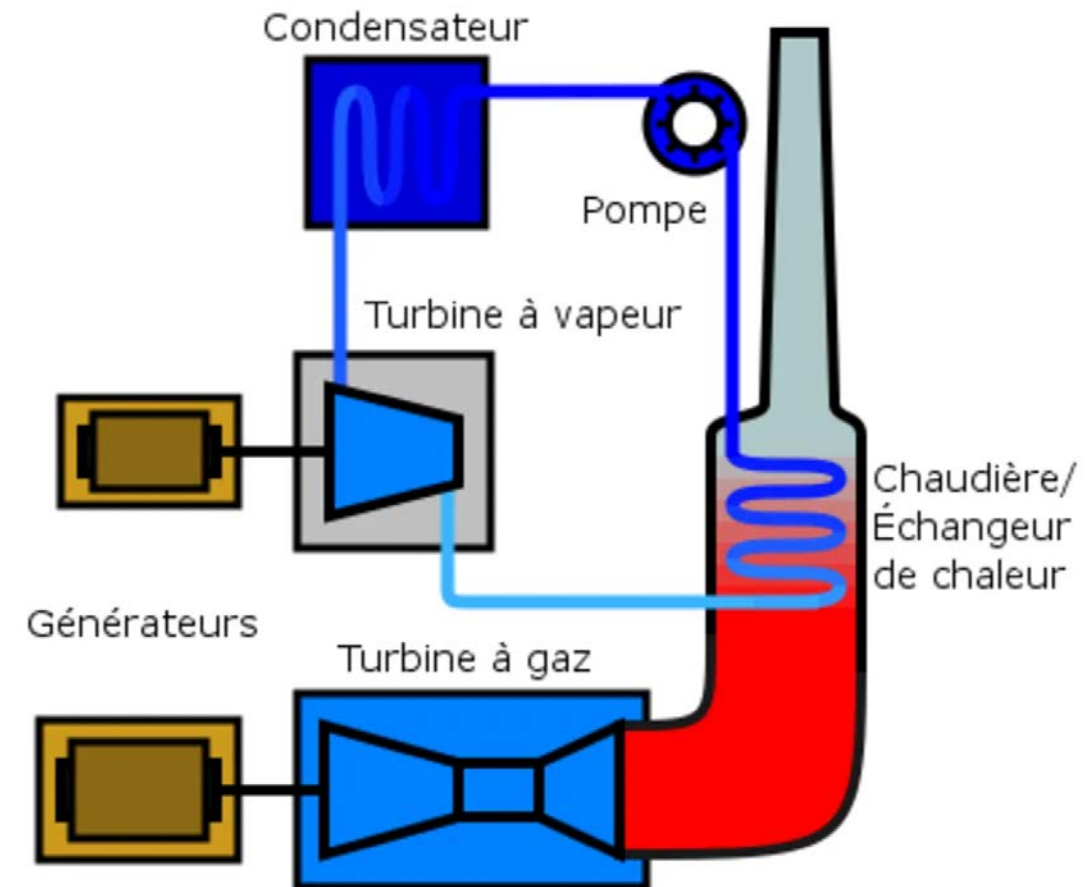
Ces deux cycles ont été décrits précédemment dans le cas des turbines à vapeur et des turbines à gaz.

# 1. Centrale thermique

## Centrale thermique combinée - 2 -

Une centrale à cycle combiné, généralement appelée CCGT (Combined Cycle Gas Turbine), est une centrale thermique qui associe deux types de turbines : turbine à gaz et turbine à vapeur. Chacune de ces turbines entraîne une génératrice qui produit de l'électricité (configuration "multi-arbres" ou "multi-shaft") ou les deux types de turbines sont couplées à la même génératrice (configuration "single-shaft")

Dans une centrale à cycle combiné, les gaz issus de la combustion à haute température (jusqu'à 1.500 °C) actionnent une turbine à gaz. En sortie les gaz sont encore suffisamment chauds (entre 400°C et 650°C environ) pour générer de la vapeur dans une chaudière au moyen d'un échangeur de chaleur. La vapeur ainsi produite entraîne une turbine à vapeur. Il est enfin nécessaire de disposer d'une source froide (eau de rivière - eau de mer - aéroréfrigérant) pour évacuer la chaleur nécessairement produite par le cycle (second principe de la thermodynamique). Différentes configurations de turbines sont possibles. On peut par exemple associer deux turbines à gaz à une turbine à vapeur.



# 1. Centrale thermique

## Centrale thermique combinée - 3 -

. Les plus récentes centrales CCGT (Cycle Combiné Gaz) du monde atteignent ainsi des rendements PCI (Pouvoir calorifique inférieur) de presque 60%, contre 37% pour les centrales à gaz classiques. Les CCGT permettent de réduire de 50 % les émissions de CO<sub>2</sub>, de diviser par trois les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et de supprimer les émissions d'oxydes de soufre (SO<sub>2</sub>) par rapport aux moyens de production thermique à flamme « classiques ». En outre, la combustion de gaz naturel ne produit ni particules de poussière ni odeurs. Concernant le processus de refroidissement, la technologie du refroidissement du circuit par air, si elle est choisie, permet de limiter les consommations d'eau de manière significative par rapport aux centrales du même type utilisant le refroidissement par eau, et permet également d'éviter d'influer sur la température des cours d'eau ou étendues d'eau concernés.

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Centrales nucléaires Fonctionnement général -1 -

Le principe de fonctionnement d'un réacteur nucléaire repose sur le processus de fission nucléaire, au cours duquel les noyaux d'atomes fissiles, tels que l'uranium-235, se divisent en noyaux plus petits, libérant ainsi une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur. Ce processus est contrôlé de manière à produire une réaction en chaîne contrôlée et à exploiter l'énergie libérée pour générer de l'électricité. Voici une explication générale du fonctionnement d'un réacteur nucléaire :

### 1. Matériau Fissile :

1. Les réacteurs nucléaires utilisent généralement des isotopes fissiles tels que l'uranium-235 ou le plutonium-239. L'uranium-235 est l'isotope le plus couramment utilisé dans les réacteurs nucléaires civils.

### 2. Fission Nucléaire :

1. Lorsqu'un noyau d'uranium-235 absorbe un neutron, il peut se diviser en deux noyaux plus petits, libérant des neutrons supplémentaires et une quantité importante d'énergie sous forme de chaleur. Ce processus est appelé fission nucléaire.

### 3. Réaction en Chaîne :

1. Les neutrons libérés lors de la fission peuvent à leur tour frapper d'autres noyaux d'uranium-235, provoquant ainsi leur fission et libérant davantage de neutrons et d'énergie. Cela crée une réaction en chaîne auto-entretenu.

### 4. Contrôle de la Réaction :

1. Pour maintenir la réaction en chaîne sous contrôle, des dispositifs de contrôle, tels que les barres de contrôle, sont insérés dans le cœur du réacteur. Ces barres absorbent les neutrons excédentaires et réduisent ainsi la réaction en chaîne.

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Centrales nucléaires Fonctionnement général -2 -

### 1. Génération de Chaleur :

1. La chaleur produite par la fission est utilisée pour chauffer un fluide caloporteur, souvent de l'eau, pour produire de la vapeur à haute pression.

### 2. Turbine et Alternateur :

1. La vapeur générée fait tourner une turbine connectée à un alternateur. L'alternateur convertit ensuite l'énergie mécanique en électricité.

### 3. Refroidissement :

1. Le fluide caloporteur chauffé est ensuite refroidi dans un échangeur de chaleur à travers lequel circule un autre fluide, généralement de l'eau, pour éviter une surchauffe du système.

### 4. Évacuation de Chaleur :

1. La chaleur résiduelle générée dans le réacteur, même après l'arrêt de la réaction en chaîne, doit être évacuée de manière sûre. Cela est généralement réalisé à l'aide de systèmes de refroidissement tels que des tours de refroidissement.

Le cycle décrit ci-dessus est connu sous le nom de cycle de l'eau légère, où de l'eau ordinaire est utilisée comme fluide caloporteur et de refroidissement. Il existe également d'autres cycles, comme le cycle à eau lourde ou le cycle à gaz, selon le type de réacteur nucléaire utilisé. Les réacteurs nucléaires sont conçus avec des dispositifs de sécurité intégrés pour assurer un fonctionnement sûr et contrôlé



# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Centrales nucléaires PWR en France

Les réacteurs français sont de type PWR ( Pressurized Water Reactor)

Répartis sur 18 sites, les réacteurs peuvent être séparés en trois paliers : 32 tranches de 900 MWe, 20 tranches de 1 300 MWe et 4 tranches N4 de 1 450 MWe, pour une puissance installée du parc nucléaire de près de 63 GWe.

En 2021, les centrales nucléaires françaises ont produit, selon RTE, 360,7 TWh , soit 69 % de la production totale d'électricité

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Centrales nucléaires PWR - 1 -

Une centrale nucléaire à eau pressurisée (PWR, pour Pressurized Water Reactor) est un type de réacteur nucléaire utilisé pour la production d'électricité. Voici une description générale de son fonctionnement :

**1. Réacteur nucléaire** : Le cœur de la centrale abrite le réacteur nucléaire, où ont lieu les réactions de fission nucléaire. Dans un PWR, l'uranium enrichi est généralement utilisé comme combustible. Les réactions de fission libèrent de l'énergie sous forme de chaleur.

**2. Circuit primaire** : Le circuit primaire est composé d'eau sous pression qui circule à travers le cœur du réacteur pour absorber la chaleur générée par les réactions nucléaires. Cette eau chauffée à haute pression ne bout pas en raison de la pression élevée.

**3. Échangeur de chaleur (ou générateur de vapeur)** : La chaleur transférée du circuit primaire est transférée à un circuit secondaire, où de l'eau ordinaire est convertie en vapeur. Cette vapeur alimente ensuite une turbine.

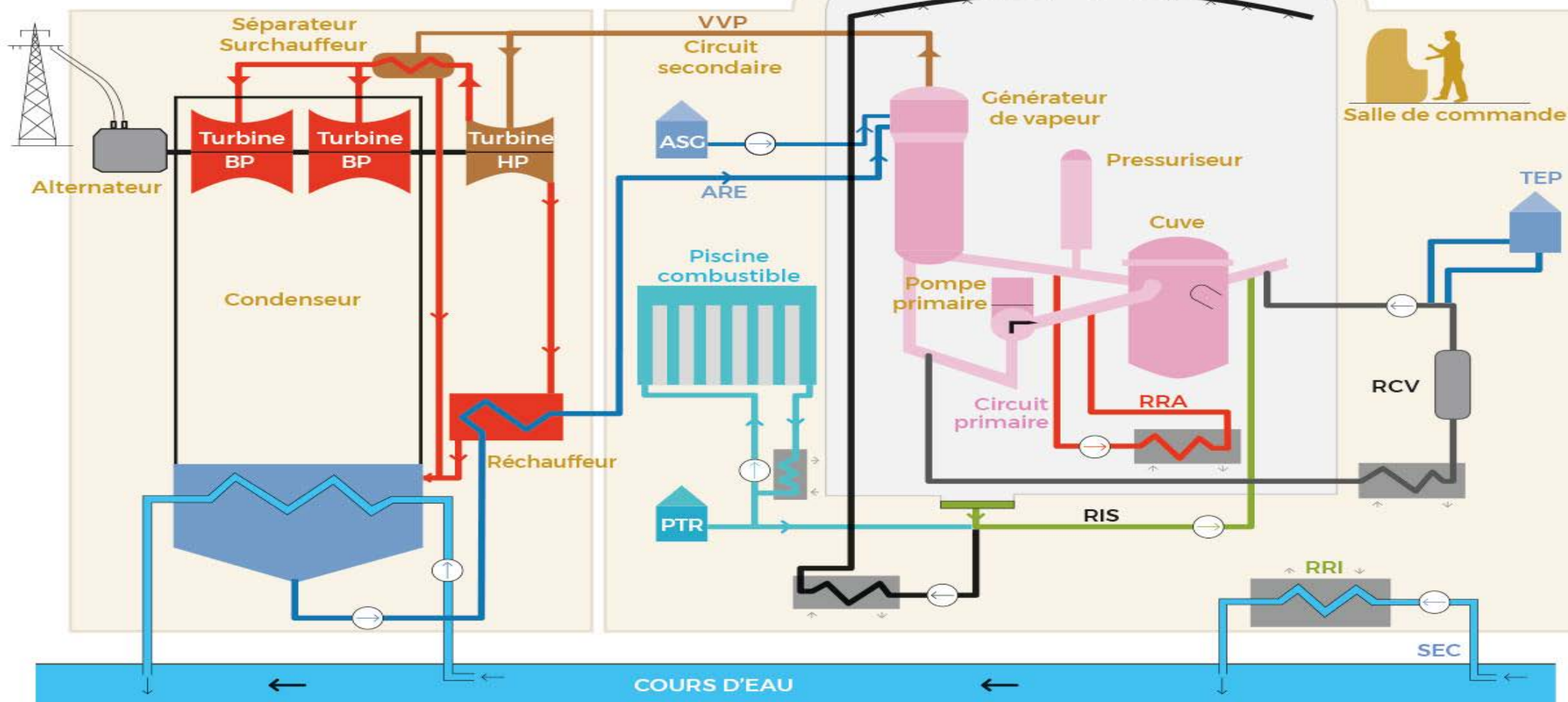
**4. Turbine** : La vapeur générée par le circuit secondaire fait tourner une turbine connectée à un générateur électrique. La rotation de la turbine convertit l'énergie thermique en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en électricité.

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Centrales nucléaires PWR - 2 -

- 5. Circuit secondaire** : L'eau du circuit secondaire, maintenant sous forme de vapeur, est refroidie et condensée en eau liquide dans un condenseur. Cette eau est ensuite renvoyée vers le générateur de vapeur pour recommencer le cycle.
- 6. Circuit de refroidissement** : La chaleur résiduelle est dissipée dans l'environnement à travers un circuit de refroidissement. Dans de nombreuses centrales nucléaires, des tours de refroidissement sont utilisées pour libérer la chaleur excédentaire dans l'atmosphère.
- 7. Contrôle du réacteur** : La réaction en chaîne nucléaire est soigneusement contrôlée à l'aide de barres de contrôle qui peuvent être insérées ou retirées du cœur du réacteur pour réguler le niveau de puissance.
- 8. Systèmes de sécurité** : Les centrales nucléaires PWR sont équipées de multiples systèmes de sécurité pour prévenir les incidents. Cela inclut des systèmes de refroidissement d'urgence, des systèmes de confinement, et des dispositifs de contrôle automatisés.
- Il est important de noter que la sécurité et le contrôle sont des aspects cruciaux dans la conception et le fonctionnement des centrales nucléaires afin d'assurer une production d'énergie sûre et fiable.

# Réacteur PWR



ARE : circuit de régulation du débit d'eau alimentaire  
 ASG : circuit d'eau alimentaire de secours des générateurs de vapeur  
 EAS : circuit d'aspersion dans l'enceinte du bâtiment réacteur  
 PTR : circuit de réfrigération et de purification de l'eau des piscines  
 RCV : système de contrôle chimique et volumétrique du réacteur  
 RIS : circuit d'injection de sécurité  
 ↔ : échangeur

RRA : système de refroidissement du réacteur à l'arrêt  
 RRI : circuit de réfrigération intermédiaire  
 SEC : circuit d'eau brute secourue  
 TEP : circuit de traitement des effluents primaires  
 VVP : circuit de vapeur principal  
 ⊙ : pompe

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Centrales nucléaires BWR - 1 -

Une centrale nucléaire à eau bouillante (BWR, pour Boiling Water Reactor) est un type de réacteur nucléaire utilisé pour la production d'électricité. Voici une description générale de son fonctionnement :

- 1. Réacteur nucléaire** : Le cœur de la centrale abrite le réacteur nucléaire, où ont lieu les réactions de fission nucléaire. Dans un BWR, l'uranium enrichi est généralement utilisé comme combustible. Les réactions de fission libèrent de l'énergie sous forme de chaleur.
- 2. Circuit primaire** : Le circuit primaire est composé d'eau sous pression qui circule à travers le cœur du réacteur pour absorber la chaleur générée par les réactions nucléaires. Contrairement au PWR, dans un BWR, cette eau bouillante est directement utilisée pour produire de la vapeur.
- 3. Séparation de l'eau et de la vapeur** : La vapeur produite dans le cœur du réacteur est séparée de l'eau dans une partie appelée "séparateur". La vapeur est ensuite dirigée vers la turbine.
- 4. Turbine et générateur** : La vapeur générée par le cœur du réacteur fait tourner une turbine connectée à un générateur électrique. La rotation de la turbine convertit l'énergie thermique en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en électricité.

# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Centrales nucléaires BWR - 2 -

**5. Circuit secondaire** : La vapeur utilisée dans la turbine est ensuite refroidie et recondensée en eau dans un condenseur. Cette eau est ensuite renvoyée vers le cœur du réacteur pour recommencer le cycle.

**6. Circuit de refroidissement** : Comme dans le PWR, la chaleur résiduelle est dissipée dans l'environnement à travers un circuit de refroidissement. Des tours de refroidissement ou d'autres systèmes peuvent être utilisés.

**7. Contrôle du réacteur** : La réaction en chaîne nucléaire est régulée à l'aide de barres de contrôle qui peuvent être insérées ou retirées du cœur du réacteur pour ajuster le niveau de puissance.

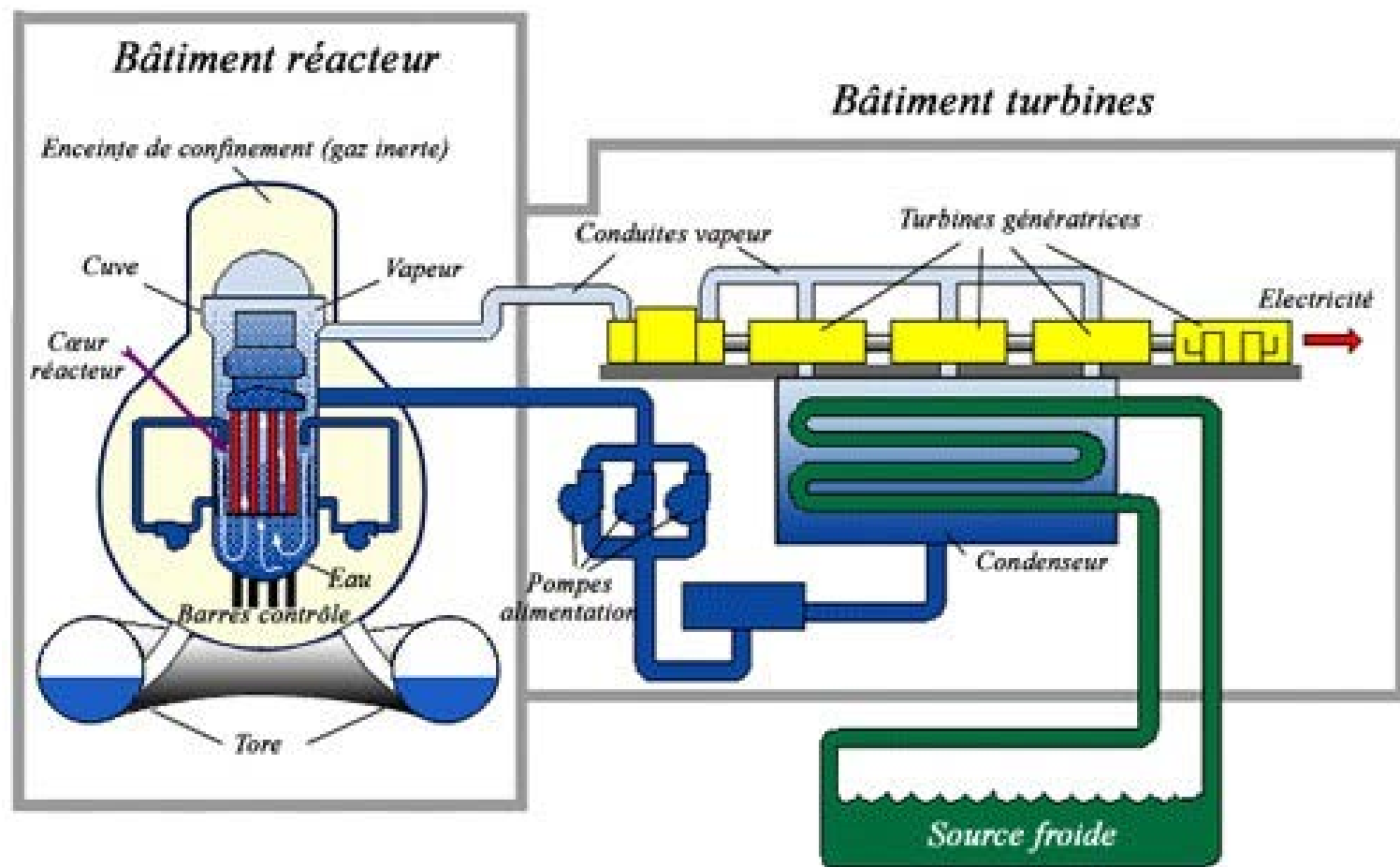
**8. Systèmes de sécurité** : Les centrales nucléaires BWR sont également équipées de multiples systèmes de sécurité pour prévenir les incidents. Cela inclut des systèmes de refroidissement d'urgence, des systèmes de confinement, et des dispositifs de contrôle automatisés.

Il est important de noter que bien que les BWR et PWR utilisent des principes similaires pour produire de l'électricité, les différences dans la configuration du réacteur et du circuit primaire entraînent des variations dans leur fonctionnement spécifique. La sécurité demeure une priorité essentielle dans la conception et l'exploitation de toutes les centrales nucléaires.



# 10. Production d'énergie électrique

## 10.4. Schéma d'un centrale nucléaire BWR





# 11. Transport de l'énergie électrique

## 11.1. Réseaux - 1 -

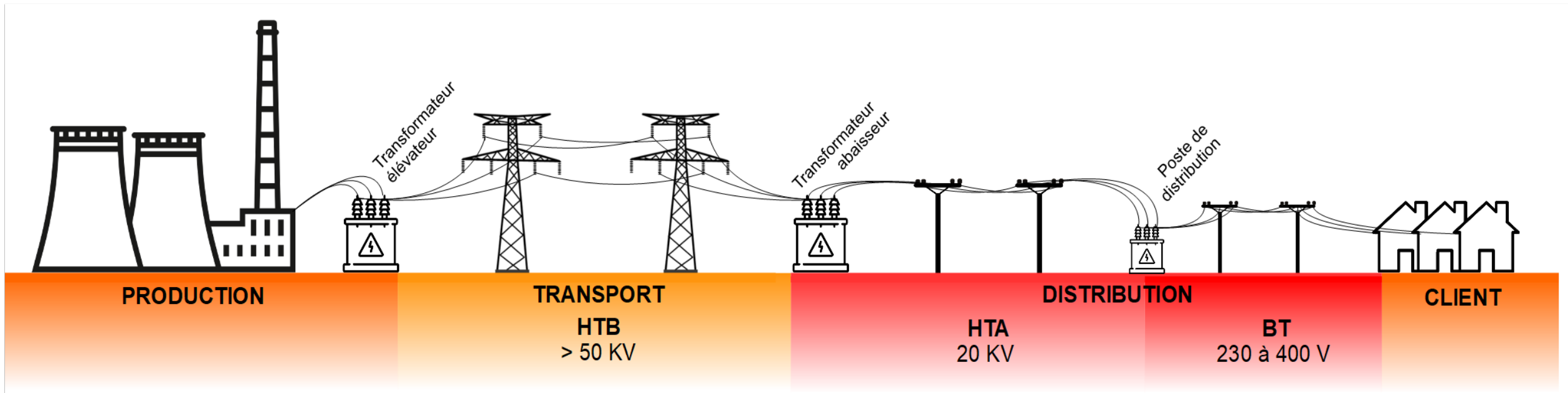


Schéma d'un réseau de transport



# 11. Transport de l'énergie électrique



## 11.1. Réseaux - 2 -

En France, les réseaux de transport et de distribution d'électricité se distinguent par leur fonction, par l'étape au cours de laquelle ils interviennent pour acheminer l'énergie électrique et par la tension de leurs lignes.

• **Le réseau de transport**, dont **Réseau Transport Électricité (RTE)** est le gestionnaire en France, achemine l'électricité des centrales de production vers les zones de consommation, grandes agglomérations ou grandes entreprises. Il est composé de lignes à haute tension (63 000 et 90 000 volts) et à très haute tension (225 000 et 400 000 volts). L'utilisation de la très haute tension, en amont du circuit, permet de limiter les pertes en ligne dues à l'effet Joule (dégagement de chaleur) ou aux effets électromagnétiques (effets capacitifs entre la ligne et le sol).

• **Les réseaux de distribution**, exploités, entretenus et développés par Enedis sur 95% du territoire français métropolitain (et par des entreprises locales de distribution ou ELD pour les zones restantes, ainsi que par EDF SEI dans la plupart des zones interconnectées), reçoivent l'électricité des réseaux de transport et distribuent celle-ci aux consommateurs. Ils sont composés de lignes à moyenne tension (20 000 volts) et à basse tension (230 volts et 400 volts). Ce sont les lignes à basse tension qui sont reliées aux domiciles des particuliers.

En France, 105 857 km de lignes à haute et très haute tension (dont 94% de lignes aériennes) sont exploitées et entretenues par RTE. Enedis gère pour sa part un réseau comprenant 645 000 km de lignes à moyenne tension et 721 000 km de lignes à basse tension.

# 11. Transport de l'énergie électrique

## 11.1. Réseaux - 3 -

### Le réseau de transport

Le réseau de transport est constitué de deux types de lignes : les **lignes très haute tension (HTB2)** et les **lignes haute tension (HTB)**.

- Les **lignes HTB2** permettent de transporter de **grandes quantités d'électricité** sur de longues distances avec des pertes minimales. Ces lignes, dont la tension est supérieure à 100 kilovolts (kV), constituent le **réseau de grand transport ou d'interconnexion**. Elles permettent de relier les régions et les pays entre eux ainsi que d'alimenter directement les grandes zones urbaines. La majorité des lignes HTB2 ont des **tension de 400 kV et 225 kV**.
- Les **lignes HTB** constituent le réseau de **répartition** ou d'**alimentation régionale** et permettent le transport à l'échelle régionale ou locale. Elles acheminent l'électricité aux industries lourdes, aux grands consommateurs électriques comme les transports ferroviaires et font le lien avec le second réseau. Leur tension est de **63 ou 90 kV**.

# 11. Transport de l'énergie électrique

## 11.1. Réseaux - 4 -

### Le réseau de distribution

Le réseau de distribution est constitué de deux types de lignes : les **lignes moyenne tension (HTA)** et les **lignes basse tension (BT)**.

- Les **lignes HTA** permettent le transport de l'électricité à l'**échelle locale** vers les petites industries, les PME et les commerces. Elles font également le lien entre les clients et les postes de transformations. Ces lignes ont une **tension comprise entre 15 kV et 30 kV**.

- Les **lignes BT** sont les plus petites lignes du réseau. Leur tension est **de 230V ou 400V**. Ce sont celles qui nous servent **tous les jours** pour alimenter nos appareils ménagers. Elles permettent donc la distribution d'énergie électrique vers les ménages et les artisans.

# 11. Transport de l'énergie électrique



## 11.2. Lignes électriques - 1 -

Malgré l'effort entrepris pour limiter la résistance, le transport de l'électricité engendre des pertes d'énergie importantes, principalement par effet Joule. À titre d'exemple, pour le réseau de transport d'électricité en France, ces pertes sont estimées en moyenne à 2,5 % de la consommation globale, soit 11,5 TWh par an.

Pour ne pas subir de pertes importantes, on utilise donc deux techniques :

- augmenter le nombre de conducteurs : certaines lignes comportent pour chacune des phases jusqu'à quatre câbles distants de quelques centimètres ;
- diminuer l'intensité du courant en élevant la tension : pour une puissance transportée identique, si on augmente la tension, l'intensité du courant électrique diminue et les pertes dues au passage du courant dans le fil seront réduites selon le carré de l'intensité.
- Augmenter le  $\cos \varphi$ .

Toutefois, la tension servie aux particuliers doit rester inchangée (230 V en Europe ou 120 V en Amérique du Nord pour les installations domestiques) et dans le domaine de la basse tension afin de limiter les risques pour les utilisateurs. Il faut donc l'abaisser au plus près de ceux-ci. On a recours au courant alternatif (de fréquence 50 Hz en France ou 60 Hz en Amérique du Nord) et à des transformateurs.

Intensité du courant

L'intensité maximale du courant transportable dans une ligne est liée à la résistance de ses conducteurs, et donc à leur section et à la résistivité des matériaux les constituant.

La densité du courant dans les lignes aériennes haute tension est d'environ 0,7 – 0,8 A/mm<sup>2</sup>.

# 11. Transport de l'énergie électrique

## 11.2. Lignes électriques - 2 -

La circulation de puissance réactive est à éviter car elle provoque des surcharges au niveau des transformateurs de puissance, l'échauffement des câbles d'alimentation et des pertes.

Il faut donc faire diminuer la puissance réactive transportée par la ligne, en produisant la puissance réactive proche de la charge.

Pour cela il y a deux possibilités :

- soit demander aux groupes de fournir plus de réactif
- soit insérer utiliser de la compensation électrique,
- ou bien les deux solutions à la fois.

# 11. Transport de l'énergie électrique

## 11.3. Transformateur

Le transformateur de puissance est un appareil électrique statique qui sert à convertir une certaine valeur de tension alternative (courant) en une autre ou plusieurs valeurs différentes de tension (courant) avec la même fréquence. Lorsque l'enroulement primaire est alimenté en courant alternatif, un flux magnétique alternatif est généré, et le flux magnétique alternatif induit une force électromotrice alternative dans l'enroulement secondaire à travers la perméabilité magnétique du noyau de fer. Le niveau de la force électromotrice secondaire induite est lié au nombre de spires des enroulements primaire et secondaire, c'est-à-dire que la tension est proportionnelle au nombre de spires.

Les transformateurs de puissance sont divisés en deux catégories selon leurs fonctions : les transformateurs élévateurs et les transformateurs abaisseurs. Les sous-stations de l'usine utilisent toutes des transformateurs abaisseurs.

Les transformateurs de puissance sont divisés en deux catégories selon le nombre de phases, monophasé et triphasé. Les sous-stations d'usine utilisent généralement des transformateurs de puissance triphasés.

# 11. Transport de l'énergie électrique



## 11.4. Compensateur synchrone - 1 -

Le compensateur synchrone de ligne électrique, également connu sous le nom de compensateur synchrone, est un dispositif utilisé dans les systèmes de transmission d'électricité pour réguler la tension et améliorer la stabilité du réseau. Il est particulièrement utile pour compenser les pertes de tension dans les lignes de transmission à haute tension. Voici comment fonctionne un compensateur synchrone :

### 1.Principe de Base :

1. Un compensateur synchrone est généralement constitué d'une machine synchrone connectée à la ligne électrique. La machine synchrone est un générateur ou un moteur synchrone capable de produire ou de consommer de la puissance réactive, en fonction des besoins du réseau.

### 2.Génération ou Absorption de Puissance Réactive :

1. Lorsqu'il y a une surtension dans la ligne, le compensateur synchrone peut agir en tant que générateur synchrone, injectant de la puissance réactive dans le réseau pour augmenter la tension.
2. À l'inverse, en cas de sous-tension, il peut agir en tant que moteur synchrone, consommant de la puissance réactive pour réduire la tension.

### 3.Contrôle de la Tension :

1. Le compensateur synchrone est contrôlé automatiquement par des dispositifs de régulation pour maintenir la tension à des niveaux acceptables dans le réseau électrique.
2. Les variations de tension peuvent être causées par des changements rapides de charge, des court-circuits, ou d'autres perturbations.

# 11. Transport de l'énergie électrique



## 11.4. Compensateur synchrone - 2 -

### 4. Avantages du Compensateur Synchrone :

1. Amélioration de la stabilité du réseau en maintenant la tension à des niveaux constants.
2. Compensations des pertes de tension sur de longues lignes de transmission.
3. Capacité à réagir rapidement aux changements de conditions du réseau.

### 5. Localisation sur la Ligne de Transmission :

1. Les compensateurs synchrones peuvent être installés à divers endroits le long d'une ligne de transmission, en fonction des besoins spécifiques du réseau.
2. Ils sont souvent utilisés dans les réseaux à haute tension.

### 6. Intégration dans les Réseaux Intelligents (Smart Grids) :

1. Dans le contexte des réseaux intelligents, les compensateurs synchrones peuvent être intégrés dans des systèmes de contrôle plus sophistiqués pour optimiser la gestion de l'énergie.

Les compensateurs synchrones jouent un rôle important dans la gestion de la tension et la stabilité des réseaux électriques. Ils permettent de maintenir les conditions de tension requises, d'améliorer la fiabilité du réseau et de faciliter l'intégration d'énergies renouvelables et d'autres charges variables



## 11.4. FACTS

Les systèmes de transmission à courant alternatif flexible (FACTS) sont des technologies avancées de contrôle de la transmission électrique conçues pour améliorer l'efficacité, la fiabilité et la capacité des réseaux électriques à courant alternatif (CA). Ces systèmes sont utilisés pour réguler et contrôler les paramètres du réseau électrique, tels que la tension, la puissance réactive et la charge, afin d'optimiser les performances du réseau.

### 1.Objectifs :

1. Les FACTS visent à résoudre les problèmes liés à la transmission d'électricité, tels que les pertes d'énergie, les chutes de tension, les fluctuations de charge et les problèmes de stabilité du réseau.

### 2.Fonctionnement :

1. Les systèmes FACTS utilisent des dispositifs de contrôle électronique avancés pour modifier les paramètres électriques du réseau, tels que la tension et la réactance, afin de mieux répondre aux besoins de la charge et d'optimiser l'efficacité de la transmission.

### 3.Types de Dispositifs FACTS :

1. Les dispositifs FACTS comprennent des compensateurs en série (SVC), des compensateurs en dérivation (STATCOM), des transformateurs à impédance variable (TCSC), des dispositifs de contrôle de la puissance active (TCPAR) et d'autres technologies avancées de contrôle de la transmission.
2. Chaque type de dispositif FACTS a ses propres caractéristiques et applications spécifiques, mais tous visent à améliorer la capacité de transmission et la stabilité du réseau électrique.

### 4.Avantages des FACTS :

1. Les systèmes FACTS offrent plusieurs avantages, notamment une meilleure gestion de la charge, une réduction des pertes d'énergie, une amélioration de la stabilité du réseau, une augmentation de la capacité de transmission et une meilleure intégration des énergies renouvelables.