



Rouff, Musée d'art moderne, Paris

Cours 12: Systèmes de production et de gestion de l'énergie

EE 106 – Sciences et
technologies de
l'électricité

Automne 2025

Informations sur l'examen:

Date:

→ L'examen a lieu le **23 janvier 2026**

Salle

→ **STCC Campus full**

L'examen comporte 3 parties

- **QCM sur le cours**
- **Questions ouvertes**
- **QCM sur les TP**

Matériel autorisé:

- **Calculatrice**
- **Notes de cours (sur papier)**

Préparation pour l'examen:

La semaine prochaine (12 décembre 2025)

→ **Examen blanc**

→ **Le sujet sera mis sur Moodle la veille pour que vous puissiez l'imprimer**

→ **Auto-correction: le corrigé sera mis à disposition à la fin (vérifiez vos réponses vous-même ou demandez à un.e camarade)**

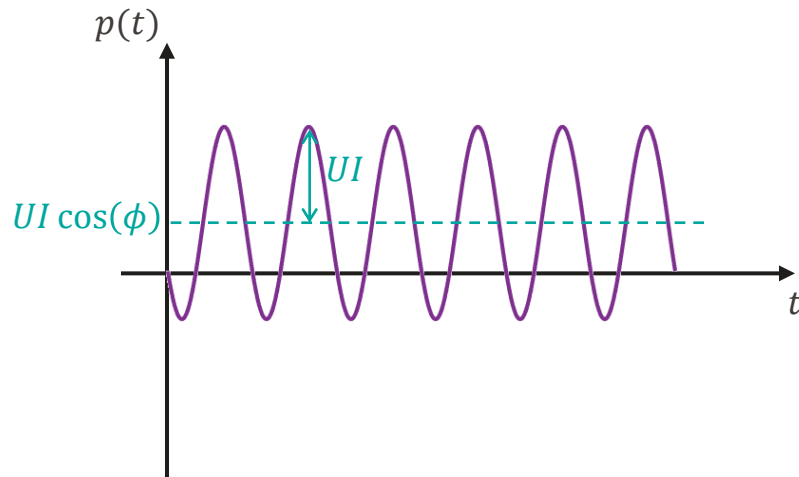
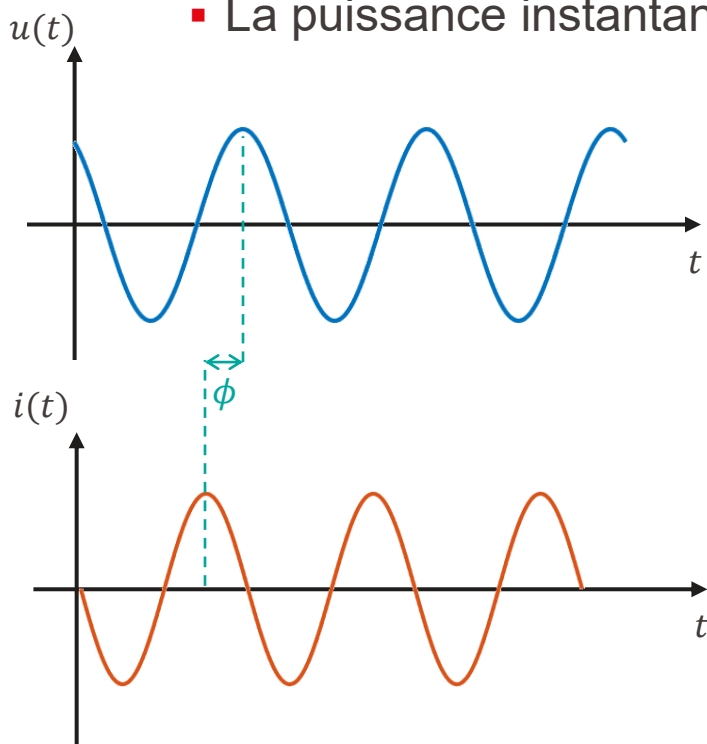
→ **Possibilité de poser des questions au professeur sur les exercices ou le cours**

Rappels



-Rappel- Puissance électrique

- La puissance instantanée $p(t) = u(t)i(t)$ oscille

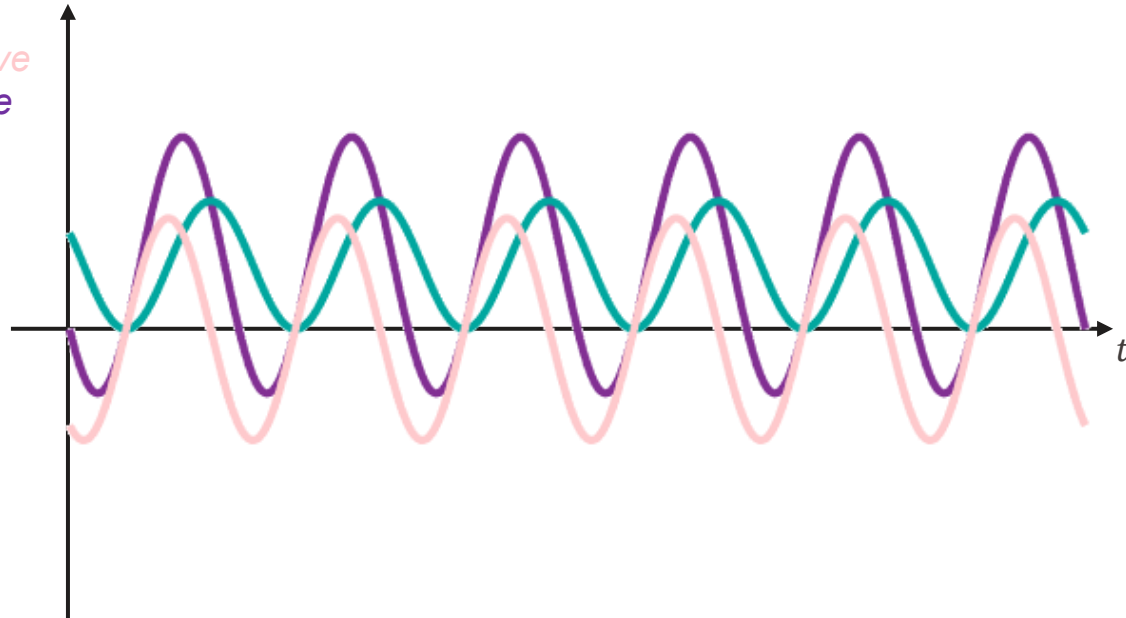


-Rappel- Puissance électrique

- La puissance instantanée $p(t) = u(t)i(t)$ oscille
 - Elle peut se décomposer en une partie positive et une partie alternative

$$p(t) = UI \cos(\phi) [1 + \cos(2\omega t + 2\alpha)] + UI \sin(\phi) \sin(2\omega t + 2\alpha)$$

Composante pulsée
Composante alternative
Puissance instantanée



-Rappel- Puissance électrique

- La puissance instantanée $p(t) = u(t)i(t)$ oscille
 - Elle peut se décomposer en une partie positive et une partie alternative
 - On peut alors définir plusieurs types de puissance
- En régime permanent sinusoïdal, on définit une puissance complexe:

$$\underline{S} = \underline{U}\underline{I}^* = P + jQ$$

- P est la puissance active, en W: puissance convertie
 - Q est la puissance réactive, en VAR: puissance alternative
 - $S = |\underline{S}|$ est la puissance apparente, en VA
- La qualité d'un système électrique peut être quantifiée par le facteur de puissance:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\phi)$$



Quel est le signe de la puissance reactive pour un condensateur et une inductance?

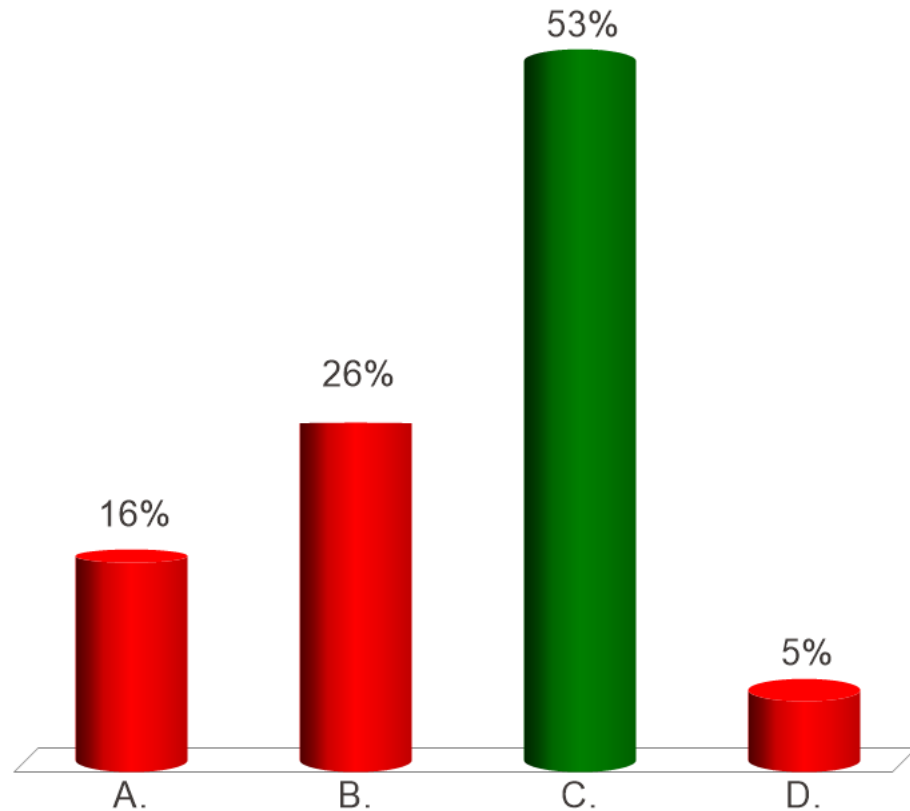
A. $Q_C > 0 ; Q_L > 0$

B. $Q_C > 0 ; Q_L < 0$

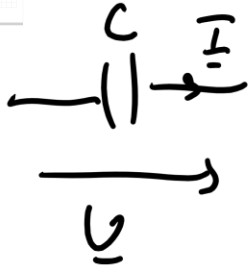


C. $Q_C < 0 ; Q_L > 0$

D. $Q_C < 0 ; Q_L < 0$



Quel est le signe de la puissance reactive pour un condensateur et une inductance?



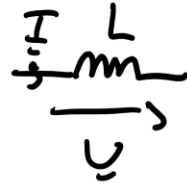
$$S = \underline{U} \underline{I}^*$$

$$\underline{I} = jC\omega \underline{U} \Rightarrow \underline{I}^* = -jC\omega \underline{U}^*$$

$$\Rightarrow S = -jC\omega |\underline{U}|^2$$

$$S = -jC\omega U^2 = jQ$$

$$Q = -C\omega U^2 < 0$$



$$S = \underline{U} \underline{I}^*$$

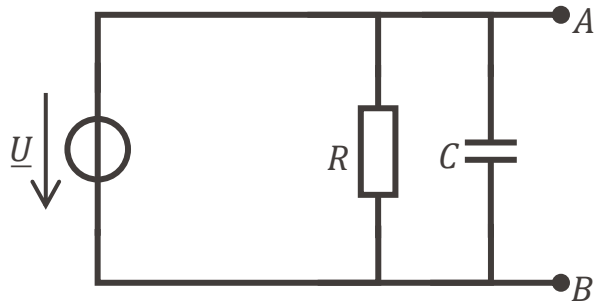
$$\underline{U} = jL\omega \underline{I}$$

$$\Rightarrow \underline{I} = \frac{\underline{U}}{jL\omega} \Rightarrow \underline{I}^* = \frac{\underline{U}^*}{-jL\omega}$$

$$\Rightarrow S = \frac{U^2}{-jL\omega} = j \frac{U^2}{L\omega} = jQ$$

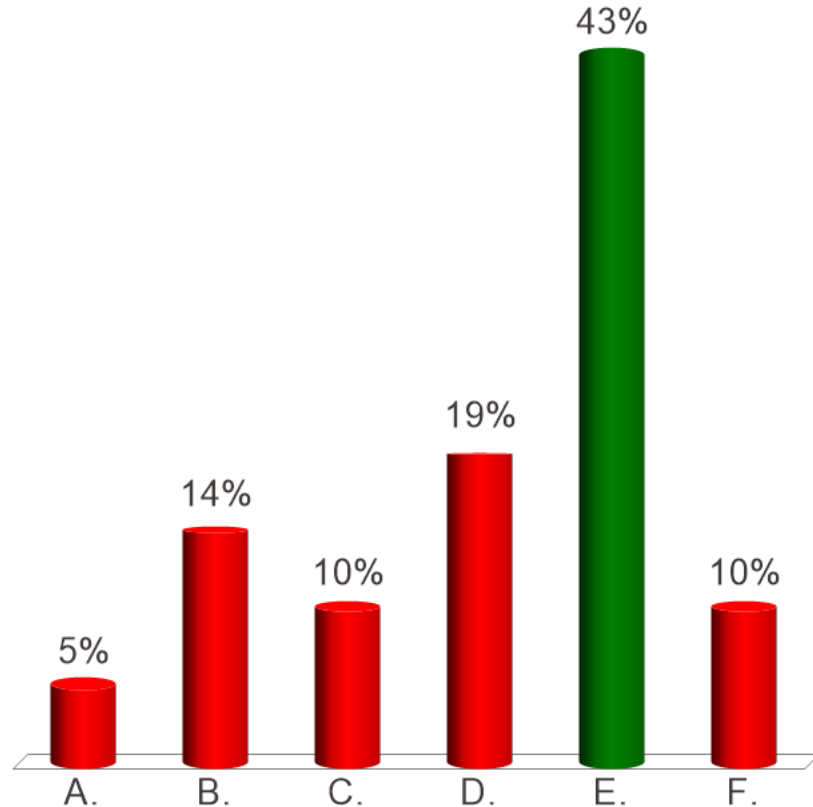
$$Q = \frac{U^2}{L\omega} > 0$$

Calculer la puissance complexe aux bornes AB

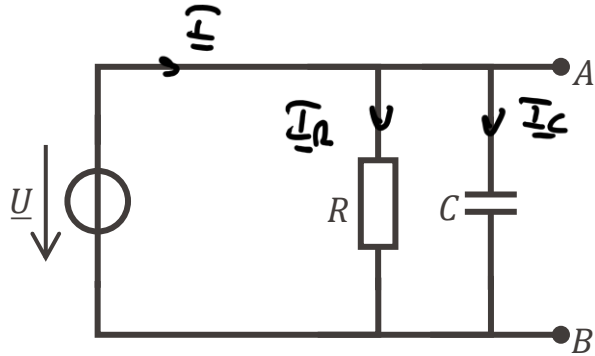


$$\begin{aligned}\underline{U} &= 10 \text{ V} \\ R &= 20 \Omega \\ C &= 5 \mu\text{F} \\ f &= 637 \text{ Hz}\end{aligned}$$

- A. $\underline{S} = 2 \cdot 10^4 - j5 \cdot 10^3 \text{ VA}$
- B. $\underline{S} = 2 \cdot 10^4 + j5 \cdot 10^3 \text{ VA}$
- C. $\underline{S} = 0.5 - j0.2 \text{ VA}$
- D. $\underline{S} = 0.5 + j0.2 \text{ VA}$
- E. $\underline{S} = 5 - j2 \text{ VA}$
- F. $\underline{S} = 5 + j2 \text{ VA}$



Calculer la puissance complexe aux bornes AB



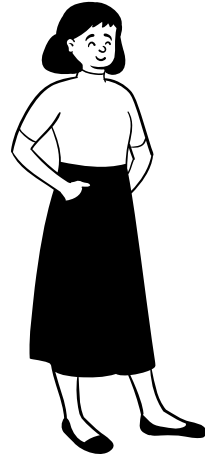
$$\begin{aligned}\underline{U} &= 10 \text{ V} \\ R &= 20 \Omega \\ C &= 5 \mu\text{F} \\ f &= 637 \text{ Hz}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{S} &= \underline{U} \underline{I}^* \\ &= \underline{U} (\underline{I}_R^* + \underline{I}_C^*)\end{aligned}$$

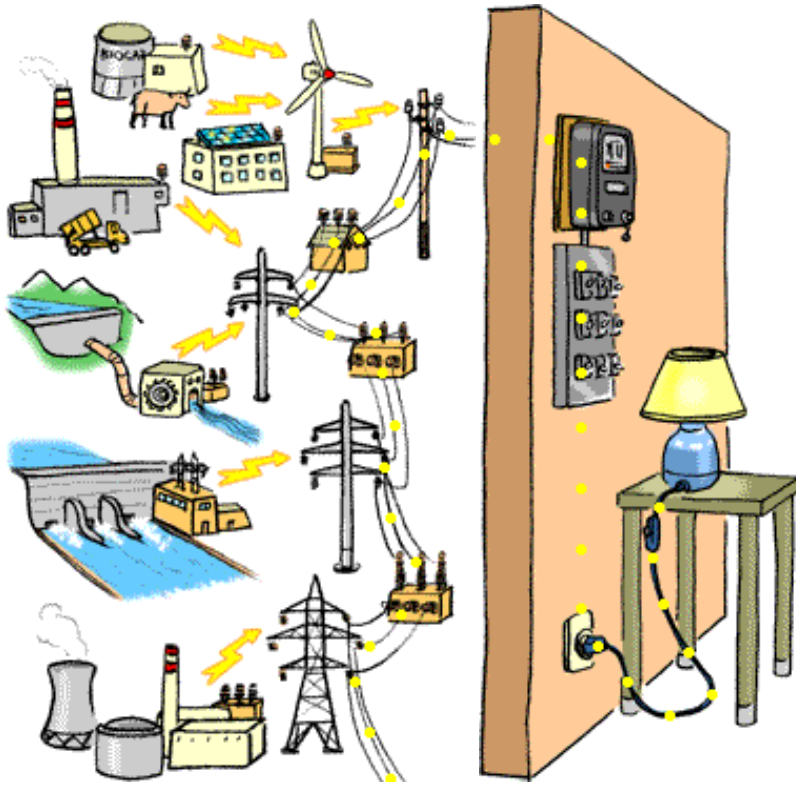
$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}_R^* + \underline{U} \underline{I}_C^*$$

$$\underline{S} = \frac{U^2}{R} - j\omega C U^2$$

Systemes de production d'electricite



Systèmes de production d'électricité



- Il existe de nombreux moyens de produire de l'électricité
- La majorité des systèmes sont basés sur des machines tournantes
- L'ingénierie des systèmes de production joue un rôle majeur dans notre société
 - Demande de plus en forte
 - Doit être stable
 - Doit polluer le moins possible

- La puissance instantanée $p(t)$ définit l'énergie que le système peut donner (ou consommer) pendant un instant infinitésimal à un instant donné
- L'énergie traduit la consommation de puissance pendant une certaine durée T

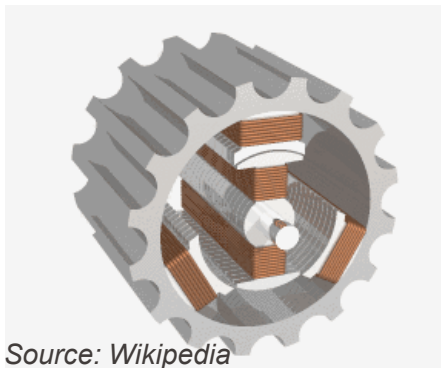
$$E = \int_0^T p(t) dt$$

Unité: joule (J), ou watt-heure (Wh)

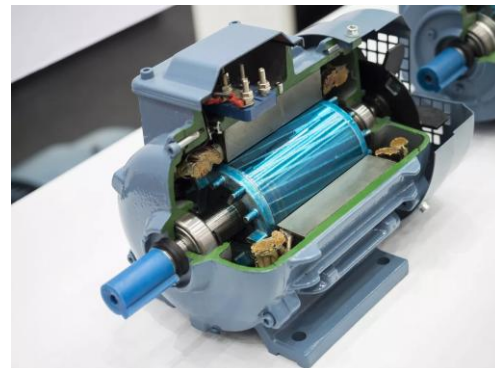
- La puissance moyenne P est l'énergie consommée (ou fournie) divisée par la durée

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{E}{T}$$

- En 1888, Nikola Tesla brevète la machine synchrone
 - Concept de machine électrique tournante pouvant fonctionner comme un moteur ou un alternateur



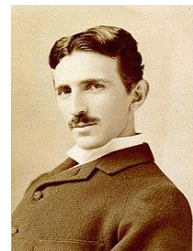
Source: Wikipedia



- Principe:
 - Si du courant traverse les enroulements de fil, le rotor se met à tourner sous l'effet de forces magnétiques
 - Inversement, si on fait tourner le rotor, une tension est générée au stator

Nikola Tesla
1856-1943

Ingénieur américain





Le fonctionnement
d'une centrale thermique classique



Plus d'animations sur
panorama.edf.com



Centrale thermique de Belchatow, Pologne
Puissance: 5.42 GW

- Les centrales à combustion utilisent des ressources fossiles (charbon, fioul...) brûlées pour générer une source de chaleur
- De la vapeur d'eau est chauffée et met en rotation une turbine
- La turbine entraîne le rotor d'un alternateur pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique



Centrale thermique de Belchatow, Pologne
Puissance: 5.42 GW

- Avantages:
 - Forte puissance installée
 - Grande stabilité

- Inconvénients:
 - Très forte pollution (production de gaz à effet de serre)
 - Utilisation de ressources fossiles

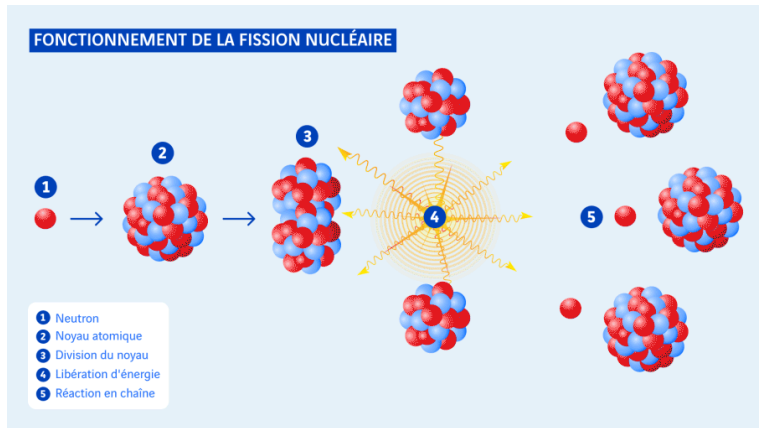


Le fonctionnement
d'une centrale nucléaire



edf

Plus d'animations sur
panorama.edf.com



- Les centrales nucléaires utilisent la fission d'isotopes d'uranium
- L'énergie dégagée par la fission est utilisée pour chauffer de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine
- La turbine entraîne le rotor d'un alternateur pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique



Centrale nucléaire de Leibstadt, Suisse
Puissance: 1.2 GW



Centrale nucléaire de Leibstadt, Suisse
Puissance: 1.2 GW

- Avantages:
 - Forte puissance installée
 - Grande stabilité
 - Peu de pollution
 - **Grande densité d'énergie**

18630 tonnes de charbon

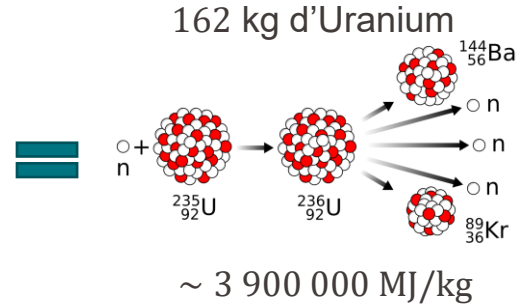


~ 15 MJ/kg

54802 barils de pétrole



~ 41 MJ/kg





Centrale nucléaire de Leibstadt, Suisse
Puissance: 1.2 GW

- Avantages:
 - Forte puissance installée
 - Grande stabilité
 - Peu de pollution
 - Grande densité d'énergie

- Inconvénients:
 - Risques d'accident (Tchernobyl, Fukushima)
 - Traitement des déchets nucléaires



Tokamak ITER, France



National Ignition Facility, USA

- Pourquoi pas la fusion?
 - Projets en cours (ITER, National Ignition Facility...)
 - Se base sur la fusion d'isotopes légers (deutérium, tritium)

18630 tonnes de charbon



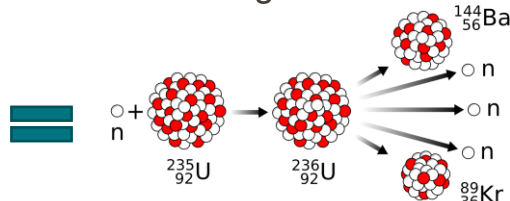
- ~ 15 MJ/kg

54802 barils de pétrole



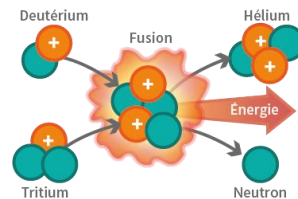
~ 41 MJ/kg

162 kg d'Uranium



~ 3 900 000 MJ/kg

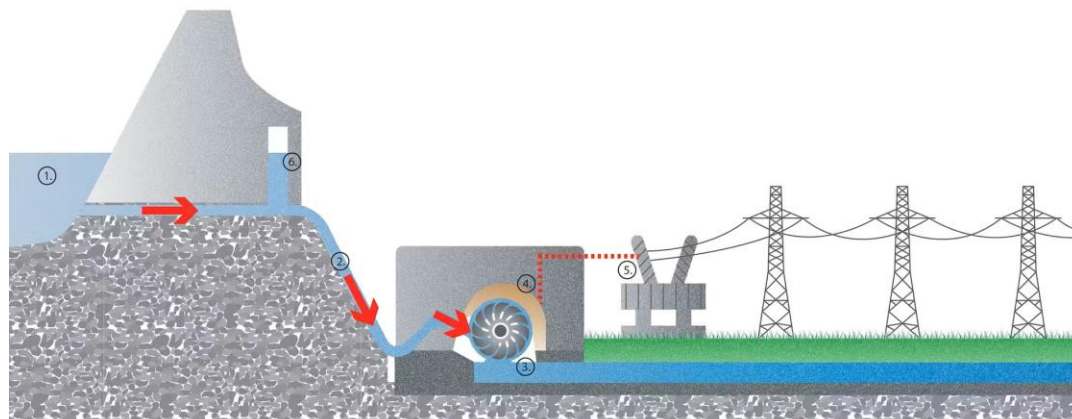
1 kg de DT



~ 632 000 000 MJ/kg

Les centrales hydroélectriques

- Les centrales hydroélectriques utilisent l'écoulement de l'eau pour mettre en rotation une turbine
- La turbine entraîne le rotor d'un alternateur pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique



1. **Le lac de retenue** recueille l'eau; c'est un réservoir d'énergie.
2. **La conduite forcée** transporte sous haute pression l'eau du lac de retenue vers une turbine dans la salle des machines.
3. **Les turbines** convertissent l'énergie d'écoulement de l'eau en énergie de rotation.

4. **Les génératrices** convertissent l'énergie de rotation en énergie électrique.
5. **Le transformateur** transforme la tension de la génératrice en 132 000 volts pour l'acheminement via la ligne de transport.
6. **La chambre d'équilibre** réduit dans la conduite le coup de bélier qui se produit au moment de la fermeture des vannes.

Les centrales hydroélectriques

- Les centrales hydroélectriques utilisent l'écoulement de l'eau pour mettre en rotation une turbine
- La turbine entraîne le rotor d'un alternateur pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique



Centrale hydroélectrique d'Itaipu, Paraguay
Puissance: 14 GW



Centrale hydroélectrique des trois gorges, Chine
Puissance: 22.5 GW

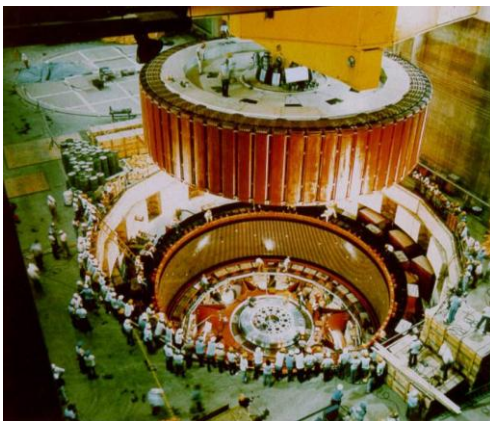


Centrale hydroélectrique d'Itaipu, Paraguay
Puissance: 14 GW

- Avantages:
 - Forte puissance installée
 - Grande stabilité
 - Peu de pollution

- Inconvénients:
 - Impact environnemental (perturbation de l'écoulement de fleuves)
 - Impact géographique (submersion de zones habitables/habitées)

Les centrales hydroélectriques - Exemple



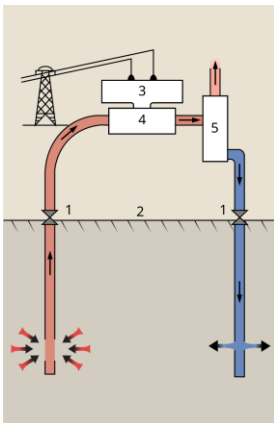
- Barrage d'Itaipu:
 - Construction: 40 000 ouvriers, 12 500 000 m³ de ciment, 2 800 000 tonnes d'acier

 - Longueur du barrage: 8 km
 - Hauteur du barrage: 200 m
 - Surface du lac de retenue: 1350 km²
 - Lac Léman: 582 km²

 - Puissance: 14 GW
 - Production annuelle: 100 000 GWh
 - Consommation suisse: 60 000 GWh
 - Produit 75% de l'électricité du Paraguay

 - Foyers déplacés: 10 000

Les centrales géothermiques



- Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de la Terre
- L'énergie géothermique est utilisée pour chauffer de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine
- La turbine entraîne le rotor d'un alternateur pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique



Centrale géothermique The Geysirs, USA
Puissance: 1.5 GW



Centrale géothermique The Geysirs, USA
Puissance: 1.5 GW

- Avantages:
 - Grande stabilité
 - Peu de pollution

- Inconvénients:
 - Risques sismiques induits
 - Coût des forages
 - Situation géographique



*Ferme éolienne de Gansu, Chine
Puissance: 10 GW*

- Les éoliennes utilisent la force du vent pour mettre en rotation une hélice
- L'hélice entraîne le rotor d'un alternateur pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique



*Parc éolien de Horns Rev, Danemark
Puissance: 0.8 GW*



*Ferme éolienne de Gansu, Chine
Puissance: 10 GW*



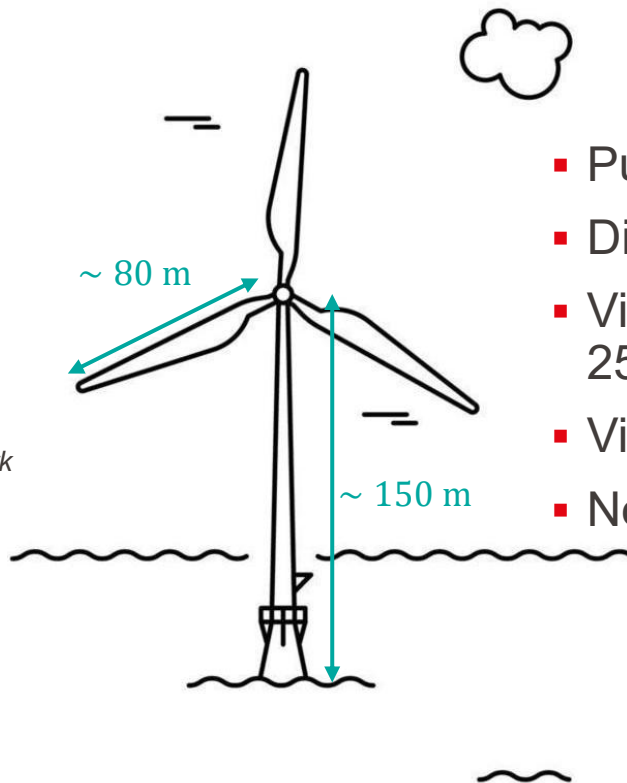
*Parc éolien de Horns Rev, Danemark
Puissance: 0.8 GW*

- **Avantages:**
 - Energie renouvelable
 - Peu de pollution

- **Inconvénients:**
 - Source intermittente
 - Difficulté de gestion
 - Surface nécessaire



Parc éolien de Horns Rev, Danemark
Puissance: 0.8 GW

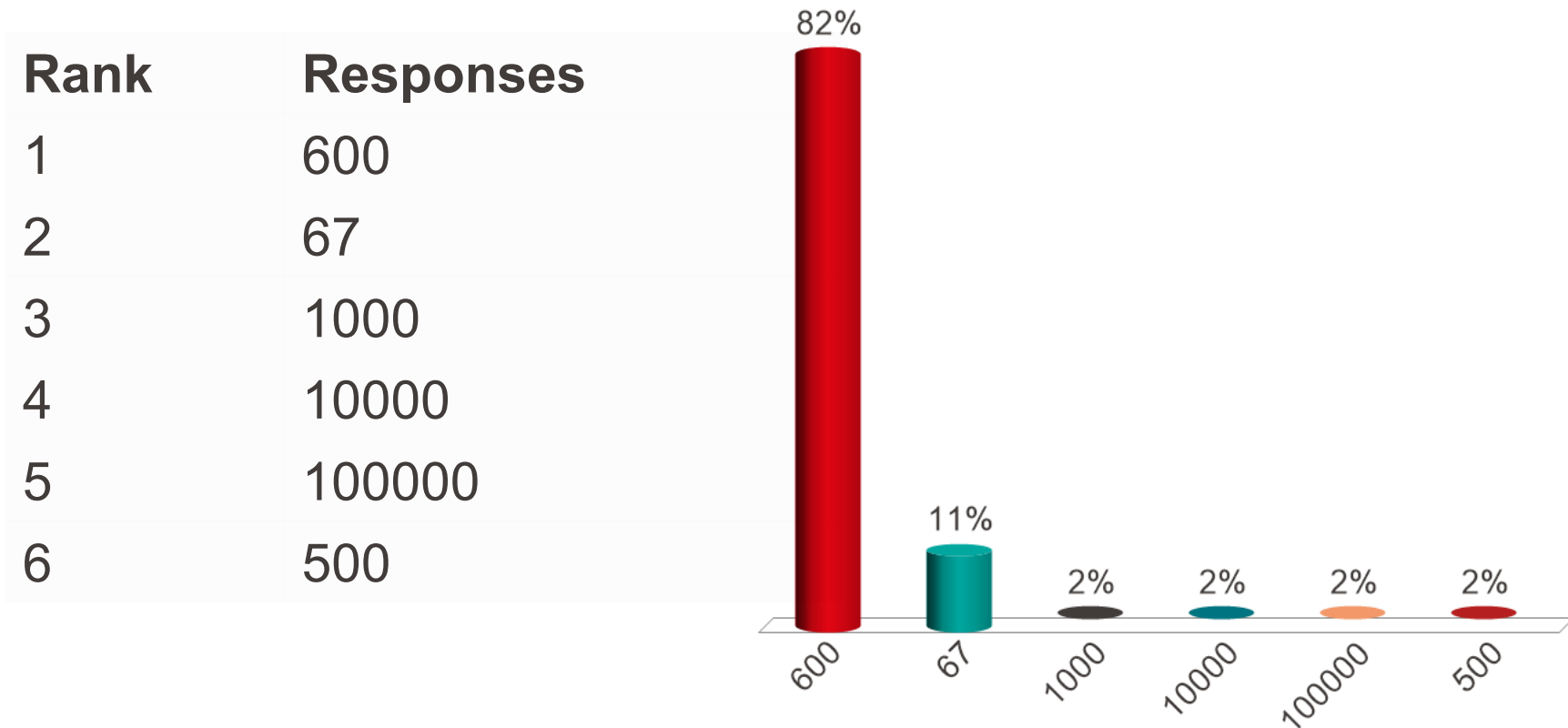


- Puissance individuelle: 2 à 8,3 MW
- Distance entre éoliennes: 560 m
- Vitesse de vent acceptée: entre 4 et 25 m/s
- Vitesse de l'extrémité: 104 m/s
- Nombre d'éoliennes: 220

Les parcs éoliens - Exemple

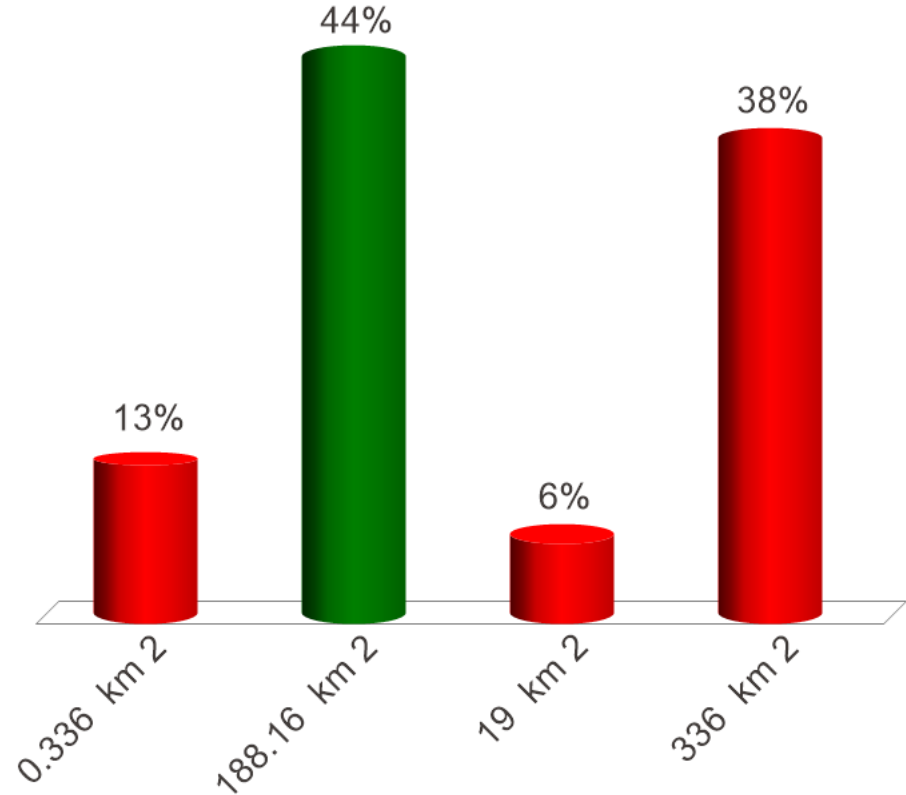


Combien d'éoliennes de 2 MW sont nécessaires pour produire autant qu'une centrale nucléaire de 1.2 GW?



Avec une distance de 560 m entre éoliennes, quelle surface cela représente-t-il?

- A. 0.336 km^2
- ✓ B. 188.16 km^2
- C. 19 km^2
- D. 336 km^2



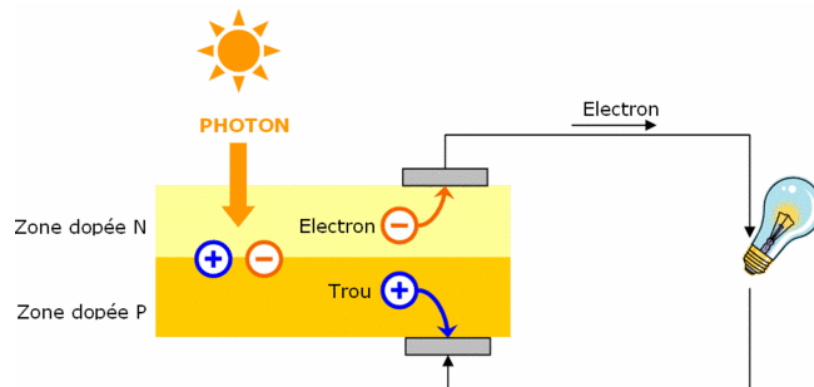


Centrale solaire photovoltaïque de Bhadla, Inde
Puissance: 2,2 GW



Ombrière photovoltaïque pour parking,
Saint-Aunès, France
Puissance: 1,15 MW

- Les panneaux photovoltaïques transforment l'énergie solaire en énergie électrique
- Ce système n'est pas basé sur une machine tournante





Centrale solaire photovoltaïque de Bhadla, Inde
Puissance: 2,2 GW



Ombrière photovoltaïque pour parking,
Saint-Aunès, France
Puissance: 1,15 MW

■ Avantages:

- Energie renouvelable
- Peu de pollution
- Peut être intégré à des bâtiments

■ Inconvénients:

- Source intermittente
- Difficulté de gestion
- Surface nécessaire
- Dépend fortement de l'emplacement

Fig. 9 Entwicklung der einzelnen Erzeugerkategorien seit 1950
Evolution des différentes catégories de production depuis 1950

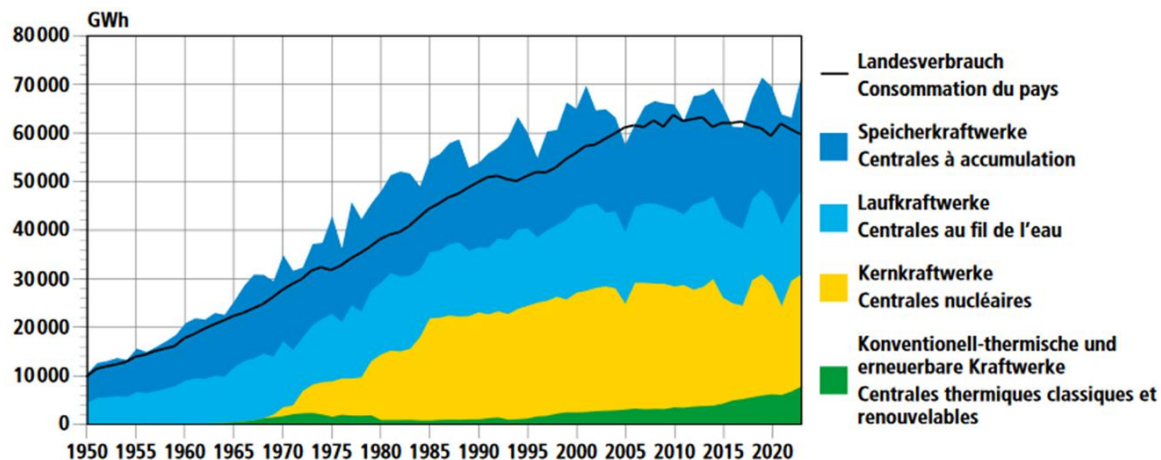
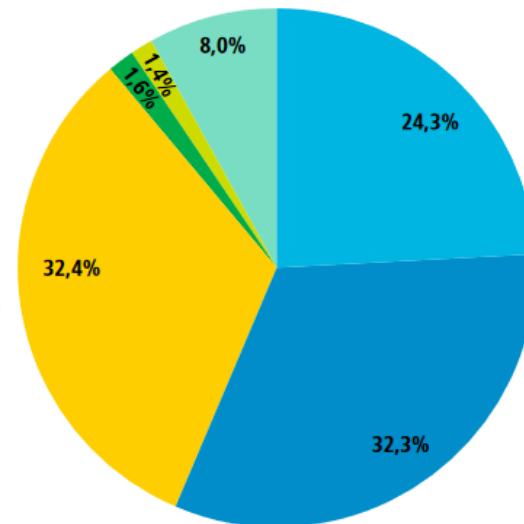
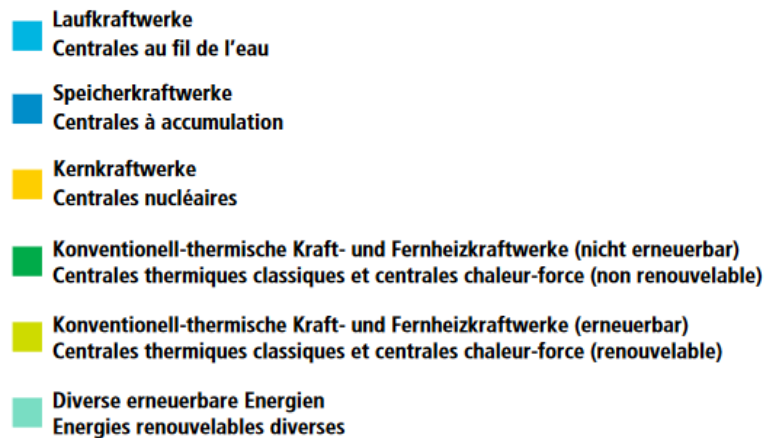


Fig. 1 Stromproduktion 2023 nach Kraftwerkkategorien
Production d'électricité en 2023 par catégories de centrales





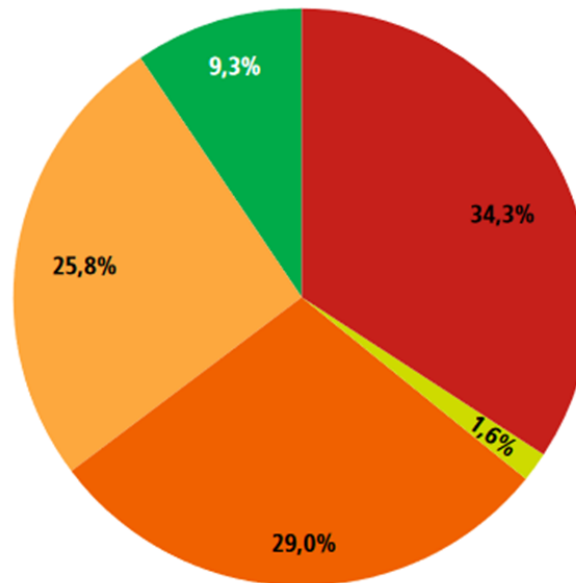
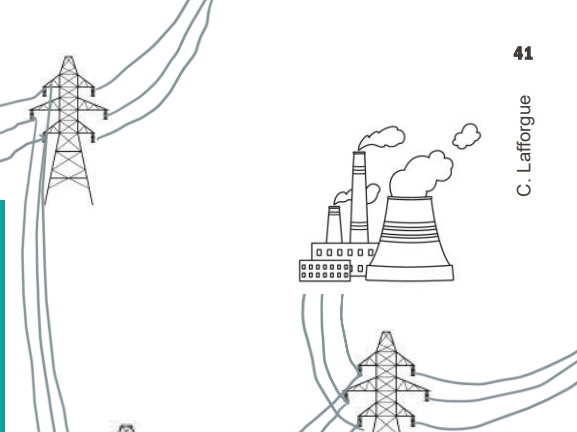
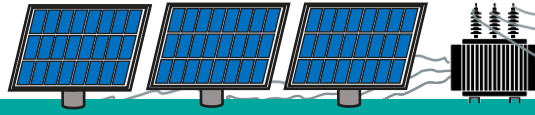
 BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2023 (Fig. 1)
 OFEN, Statistique suisse de l'électricité 2023 (fig. 1)

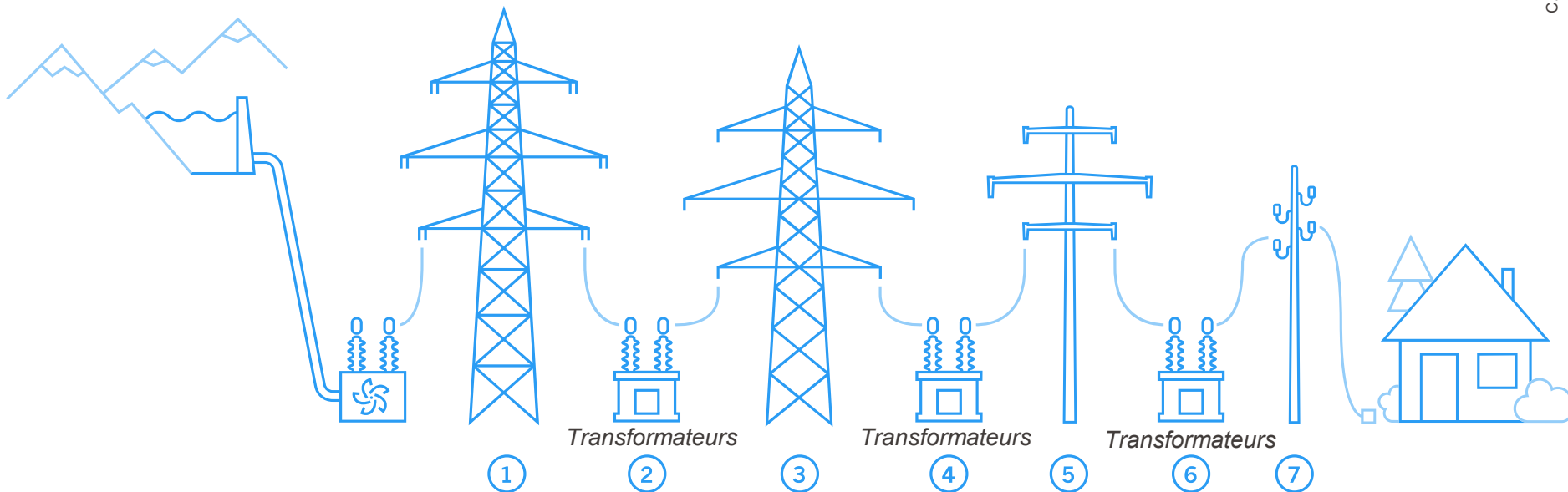
Fig. 2 Stromverbrauch 2023 nach Kundenkategorien
Parts des catégories de clients en 2023



© BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2023 (Fig. 2)
OFEN, Statistique suisse de l'électricité 2023 (fig. 2)

Gestion et transport d'électricité





1) Réseau très haute tension

Transport de l'électricité depuis les grandes centrales et l'étranger

Tension: 380/220 kV

3) Réseau haute tension

Transport de l'électricité suprarégional

Tension: de 36 kV à 220 kV

5) Réseau moyenne tension

Transport de l'électricité régional

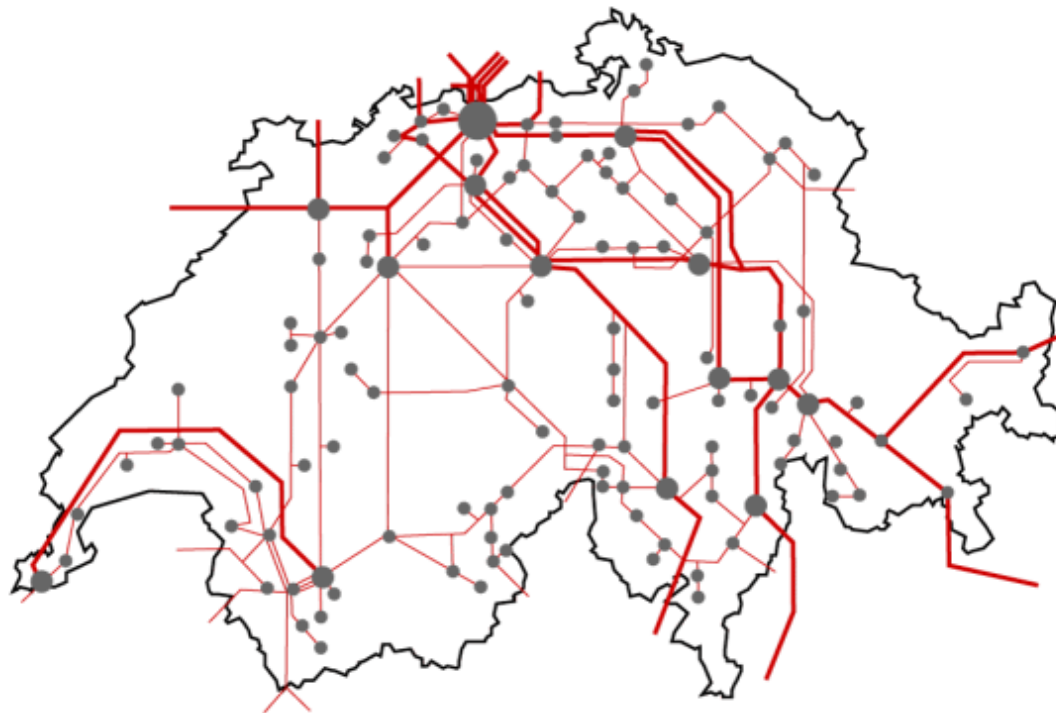
Tension: de 1 kV à 36 kV

7) Réseau basse tension

Acheminement domestique

Tension: 220/400 V

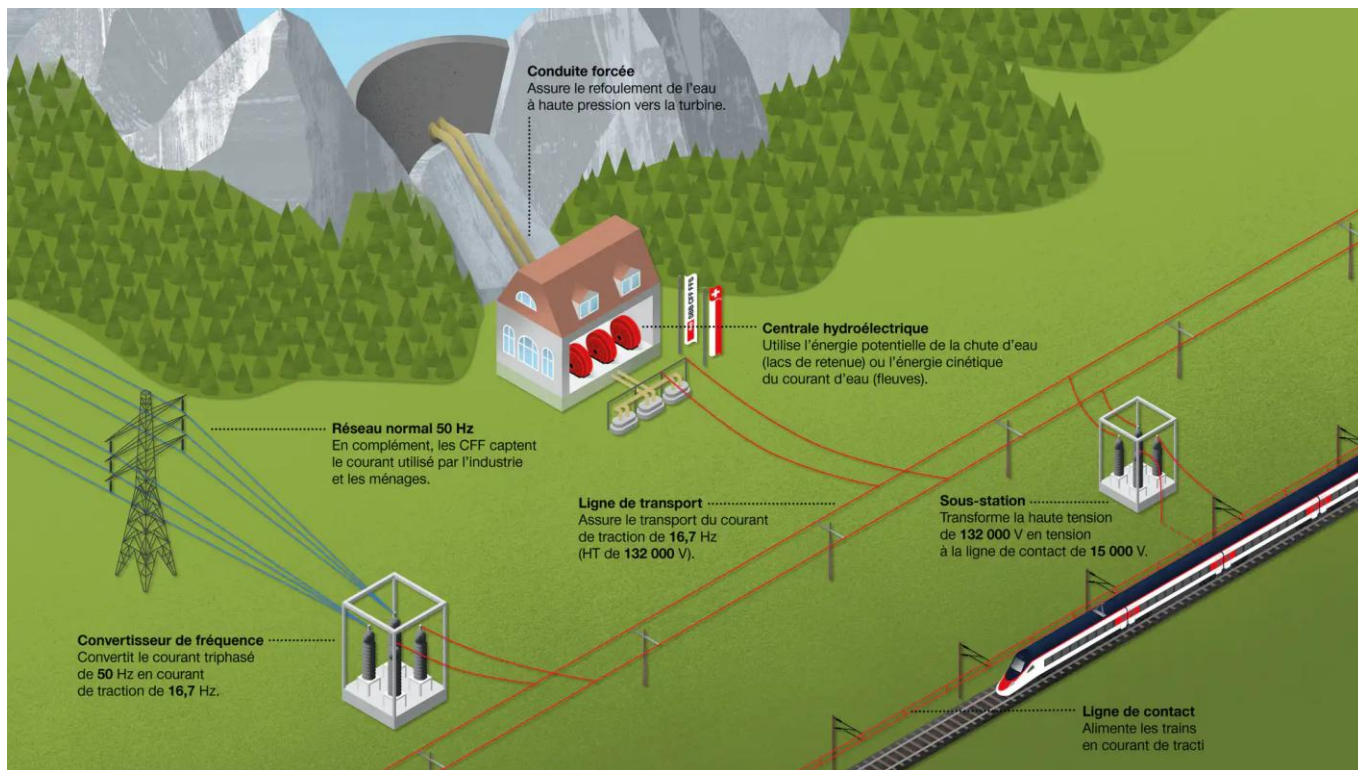
Exemple: Réseau très haute tension suisse



— 380 kV : **1780 km**

— 220 kV : **4920 km**

Exemple: réseau de distribution des CFF



Transport de l'électricité: la guerre des courants

- La distribution d'électricité se faisait d'abord en régime continu (DC)
 - Réseau géré par Thomas Edison

- Au début des années 1880, George Westinghouse installe un réseau en courant alternatif (AC)
 - Basé entre autres sur les inventions et théories de Nikola Tesla

- Une compétition entre les deux compagnies commence: la guerre des courants
 - Edison prétend que le réseau AC est trop dangereux
 - Westinghouse prétend que le réseau AC est meilleur pour transporter l'électricité sur de longues distances

Transport de l'électricité: la guerre des courants

- Rappels:

$$R = \frac{\rho L}{S}$$



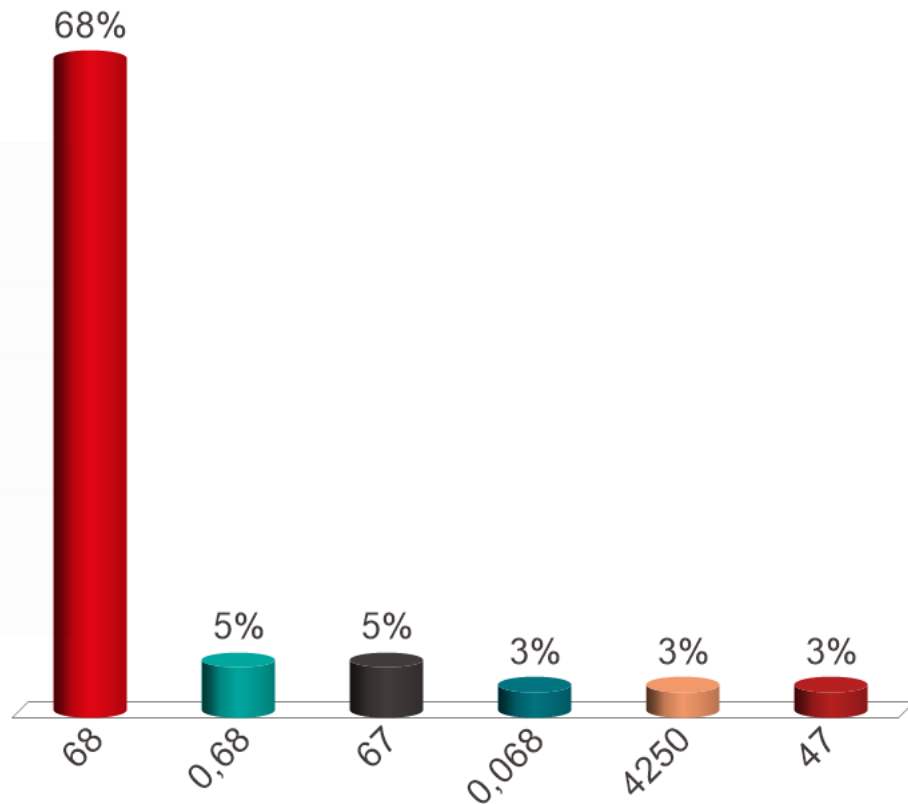
Que vaut la resistance (en Ω)?

$$\rho = 17 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$$

$$S = 25 \text{ mm}^2$$

$$L = 100 \text{ km}$$

Rank	Responses
1	68
2	0,68
3	67
4	0,068
5	4250
6	47



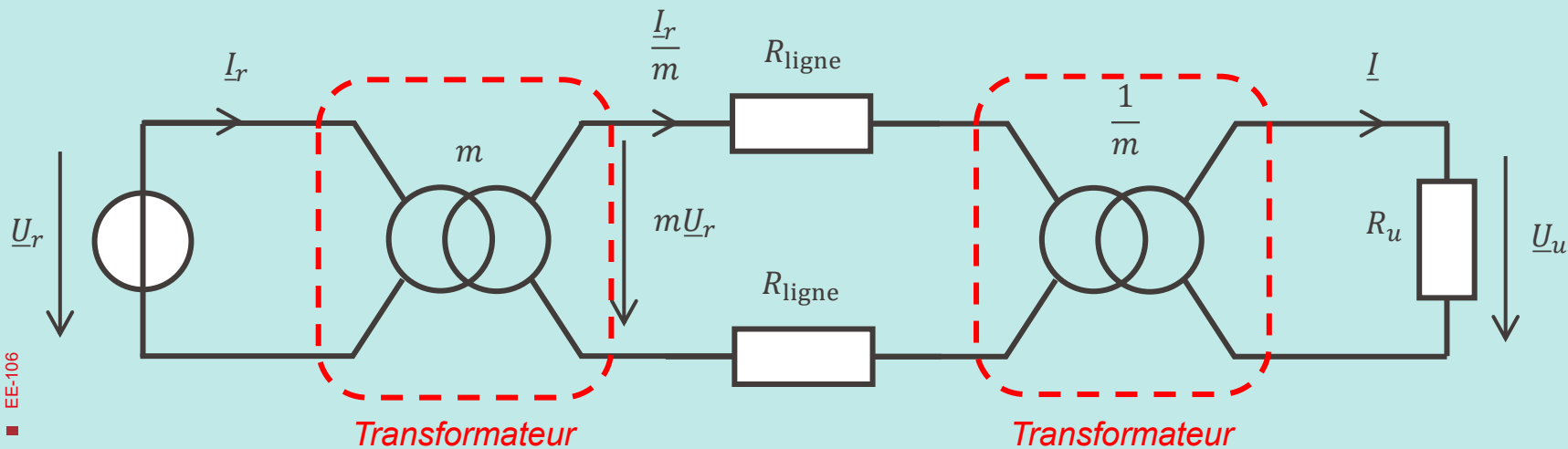
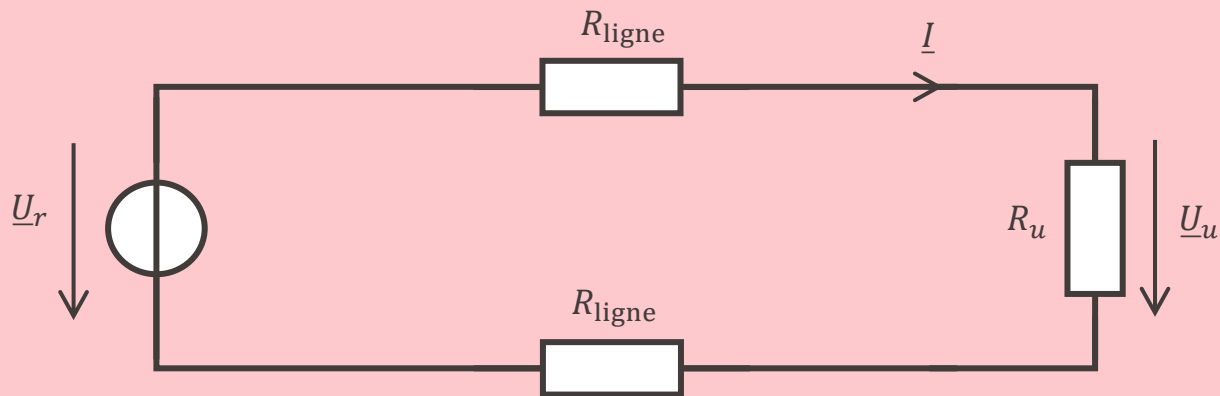
Transport de l'électricité: la guerre des courants

- Rappels:

$$R = \frac{\rho L}{S}$$

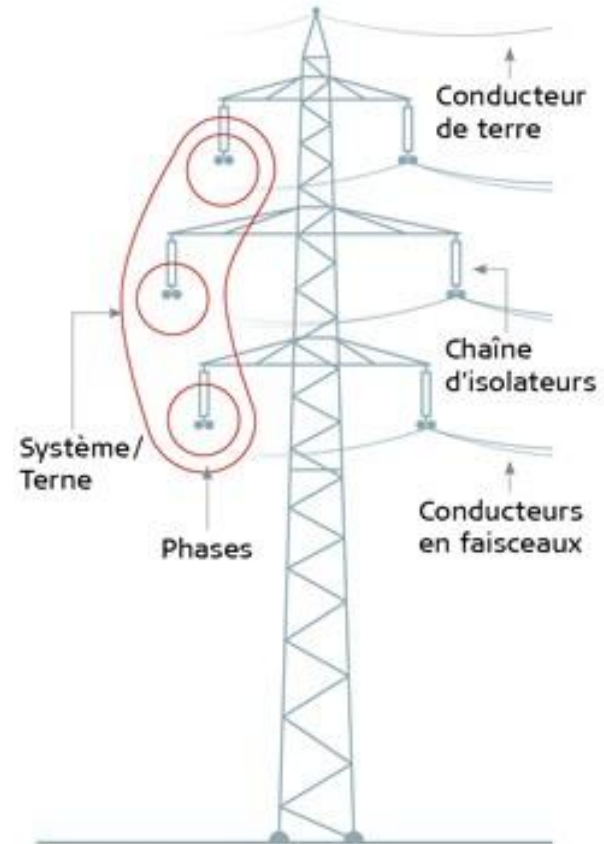
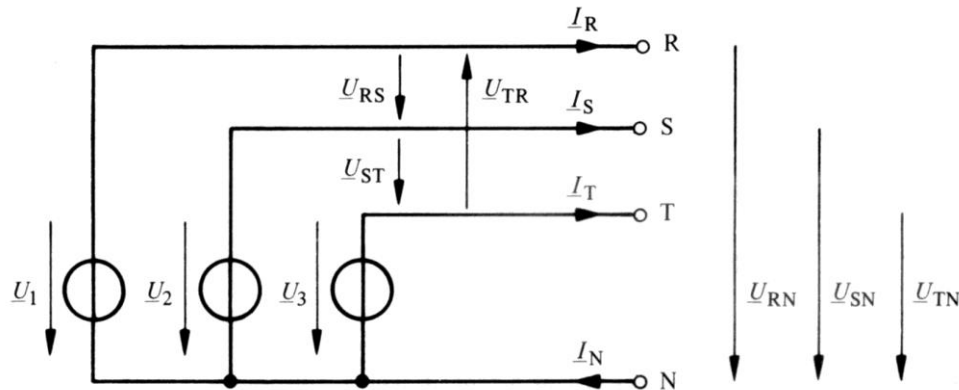
$$P_{\text{Joule}} = RI^2$$

- La puissance perdue dans les lignes est proportionnelle à la longueur des fils et au carré du courant!



- On utilise un réseau triphasé
 - Les machines électriques ont un fonctionnement optimal en polyphasé
 - On peut montrer que dans ce cas la puissance instantanée totale est constante

Schéma d'une source triphasée:



- **Systeme polyphasé**

Un systeme polyphasé est un ensemble de m grandeurs (tensions ou courants) sinusoïdales de **même fréquence**, déphasées les unes par rapport aux autres et appelées **phases**.

- **Systeme polyphasé symétrique**

Un systeme polyphasé symétrique à m phases et d'ordre k est un ensemble de m grandeurs sinusoïdales (tensions ou courants) de **même fréquence**, de **même valeur efficace** et telles que le **déphasage** entre deux grandeurs consécutives vaut:

$$\frac{k2\pi}{m}$$

k est appelé **ordre de succession des phases**

- **Systeme direct**

On appelle **direct** un systeme dont le diagramme des phaseurs est ordonne dans le sens trigonometrique negatif (sens des aiguilles d'une montre).

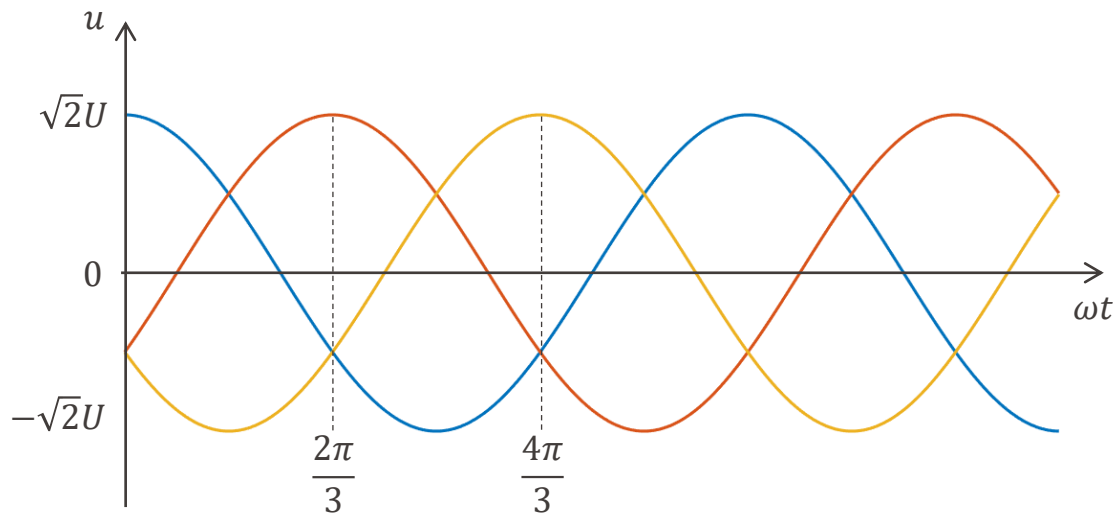
- **Systeme inverse**

On appelle **inverse** un systeme dont le diagramme des phaseurs est ordonne dans le sens trigonometrique positif (sens inverse des aiguilles d'une montre).

- **Systeme homopolaire**

On appelle **homopolaire** un systeme dans lequel toutes les grandeurs sont en phase.

- Système triphasé **direct** d'ordre 1 ($m = 3, k = 1$).



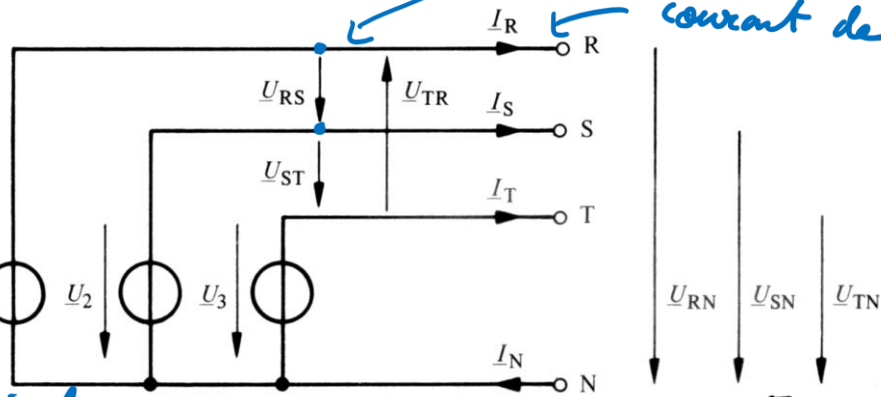
$$u_1(t) = \sqrt{2}U \cos(\omega t)$$

$$u_2(t) = \sqrt{2}U \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_3(t) = \sqrt{2}U \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Transport de l'électricité: le triphasé

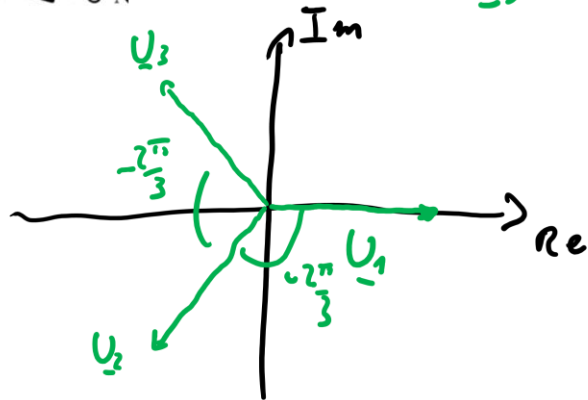
Schéma d'une source triphasée:



tension composée / tension de ligne
courant de ligne

tension simple

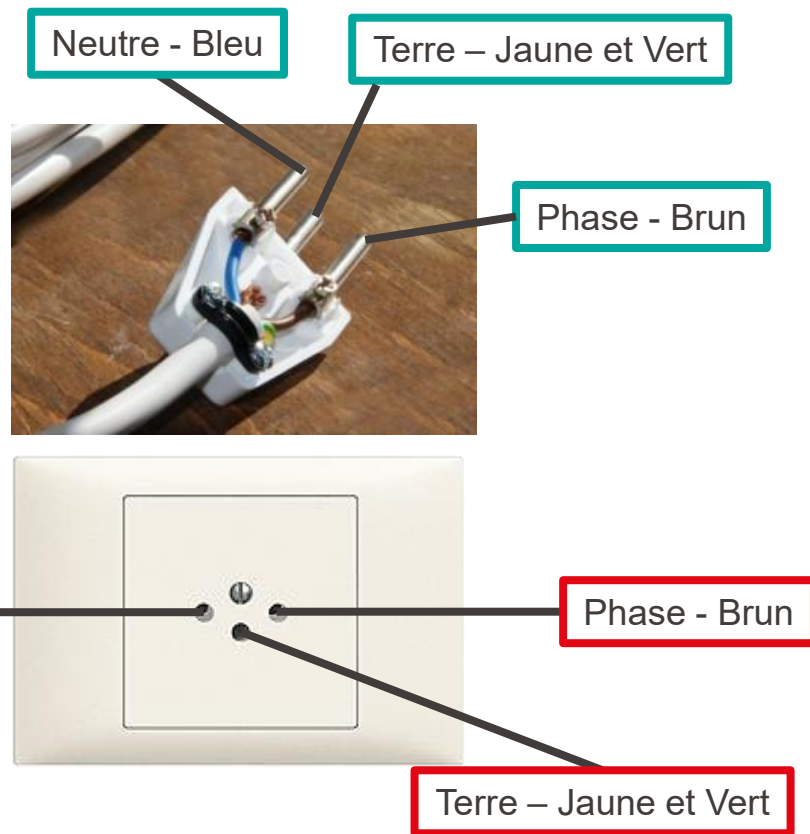
$$\begin{aligned}
 \underline{U}_1 &= U \\
 \underline{U}_2 &= U e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad (= U_1 e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \\
 \underline{U}_3 &= U e^{-j\frac{4\pi}{3}} \quad (= U_2 e^{-j\frac{2\pi}{3}})
 \end{aligned}$$



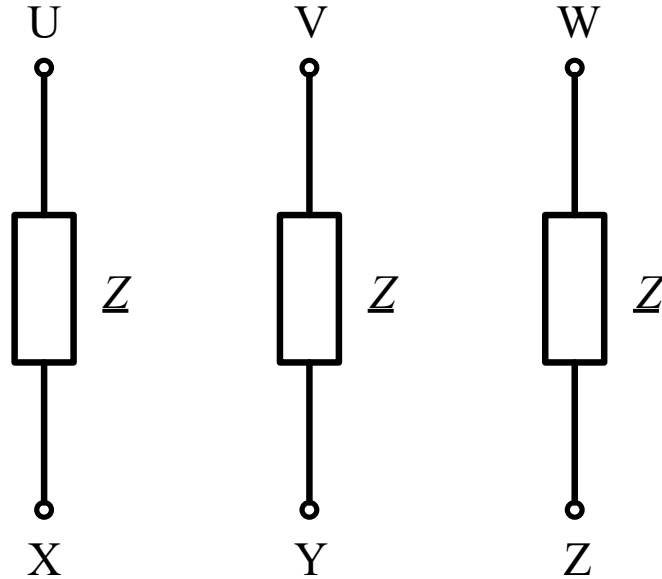
$$\underline{U}_{RS} = \sqrt{3} \underline{U}_1 e^{j\frac{\pi}{6}}$$

Transport de l'électricité: prise électrique domestique

- A la maison, on reçoit:
 - Un fil de phase
 - Un fil de neutre
 - Un fil de terre (sécurité)



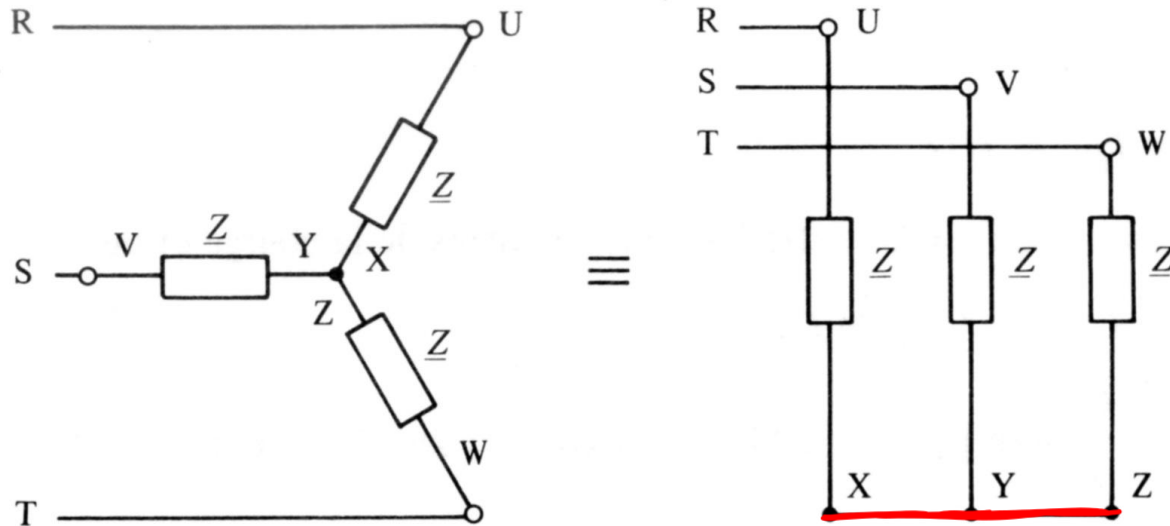
Charge triphasée équilibrée

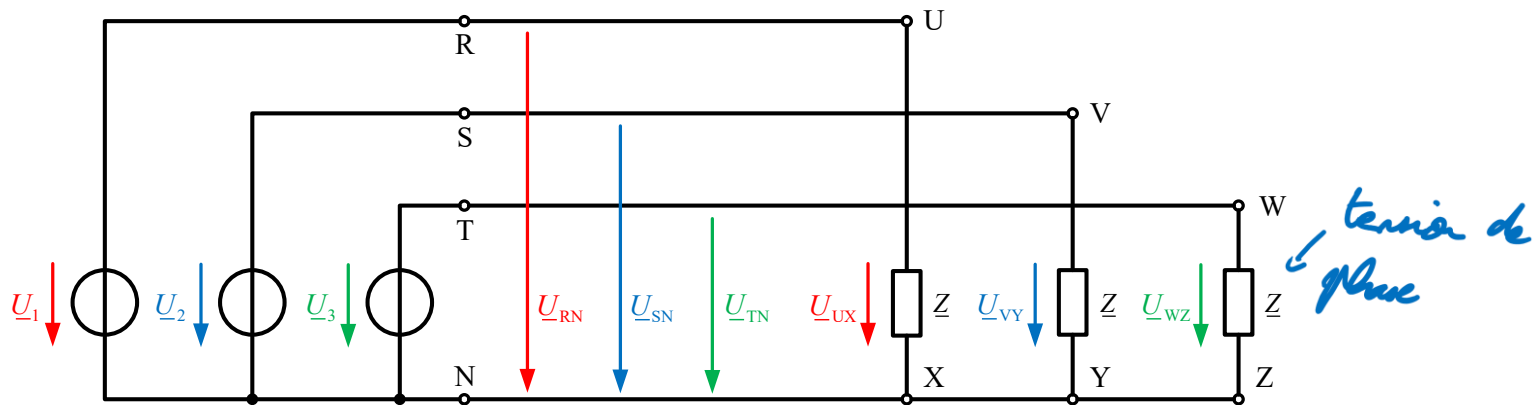


- Trois impédances identiques
- Ces trois impédances peuvent être connectées en **étoile** ou en **triangle**

Connexion en étoile

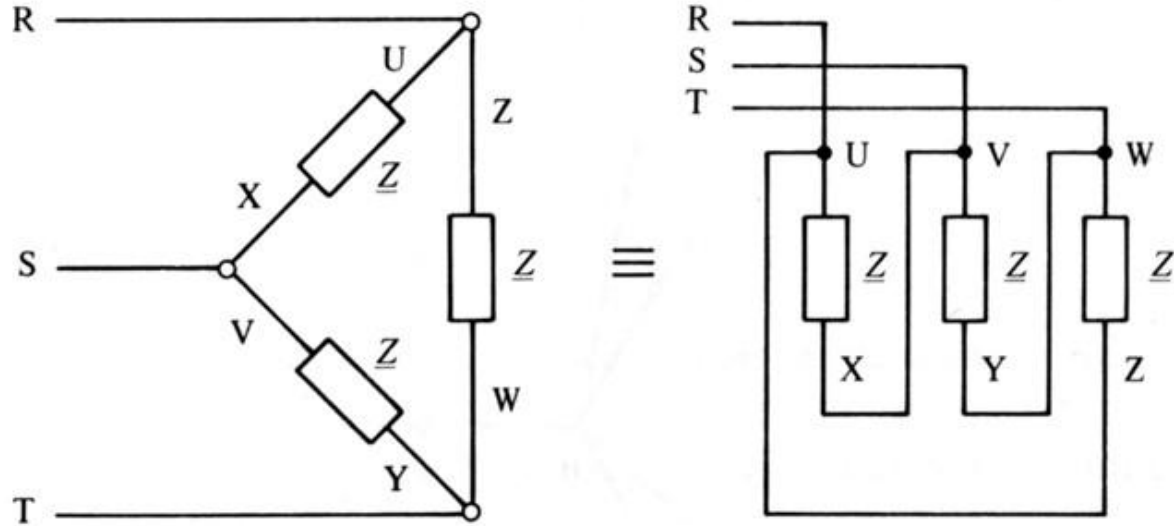
- Montage symbolisé par le signe **Y**
- Le point commun (XYZ) est appelé **point neutre de la charge**

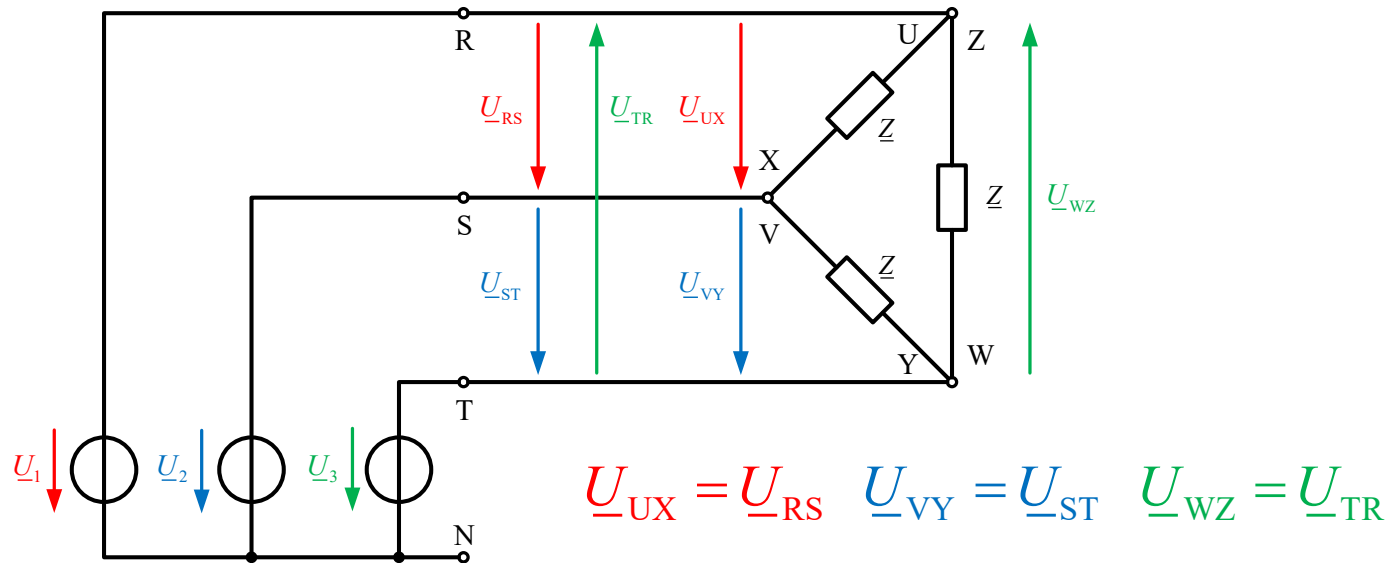




Connexion en triangle

- Montage symbolisé par le signe Δ





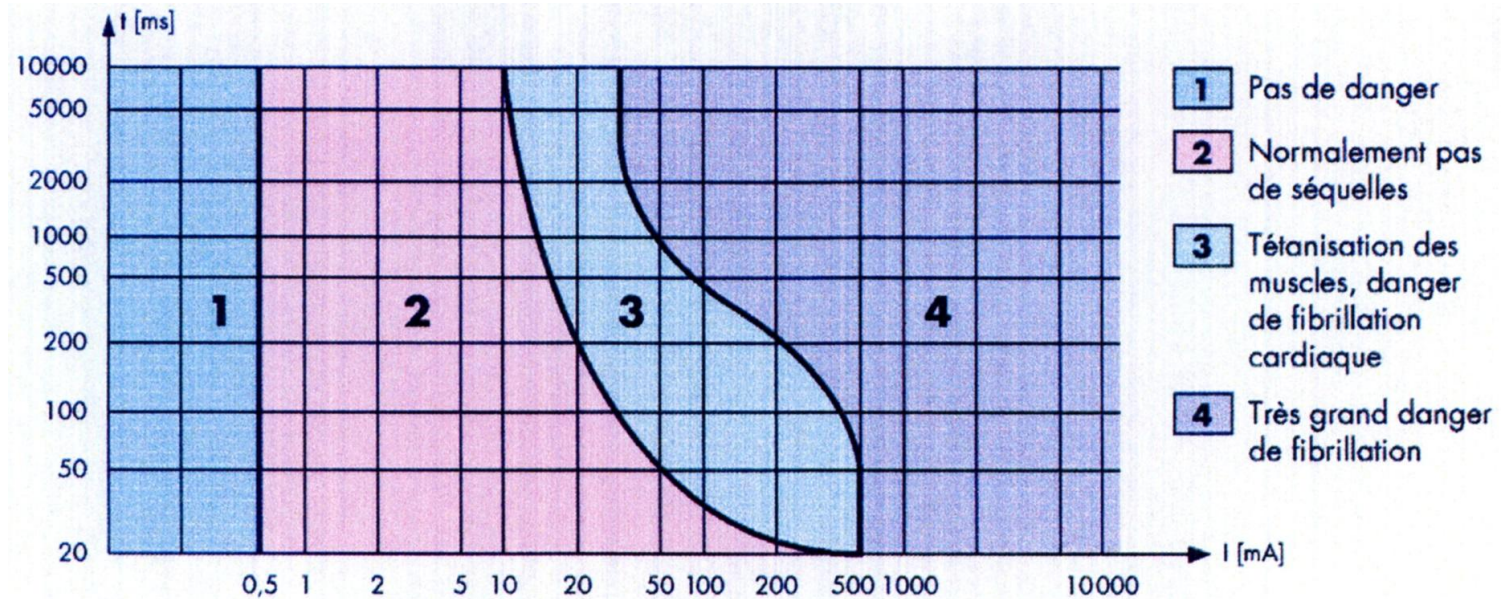
Conversion triangle - étoile

Le passage d'un montage en *triangle* à celui en *étoile* d'une charge d'impédances est utilisé pour :

- Obtenir une réduction momentanée de la puissance.
Technique largement utilisée pour le démarrage de moteurs asynchrones
- Permettre l'adaptation à un réseau ayant une tension plus élevée.

Les dangers liés à l'électricité

- L'électricité reste dangereuse et nécessite une manipulation avec précaution





Points clés

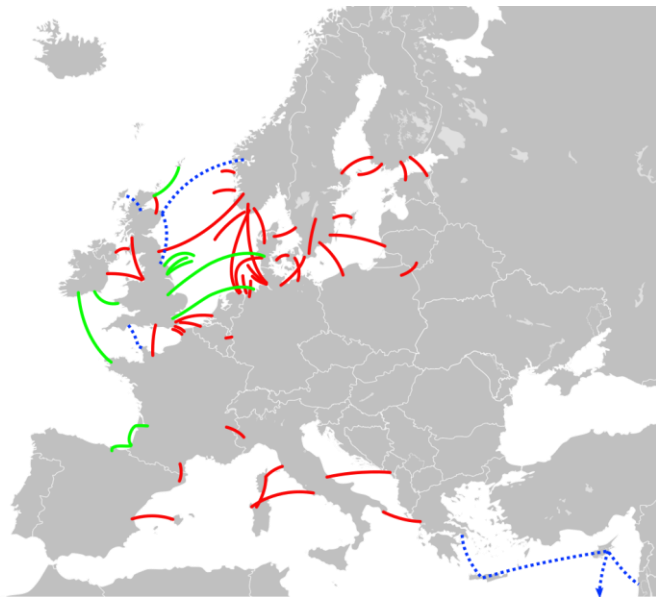
- La production d'électricité est principalement basée sur l'usage d'une machine tournante
 - Les enjeux actuels sont essentiellement tournés vers le développement durable

- L'électricité est principalement transportée en régime sinusoïdal permanent
 - Plusieurs niveaux de réseau sont utilisés, caractérisés par le niveau de tension
 - L'élévation de la tension réduit les pertes Joule dans les lignes
 - Cela a été rendu possible par l'invention du transformateur électrique

Pour aller plus loin



- Il existe tout de même des réseaux en courant continu
 - Réseaux très haute tension sur de très longues distances
 - La puissance réactive devient trop importante (effet inductif ou capacitif des lignes elles-mêmes): le passage en DC annule la puissance réactive
 - Permet de connecter des réseaux AC qui ont des fréquences différentes



- **Rouge** : en service
- **Vert** : en construction
- **Bleu** : à l'étude



- De nombreux projets de production d'énergie renouvelables sont à l'étude
 - Centrale solaire Noor Ouarzazate, Maroc
 - Projet Solaris, ESA



R. Dufy, « La fée électricité »
Musée d'art moderne, Paris



**Merci pour votre
attention**