

CHAPITRE OS15

Circuit fixe dans un champ magnétique variable

➤ Problématique



Réseau EDF haute tension
(30 kV – 150 kV)



Réseau domestique
(230 V)

FIGURE 1 : Comment transférer de l'énergie électrique sans contact ?

Question : Comment transférer de l'énergie électrique sans contact électrique ?

- Autre type d'énergie, d'origine magnétique
phénomène d'induction électromagnétique
circuit fixe plongé ds chp magnétique variable

1 Phénomène d'auto-induction

1.1 Champs magnétiques en présence

➤ Champs magnétiques propre et extérieur

Définition :

champ propre \vec{B}_p

champ extérieur \vec{B}_{ext}


➤ Champ total

$$\vec{B}_{tot} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_p$$

1.2 Flux propre

➤ Cas d'une spire

Définition : Flux propre φ_p

Définition : $\varphi_p = L_p i$ 

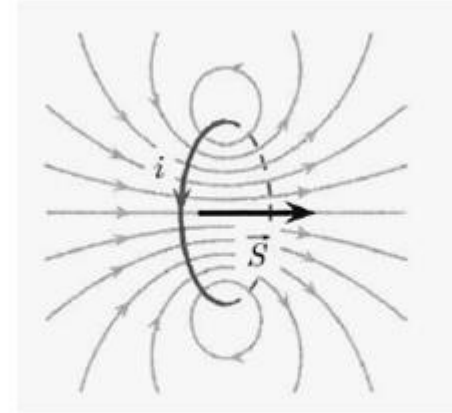


FIGURE 2 : Flux propre d'une spire

L_p : coeff. d'auto-inductance / d'inductance propre

➤ Cas de N spires

Bobine de N spires parcourues par $i(t)$.

φ_p le flux propre à travers 1 spire

Définition : Flux propre Φ_p $\Phi_p = N\varphi_p = NL_p i = Li$

L : inductance propre de la bobine 

1.3 Inductance d'un solénoïde



Exercice d'application 1

Déterminer le coefficient d'auto-inductance d'un solénoïde de section S , de longueur l , possédant N spires.

Calculer la valeur numérique pour $N = 1,0 \cdot 10^3$, $S = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ et $l = 0,10 \text{ m}$.

➤ Remarques

1.4 Modèles électrocinétiques de l'auto-induction

1.4.1 Bobine parfaite

➤ Hypothèse

Fil de bobinage **sans** résistance.

➤ F.e.m. auto-induite

$$e = -L \frac{di(t)}{dt}$$



➤ Modélisations



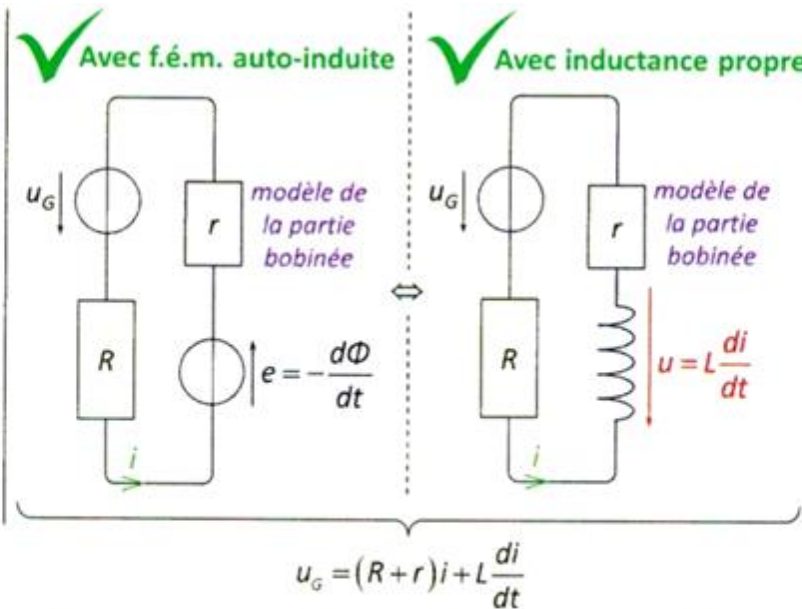
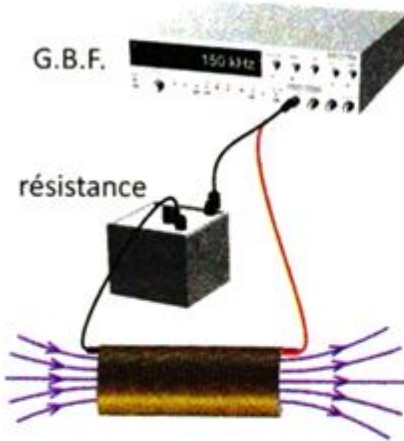
1.4.2 Bobine réelle

➤ Hypothèse

On rajoute en série la **résistance r** du fil.

➤ Modélisations

Circuit réel



✗ L'effet de l'auto-induction est compté deux fois !

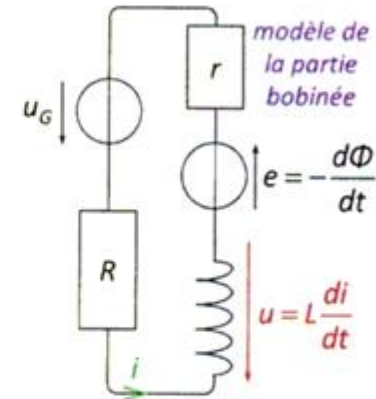


FIGURE 3 : Modèles électrocinétiques de l'auto-induction d'une bobine réelle
(dans un circuit réel)

1.5 Auto-induction et loi de modération de Lenz

➤ Illustration

➤ Conséquence

Propriété :

Dans les circuits à fort coefficient d'auto-inductance L , il est **difficile** d'imposer des **variations brutales de courant** :

manifestation de la **loi de modération de Lenz**

1.6 Aspect énergétique de l'auto-induction

➤ Position du problème

Étude d'un circuit en **l'absence de champ extérieur**

⇒ **auto-induction seule**

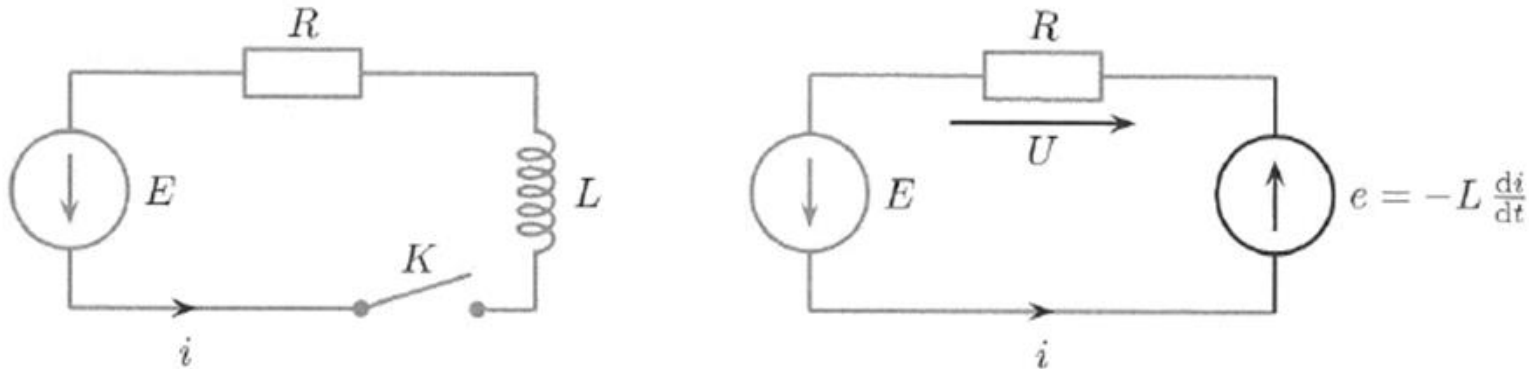


FIGURE 4 : Circuit étudié

➤ Bilan énergétique

➤ Énergie potentielle magnétique d'un circuit

Définition

$$\mathcal{E}_m = \frac{1}{2} Li^2$$

2 Bobines en interaction

2.1 Inductance mutuelle entre deux bobines

➤ Description

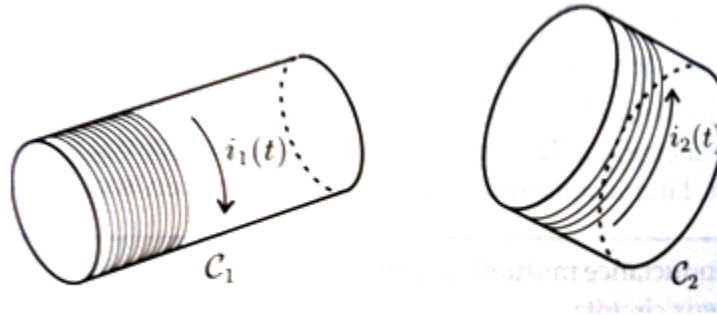


FIGURE 5 : Deux bobines en interaction

2 circuits **indéformables et fixes** parcourus par des courants d'intensités $i_1(t)$ et $i_2(t)$ variables.

Champs créés : \vec{B}_1 et \vec{B}_2

➤ Définitions des flux



➤ Coefficient d'inductance mutuelle

Définition :

$$\Phi_{1/2} = M i_1$$

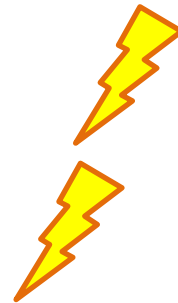
$$\Phi_{2/1} = M i_2$$



M dépend uniquement de la **géométrie** de l'ensemble des deux circuits, s'exprime en **Henry** et son signe peut être **positif ou négatif** suivant l'orientation respective des circuits

➤ Expressions des flux totaux

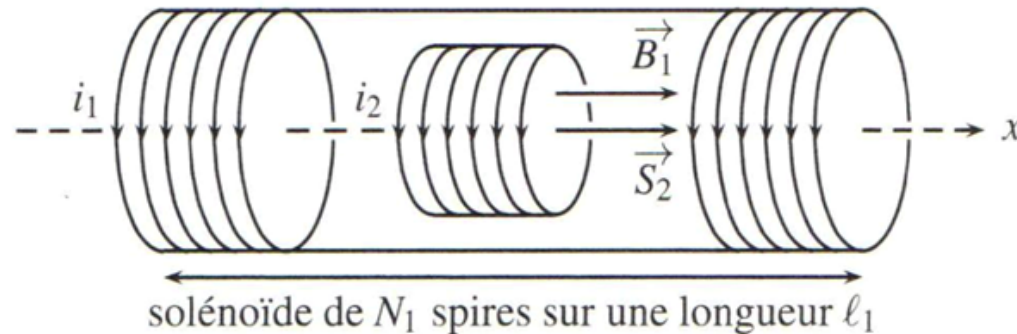
➤ Modèle électrocinétique



2.2 Exemple de calcul d'inductance mutuelle

Exercice d'application 2

1. Établir l'expression de l'inductance mutuelle M entre, d'une part, un solénoïde de longueur ℓ_1 , constituée de N_1 spires, chacune parcourue par un courant d'intensité i_1 , de surface S_1 et d'autre part, une bobine constituée de N_2 spires, de surface S_2 , placée à l'intérieur du solénoïde, de même axe que celui-ci.



Sur la figure, on a « effacé » les spires centrales du solénoïde 1 pour pouvoir voir le solénoïde 2.

2. À quelle condition les deux solénoïdes sont-ils en influence totale ?

2.3 Coefficient de couplage

➤ Définition

$$K = \frac{|M|}{\sqrt{L_1 L_2}} \leq 1$$

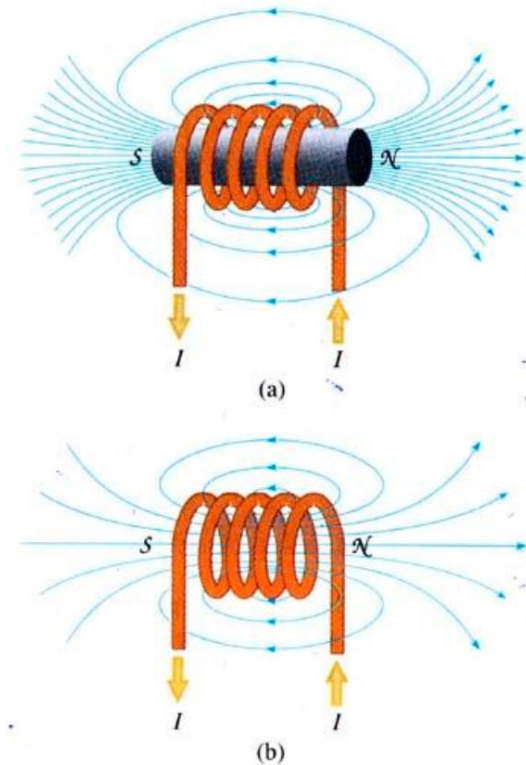
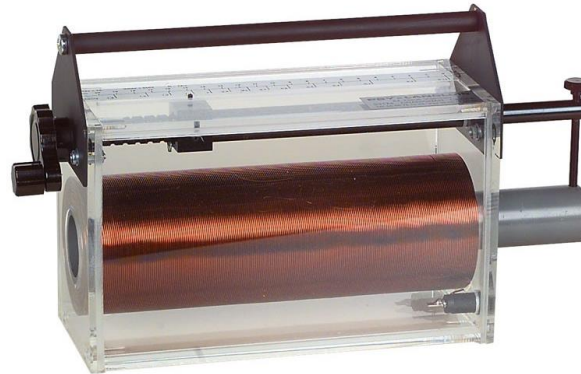
➤ Couplage partiel $|M| < \sqrt{L_1 L_2} \Leftrightarrow K < 1$

➤ Couplage total $|M| = \sqrt{L_1 L_2} \Leftrightarrow K = 1$

2 circuits **en influence totale**

➤ Retour sur l'exercice d'application 2

➤ Amélioration du couplage



2.4 Étude en régime sinusoïdal forcé

➤ Systeme étudié

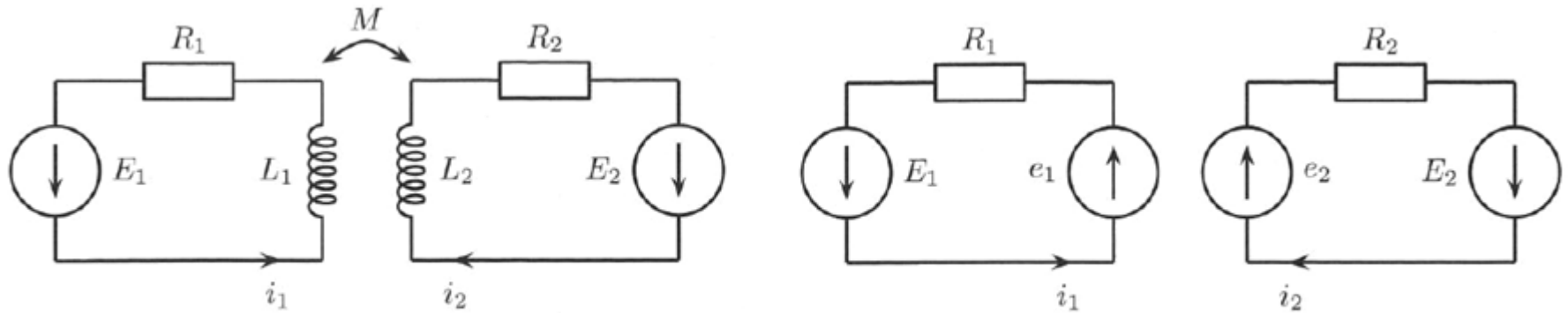


FIGURE 6 : Circuit couplé étudié : deux représentations possibles

➤ Équations électrocinétiques dans le domaine temporel

➤ Équations électrocinétiques dans le domaine complexe

➤ Commentaires

2.5 Exemples d'applications des circuits couplés

2.5.1 Retour à la problématique : transformateur de tension

➤ Constitution

Quadripôle composé de
deux enroulements de fils

autour d'un **tore de matériau ferromagnétique**

- **enroulement primaire : création du champ magnétique sinusoïdal**
- **enroulement secondaire : siège d'une fem induite sinusoïdale**

➤ Bornes homologues

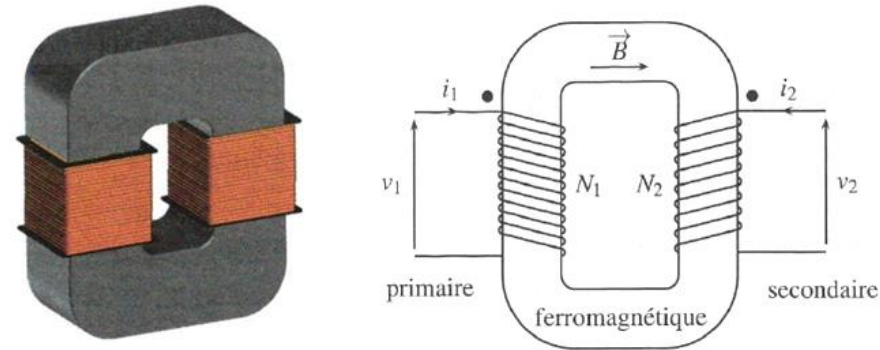
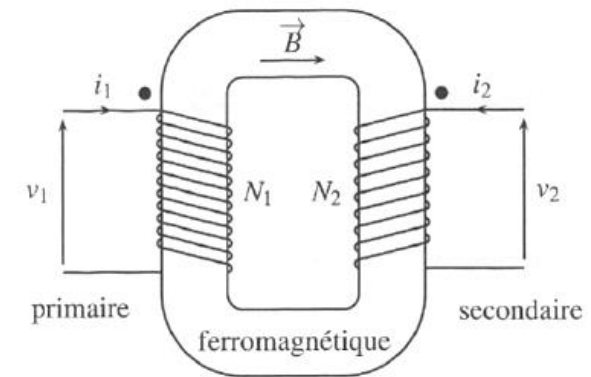


FIGURE 7 : Transformateur de tension

- Flux magnétiques
- Forces électromotrices induites
- Schéma électrique équivalent
- Relation entre tensions
- m : rapport de transformation**
- Schéma normalisé du transformateur



$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

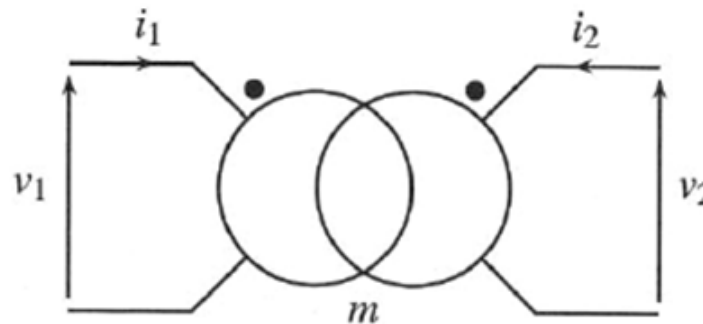


FIGURE 8 : Schéma normalisé du transformateur de tension

2.5.2 Autres dispositifs

➤ Boucle de détection de véhicules



FIGURE 9 : Boucles de détection de véhicules

- **Boucles au sol** : création du **chp magnétique inducteur variable (sinusoïdal)**
- **Véhicule en acier** : modélisable par une **bobine court-circuitée**, siège de **courants induits**

2 circuits couplés : variation d'une impédance

⇒ **variation fréquence propre d'un oscillateur**

➤ Cartes RFID (Radio Frequency IDentification)

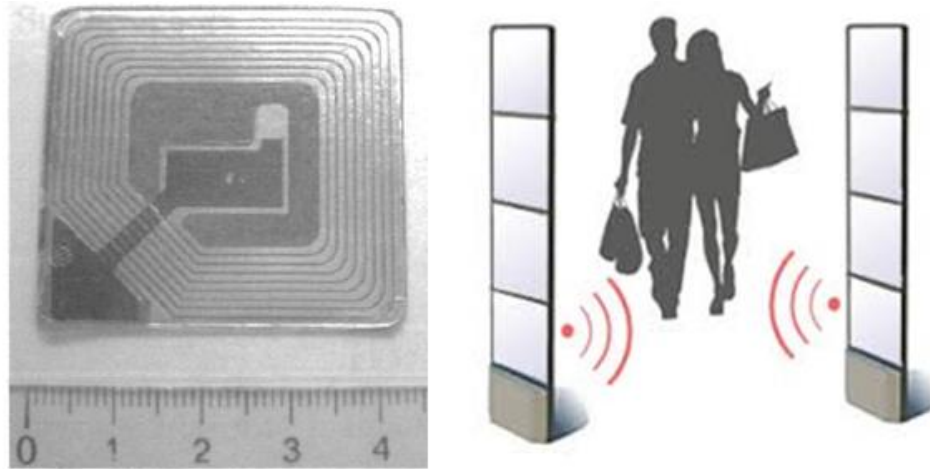


FIGURE 10 : Carte RFID servant d'antivol sur un article de magasin

- **Détecteur** : création du **chp magnétique variable**
- **Carte RFID**: bobinage, siège de **courants induits**
circuits couplés par inductance mutuelle

➤ Plaques de cuisson

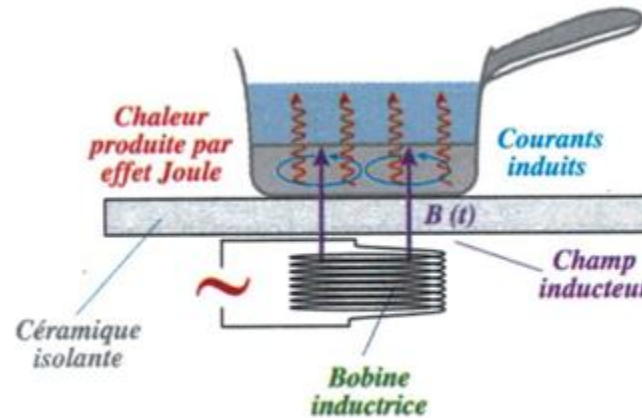


FIGURE 11 : Plaque de cuisson à induction

- **Plaques de cuisson** : création du **chp magnétique inducteur variable**
 - **Casserole** : rôle d'une « seconde bobine ».
- Disque métallique massif** : siège de **courants induits**
courants de Foucault (« eddy current »)

➤ Alternateur synchrone

📺 Vidéo : YouTube / Chaîne Unisciel / Vidéos / Principe de fonctionnement d'un générateur électrique (2'33s)

<https://www.youtube.com/watch?v=SID1lgUnQR0>

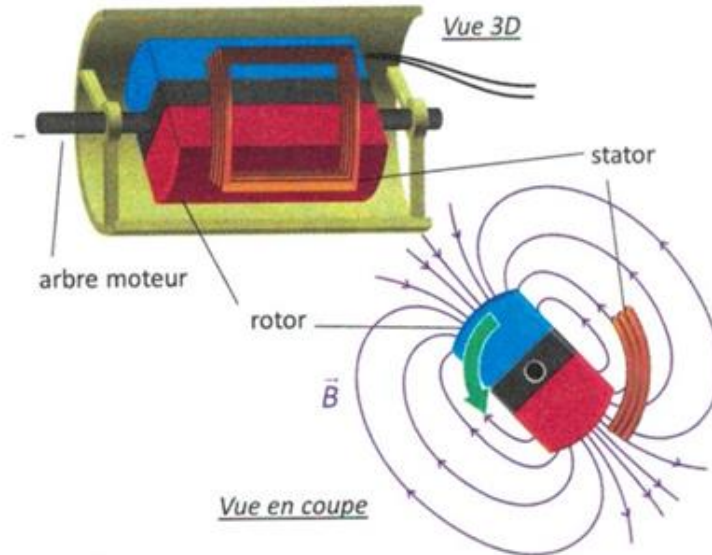


FIGURE 12 : Principe de l'alternateur

- **Rotor** : création du **chp magnétique inducteur tournant** (variable dans le temps). **Rotor = inducteur**
- **Stator** : comporte les bobinages qui seront le siège de **courants induits** / fem induites. **Stator = induit**

conversion énergie mécanique \Rightarrow énergie électrique

Énergie mécanique fournie par une turbine

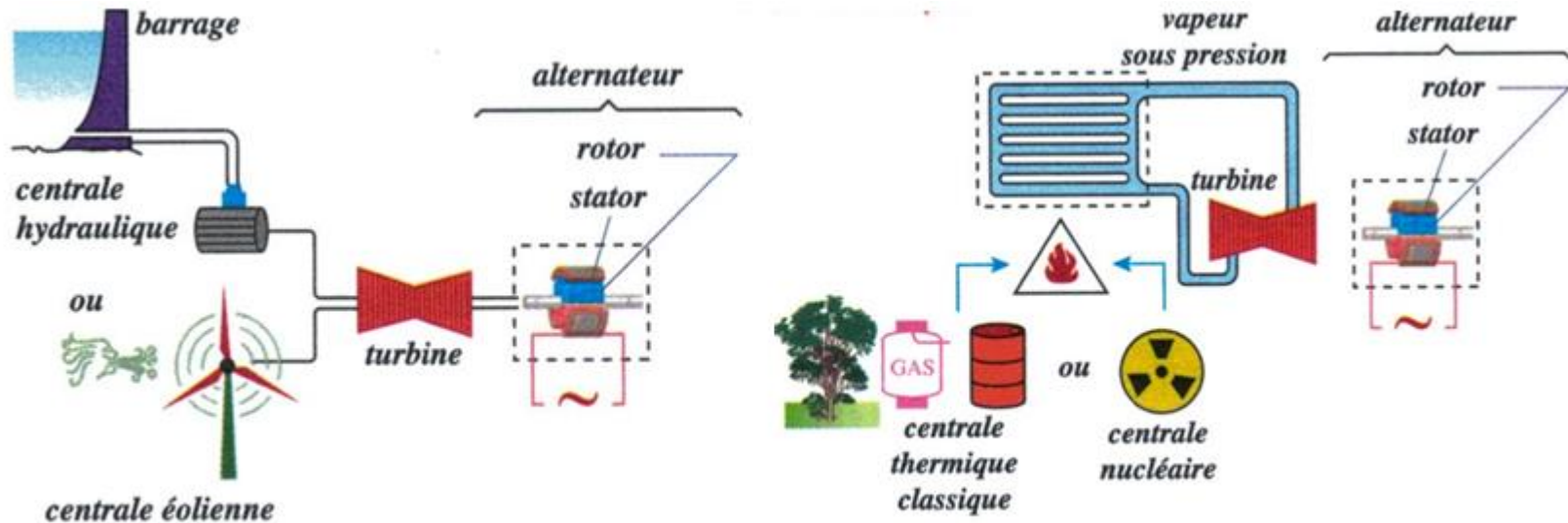


FIGURE 13 : Différents systèmes de production d'énergie électrique

- Conversion **énergie cinétique** \Rightarrow **énergie mécanique**
(centrales hydrauliques et éoliennes)
- Conversion **énergie thermique** \Rightarrow **énergie mécanique**
(centrales nucléaires ou thermiques)

2.6 Étude énergétique



➤ Équations couplées

$$\begin{cases} E_1 + e_1 = R_1 i_1 \Leftrightarrow E_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} = R_1 i_1 \\ E_2 + e_2 = R_2 i_2 \Leftrightarrow E_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} = R_2 i_2 \end{cases}$$

➤ Bilan énergétique

Définition :

Énergie potentielle magnétique emmagasinée dans
le système d'inductances couplées :

$$\mathcal{E}_m = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2$$