

5. Production et transmission de l'énergie électrique

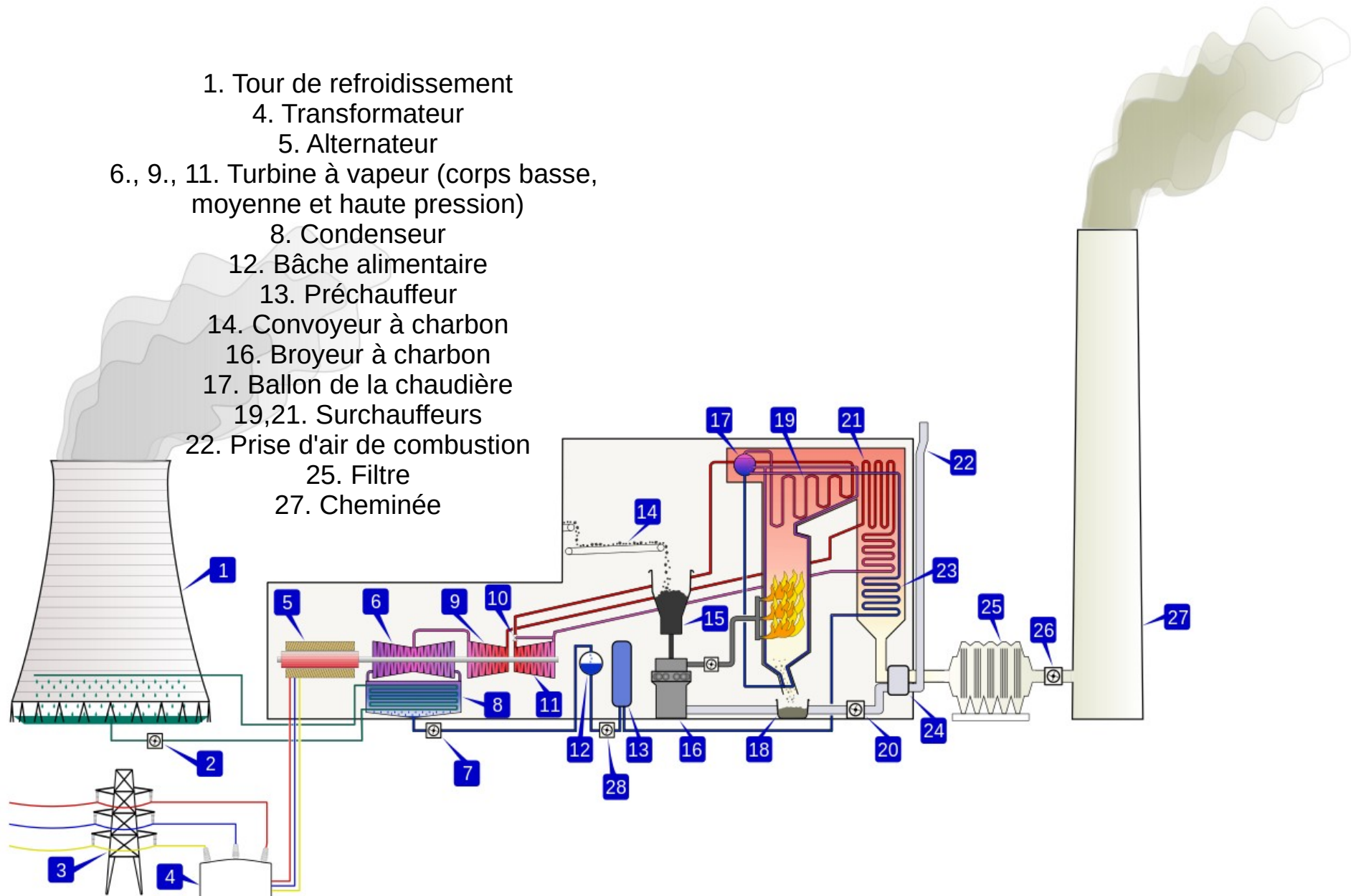
Centrales électriques
Systèmes sinusoïdales triphasés
Réseaux électriques

Types des centrales électriques

- Une **centrale électrique** est un site industriel qui produit de l'énergie électrique
- Selon l'**énergie primaire** :
 - ♦ combustibles fossiles (charbon, gaz naturel, fioul, diesel...)
 - ♦ autres combustibles (biomasse...)
 - ♦ nucléaire
 - ♦ solaire
 - ♦ hydraulique (courant d'eau, chute de l'eau, marée...)
 - ♦ éolienne (vent)
- Selon la **technologie** :
 - ♦ turbine à vapeur + alternateur
 - applicable à la majorité des énergies primaires
 - ♦ turbine à combustion + alternateur
 - ♦ turbine hydraulique + alternateur
 - ♦ turbine éolienne + alternateur
 - ♦ moteur à explosion + alternateur
 - ♦ photovoltaïque
- **Énergie mécanique intermédiaire**
 - ♦ En jeu dans la plupart des technologies
 - ♦ Rares exceptions : photovoltaïque ; pile à combustible (faible puissance)

Centrale thermique à charbon

1. Tour de refroidissement
4. Transformateur
5. Alternateur
- 6., 9., 11. Turbine à vapeur (corps basse, moyenne et haute pression)
8. Condenseur
12. Bâche alimentaire
13. Préchauffeur
14. Convoyeur à charbon
16. Broyeur à charbon
17. Ballon de la chaudière
- 19,21. Surchauffeurs
22. Prise d'air de combustion
25. Filtre
27. Cheminée



Source : Wikimedia Commons (BillC)

Caractéristiques

- Puissance d'une centrale : ≤ 1000 MW
- Processus de production **aisé et peu coûteux**
- Indépendant des conditions **météorologiques ou climatiques**
- Le **prix du charbon** est compétitif et relativement stable
 - ♦ La rentabilité énergétique dépend de la qualité du charbon utilisé
- Rendement :
 - ♦ 30 % type
 - ♦ 2100 kWh/tonne (monde), 2600 kWh/tonne (Europe)
- Rôle majeur dans la production mondiale
 - ♦ monde 41%; Pologne 86 %; Chine 81 %; Australie 69 %; Allemagne 43 %
- Impact négatif et lourd sur l'**environnement**
 - ♦ Rejets de combustion du charbon : méthane (CH_4), oxydes d'azote (NO_x), oxydes de soufre (SO_2), gaz carbonique (CO_2) qui contribue à l'effet de serre
 - ♦ Plus de CO_2 émis qu'avec le pétrole et beaucoup plus qu'avec le gaz naturel

Minimisation des problèmes environnementaux

- Utilisation du **charbon propre**
 - ◆ Désulfuration et dénitrification avant la combustion
- Centrales **supercritiques** et ultra-supercritiques
 - ◆ Température et pression de la vapeur plus élevées : 600 °C/620 °C à 275 bars contre près de 560 °C à 180 bars
 - ◆ Rendement de 45 % contre 30%
- Technologie du **lit fluidisé**
 - ◆ Le charbon concassé en petites particules qui brûlent en suspension
 - ◆ Combustion totale à une température de 850 à 900 °C (au lieu de 1400 °C)
 - ◆ Possibilité de brûler des charbons de basse qualité
 - ◆ Faible teneur des fumées en oxydes d'azotes ainsi qu'en métaux lourds
 - ◆ Désulfuration des fumées
 - ◆ Retient dans les cendres la quasi-totalité du chlore et du fluor
- **Captage** et stockage du CO₂



Source : Wikimedia Commons (Fletcher6)

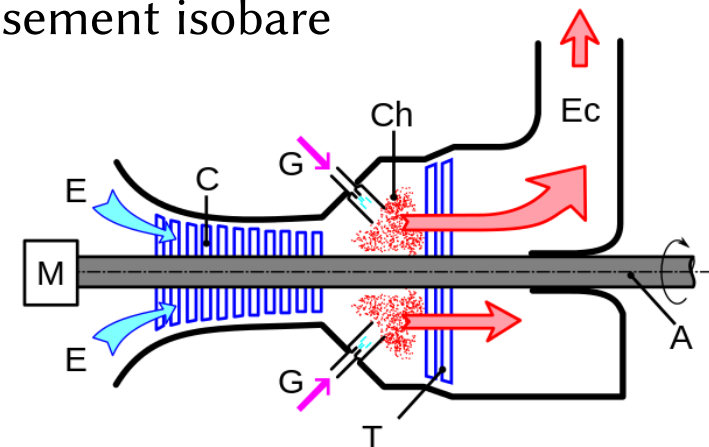


Autres types des centrales à flamme

- Avec **chaudières**
 - ♦ Au fioul ou à gaz naturel
 - ♦ Très pareilles aux centrales à charbon sauf que la construction de la chaudière est adaptée pour un combustible liquide ou gazeux
- Avec **turbines à combustion**
 - ♦ C'est un **moteur thermique**
 - ♦ **Cycle de Joule** : compression adiabatique (consomme de l'énergie mécanique) → chauffage isobare (comme pour un moteur Diesel) → détente adiabatique jusqu'à la pression ambiante (ici **production de l'énergie mécanique**) → refroidissement isobare
 - ♦ Combustion continue
 - ♦ Combustibles : gaz naturel, propane, butane, naphta, alcool, kérosène, fioul, pétrole
 - ♦ Rendement encore plus haut avec un **cycle combiné** (chaudière de récupération)
- Total **gaz** : 22 % de la production mondiale



Source : Wikimedia Commons
(InfraServ Knapsack, F5ZV, Malyszczk)

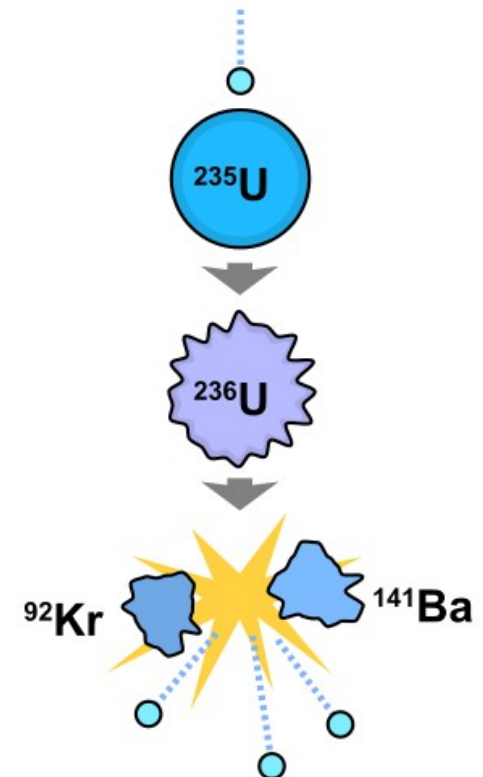


Réacteur nucléaire

- Un **réacteur nucléaire** permet de produire une **réaction de fission en chaîne** et d'en contrôler l'intensité
- La construction d'un réacteur comporte :
- un **combustible**
 - ♦ La fission s'y produit
- un fluide **caloporteur** (liquide ou gazeux)
 - ♦ Actionne la turbine de l'alternateur qui à son tour **produit l'énergie électrique**
- un **modérateur**
 - ♦ Ralentit les neutrons afin de favoriser la réaction en chaîne
 - ♦ Absent dans les réacteurs à neutrons rapides
- un **moyen de contrôle** de la réaction en chaîne :
 - ♦ des **barres de commande**
 - ▶ Constituées d'un matériau absorbant les neutrons, on les fait plus ou moins rentrer dans le cœur du réacteur
 - ♦ des **substances dissoutes** dans l'eau (p. ex. acide borique)
 - ▶ On en varie la concentration

Fission nucléaire

- La **fission nucléaire** consiste à **casser des noyaux lourds**
 - ♦ Souvent on utilise l'uranium 235 (^{235}U) ou le plutonium 239 (^{239}Pu)
- Sous l'effet de l'impact d'un neutron, les noyaux lourds se **divisent en deux atomes** plus petits en libérant de l'**énergie** et des **neutrons**
- Les neutrons libérés peuvent alors **percuter un autre atome** lourd : une **réaction en chaîne**
- Le nombre des neutrons produits **doit être égal** au nombre des neutrons qui disparaissent (p. ex. absorbés par d'autres atomes)
 - ♦ Si ce premier nombre est trop bas, la réaction s'arrête
 - ♦ Si ce nombre est trop haut, la réaction s'emballe
 - ♦ Cette égalité est achevée à l'aide du moyen de contrôle (p. ex. les barres)

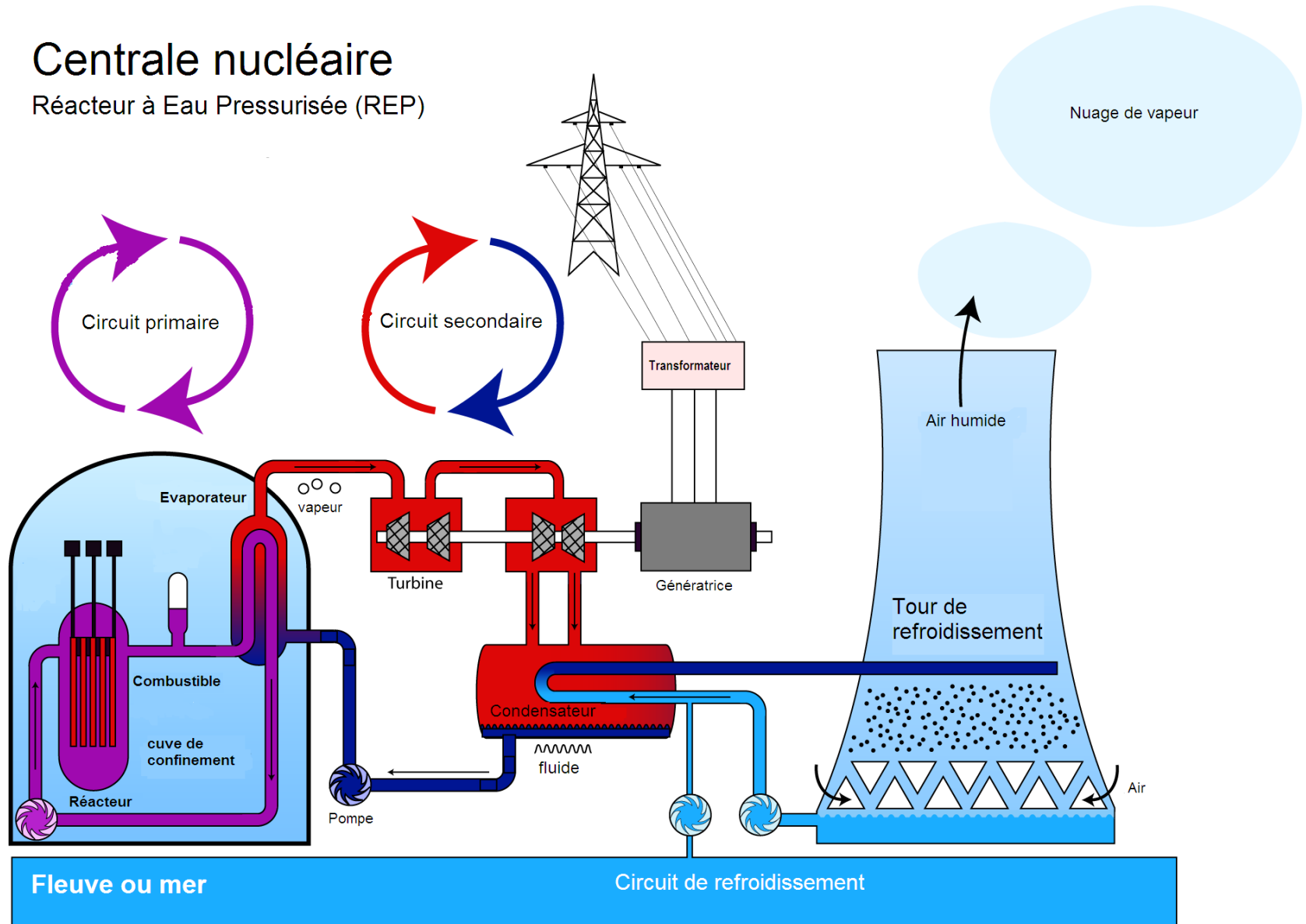


Source : Wikimedia Commons (Fastfission)

Centrales thermonucléaires à eau pressurisée

Centrale nucléaire

Réacteur à Eau Pressurisée (REP)



Source : Wikimedia Commons (Steffen Kuntoff, Enr-v)

Types des centrales thermonucléaires

- À **eau pressurisée** et à **eau bouillante**
 - ◆ 80 % du parc mondial, 100 % du parc français
 - ◆ Eau ordinaire (légère – H₂O) et **uranium enrichi** en ²³⁵U (dont le noyau est composé de 92 protons et 143 neutrons)
 - ▶ 99 % de l'uranium naturel, c'est ²³⁸U, incapable de soutenir la fission
 - ▶ Pourtant 0,72 %, c'est ²³⁵U, qu'il faut séparer (difficile mais possible)
- À **eau lourde** et combustible peu enrichi
 - ◆ Combustible **peu ou non enrichi** + modérateur eau lourde (D₂O)
- À **neutrons rapides** et combustible naturel
 - ◆ ²³⁸U (92p⁺ 146 n⁰) + n⁰ → ... → ²³⁹Pu (94p⁺ 145n⁰) qui est ensuite fissionné
 - ▶ **Surgénération** : plus d'isotopes fissiles produits que consommés
 - ◆ Possible si les **neutrons ne sont pas ralentis**
 - ▶ Pas de modérateur, donc **dimensions** du réacteur réduites
 - ◆ On peut **recupérer** les neutrons qui autrement s'enfuiraient du réacteur
 - ◆ ²³⁸U peut être issu du **retraitement** de combustibles usés
 - ▶ **Utilisation du minerai** naturel 70 fois plus haute

Caractéristiques

- Puissance type d'une centrale : 1000 MW
- Production : monde 11 %, France 72 %, Hongrie 54 %, États-Unis 20 %
- Très grande **densité d'énergie** (1 g d'uranium \equiv 3 t de charbon)
- **Pas d'émission** du CO₂ et autres
- Réserves : relativement bien réparties géographiquement, d'un siècle au minimum (millénaires avec les réacteurs surgénérateurs)
- Nécessite des **investissements** lourds au départ mais très **rentable** au fil du temps
- Technologie : **très avancée**
- Sécurité : **très exigeante**
- Déchets : **faible volume** mais **dangereux**
- Prolifération : **risquée** (armes)



Source : Wikimedia Commons (Stefan Kühn)



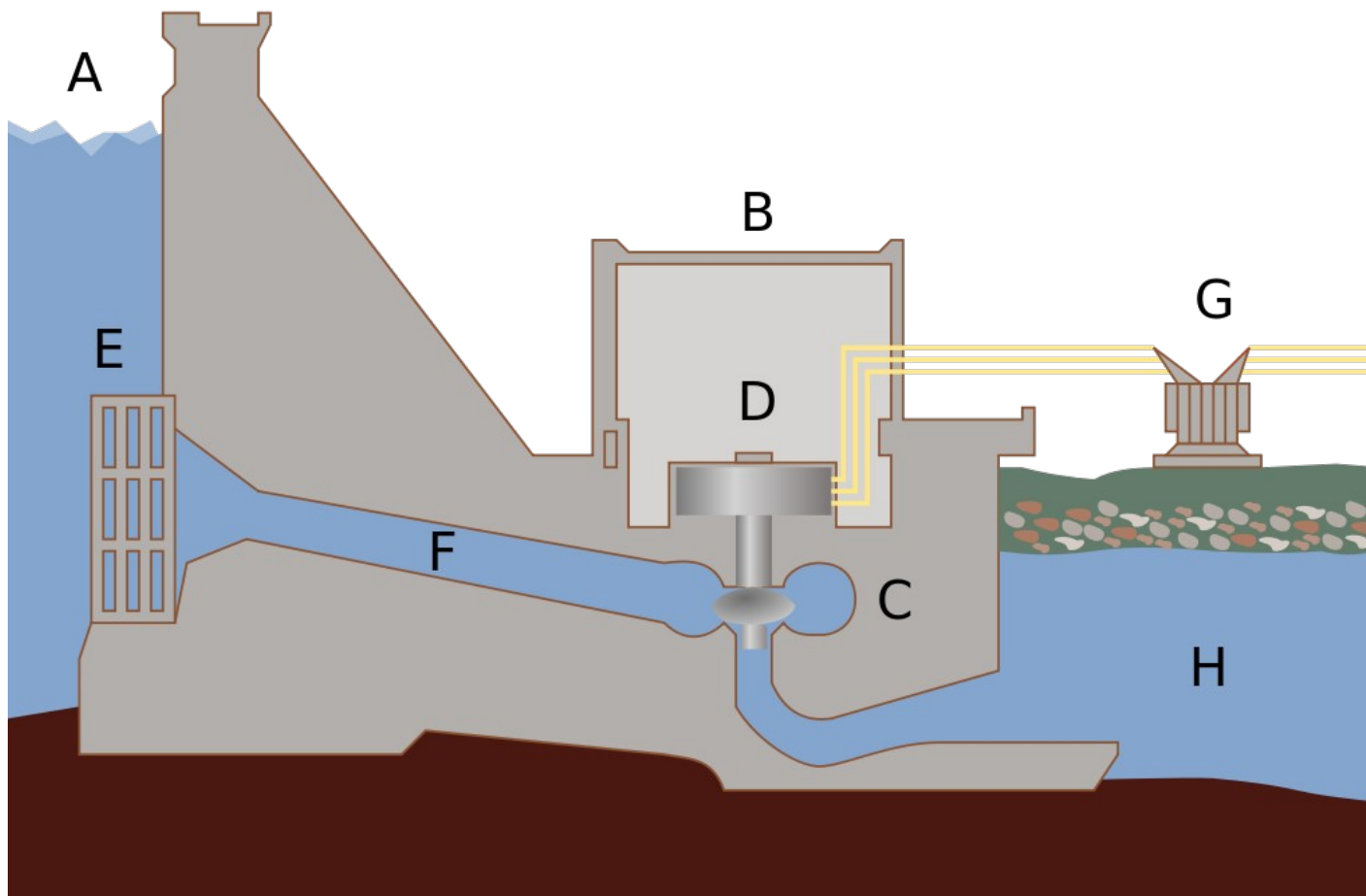
Centrales hydroélectriques

- Exploitent l'**énergie des flux d'eau**
 - ◆ L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur
- Centrales **gravitaires**
 - ◆ Mettent à profit l'écoulement de l'eau et un dénivelé
 - ◆ **Au fil de l'eau** (basse chute) : petits ouvrages de dérivation et barrage, puissances faibles
 - ◆ **D'éclusée** (moyenne chute) : grands fleuves à forte pente avec un barrage (dizaines de mètres) ; digues parallèles permettent de ne pas perturber la vallée
 - ◆ **Centrales-lacs** : barrage à haute chute avec réservoirs de haute capacité
- Stations de **transfert d'énergie par pompage** (STEP)
 - ◆ **Stockage pour les périodes creuses** et non pas production nette
 - ◆ Rendement : 70 % à 80 %
- Centrales **utilisant l'énergie de la mer**
 - ◆ **Marémotrices** (marées) ; **hydroliennes** (courants) ; **houliomotrices** (vagues)



Source : Wikimedia Commons
(Mikano)

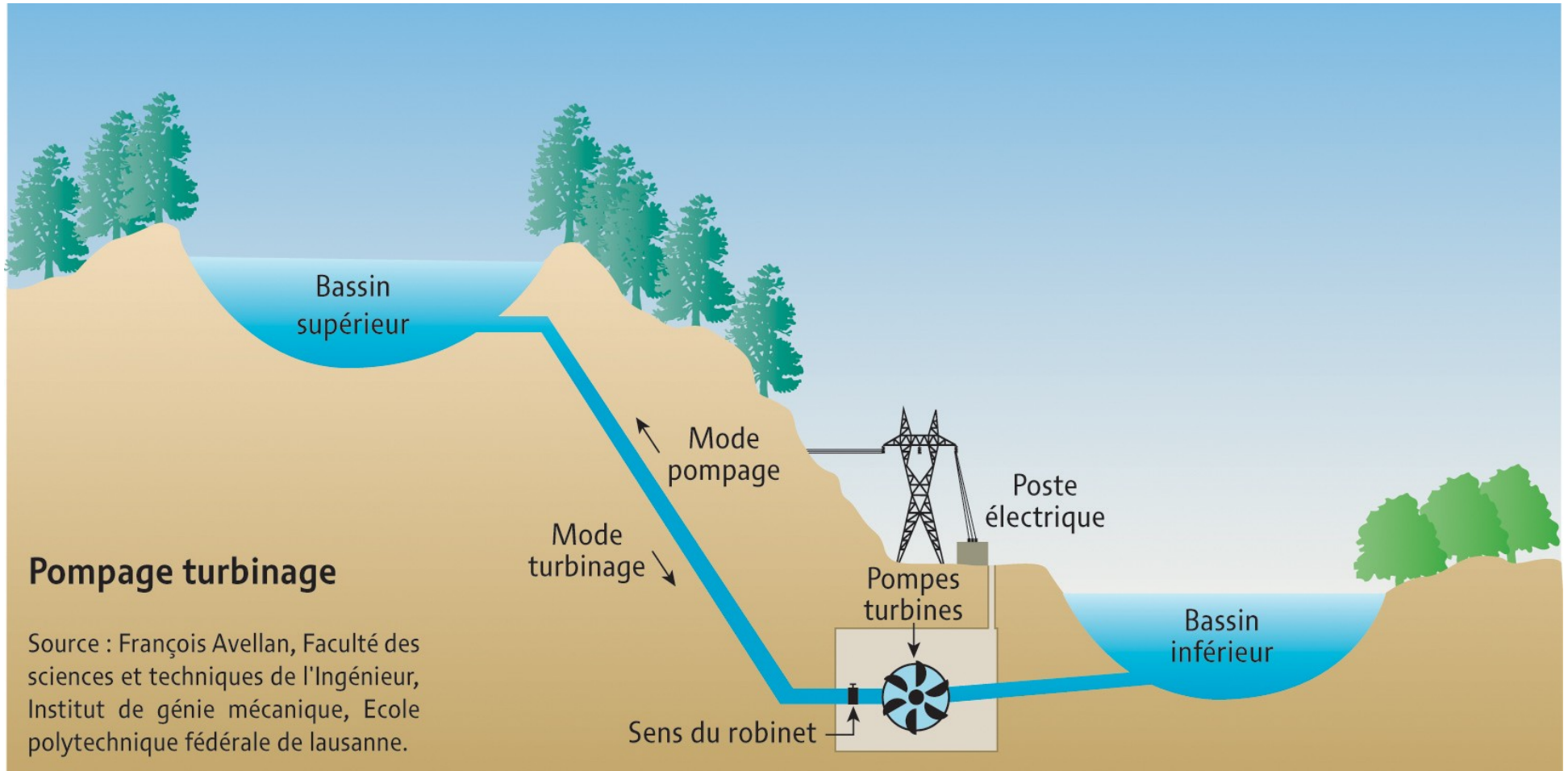
Centrale hydroélectrique gravitaire



- A : réservoir
- B : centrale électrique
- C : turbine
- D : générateur
- E : vanne
- F : conduite forcée
- G : transformateur
- H : rivière



Station de transfert d'énergie par pompage (centrale de pompage-turbinage)



Caractéristiques

- Production : monde 16 %, France 12 %, Pologne 2 %
- Puissances de centrales très variées : d'1 kW jusqu'à > 10 000 MW
- Rentabilité dépend des conditions **géographiques, hydrologiques et climatiques**
 - ♦ Peut varier de 30 % selon l'an et la saison (précipitations)
- Investissements augmentent avec la hauteur de chute et la largeur de la vallée
 - ♦ Dépenses annexes liées aux contraintes sociales (coût des terrains expropriés, déplacement des habitants)
- Impacte négative sur l'**environnement**
- Ressource **gratuite**, frais d'entretien bas
- Permet de répondre aux besoins d'**ajustement de la production** électrique à la demande momentanée par stockage de l'eau
- Objet d'investissements importants, en particulier en Asie et en Amérique latine

Centrales éoliennes

- Exploitent l'**énergie cinétique du vent**
- Terrestres ou en pleine mer
- Une centrale est composée d'une ou plusieurs turbines éoliennes en fonction de la puissance totale désirée
- Le **volume** de l'énergie électrique produite dépend de :
 - ◆ la forme et la hauteur des pales
 - ◆ la vitesse du vent (il en existe toujours un minimum ainsi qu'un maximum)
 - ◆ la température (impacte sur la densité de l'air ; +3 % de l'énergie pour -10 °C)
- La turbine est couplée à un alternateur
 - ◆ relié au réseau électrique
 - ◆ ou au sein d'un système autonome
- La vitesse du vent varie dans le temps
 - ◆ **Production variable** d'une façon peu prédictible
 - ◆ Un système autonome nécessitera un parc de batteries pour **stocker l'énergie**



Source : Wikimedia Commons (Wagner Christian)

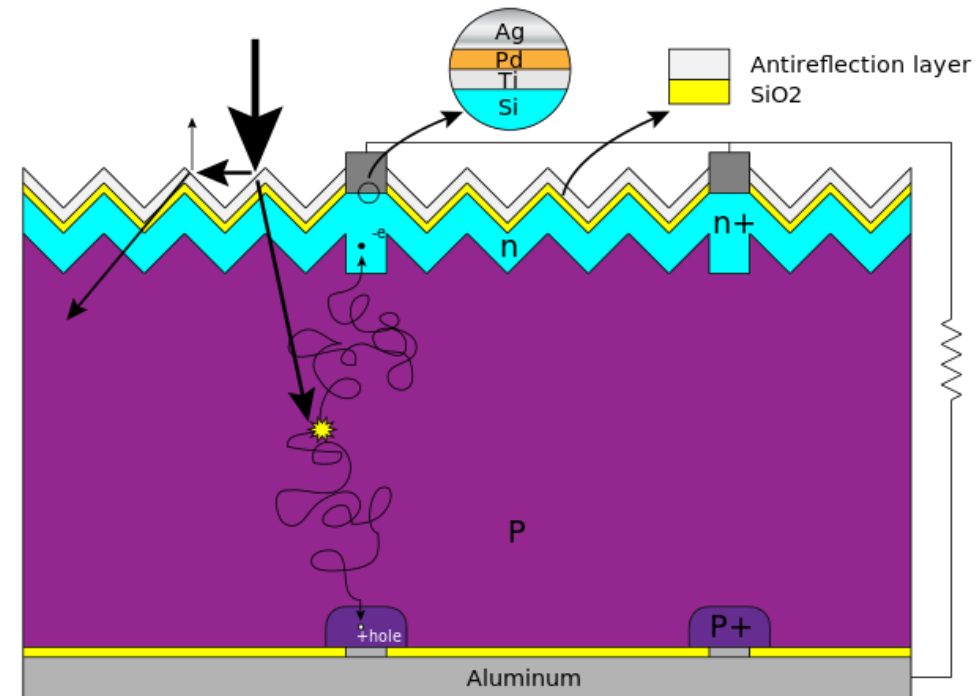
Caractéristiques

- Puissance unitaire à partir de < 1 kW jusqu'à > 1 MW
- 3% de la production mondiale
 - ♦ Les plus grands parcs éoliens : Chine, États-Unis, Allemagne
- Ressource **gratuite**, consommation du terrain faible
- Nuisances **visuelles et sonores** (basse fréquence)
- Rentabilité dépend des conditions **topographiques, climatiques et météorologiques**
 - ♦ La variabilité de la vitesse et de la direction du vent est importante aussi sur des périodes du temps courtes
 - ♦ On ne peut pas le compenser d'aucune manière (comme avec des barrages)
 - ♦ Système d'orientation face au vent nécessaire dans la plupart des cas
- Installations en **plein mer**
 - ♦ Vent plus fort et plus constant
 - ♦ Impacte moins importante sur le paysage et sur l'humain
- Bien adaptées aux **installations domestiques**



Centrales photovoltaïques

- L'électricité est produite par **transformation directe** d'une partie du rayonnement solaire dans une **cellule photovoltaïque**
- Un photon peut **arracher un électron** à un atome d'un semi-conducteur
 - ♦ Un **pair électron-trou** est créé
 - ♦ Un courant peut être conduit
- L'énergie des photons et la bande interdite du matériau doivent être **appariées**
 - ♦ Énergie trop basse : arrachement impossible
 - ♦ Énergie trop haute : perte d'énergie
 - ♦ Toute énergie non transformée en électricité devient transformée en chaleur
- L'**ensoleillement varie** dans le temps (à long et court terme)
 - ♦ Conséquences similaires aux centrales éoliennes



Source : Wikimedia Commons (Cyferz at English Wikipedia)

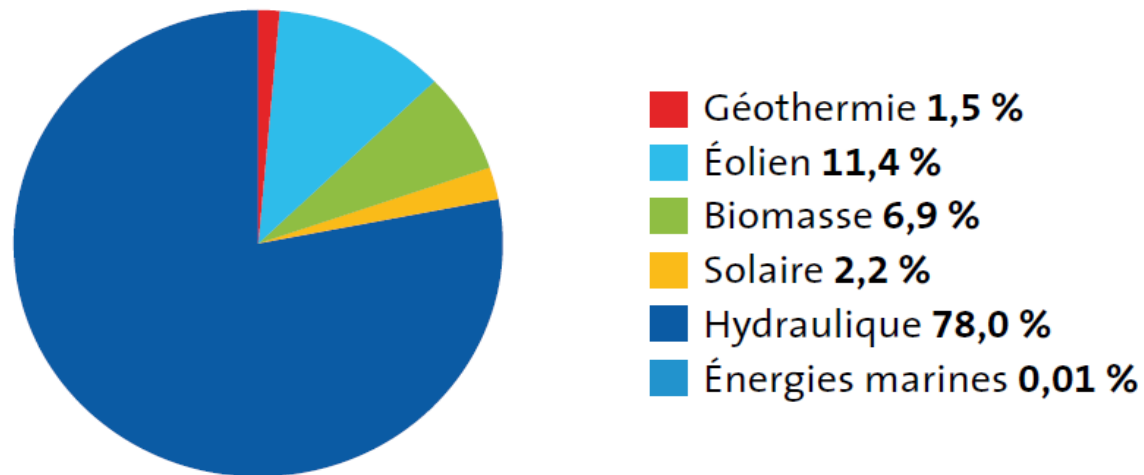
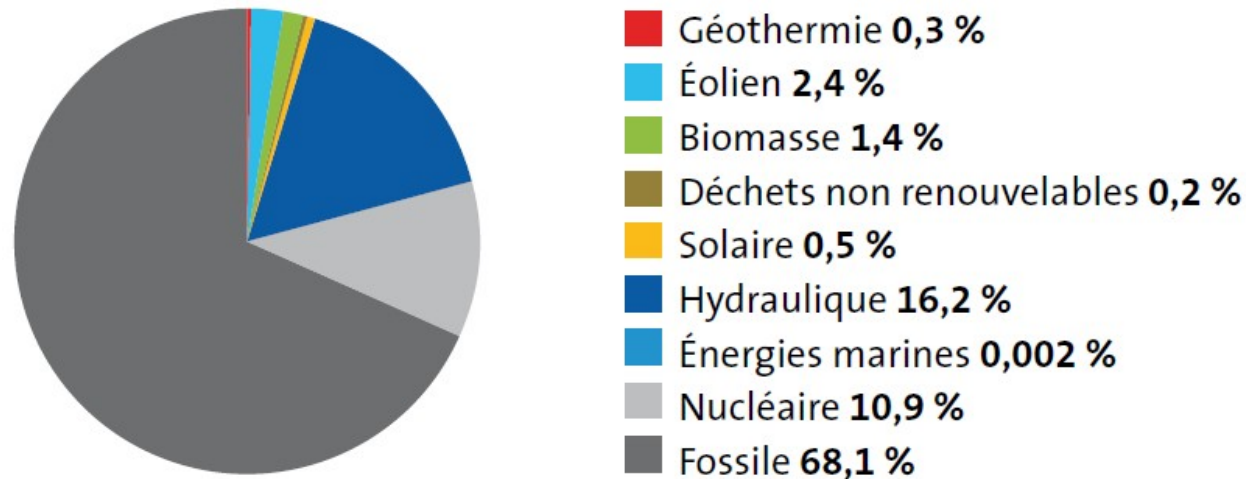
Caractéristiques

- L'énergie solaire est (à l'échelle humaine) inépuisable et **disponible** en très grandes quantités
- Silicium est **abondant** et n'est pas toxique
 - ♦ La production des modules photovoltaïques entraîne l'usage d'**agents toxiques** et consomme beaucoup d'**énergie**
- Rendement pratique d'une cellule : 12 % à 17 % (théorique : 85%)
- **Pollution nulle** en phase d'exploitation
- **Modularité** : toute puissance désirée (de < 1 W jusqu'à 1000 MW)
 - ♦ Superficie occupée proportionnelle à la puissance
- Adaptées aux **installations domestiques**
 - ♦ De minimales installations nécessaires
- Rentabilité dépend des **conditions géographiques** (latitude) et **climatiques** (assombrissement, température)



Source : Wikimedia Commons (Diego Delso)

Structure de la production de l'énergie électrique dans le monde

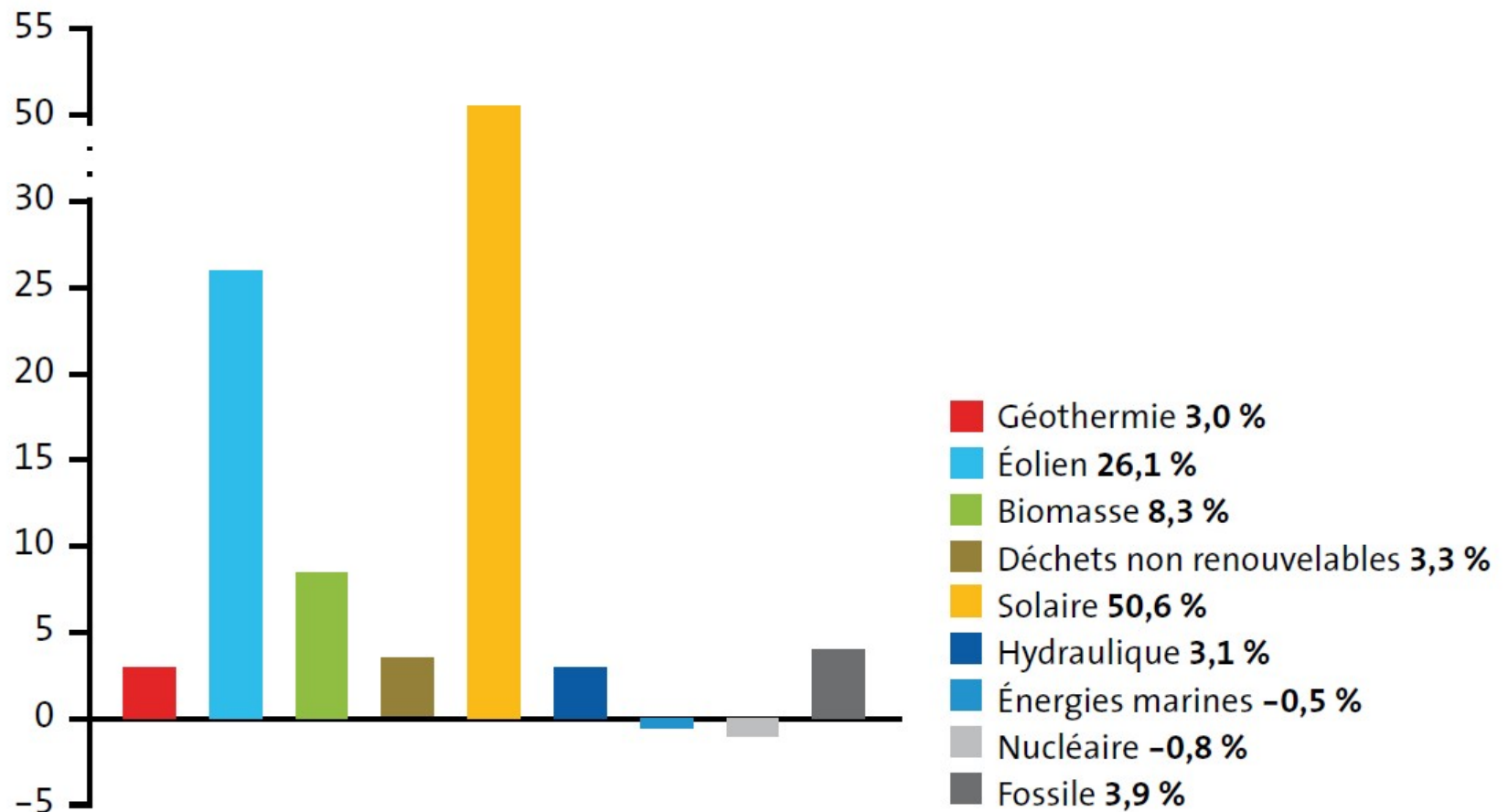


Source : Observ'ER. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde



Croissance de la production de l'énergie électrique dans le monde

Taux de croissance annuel moyen 2002-2012



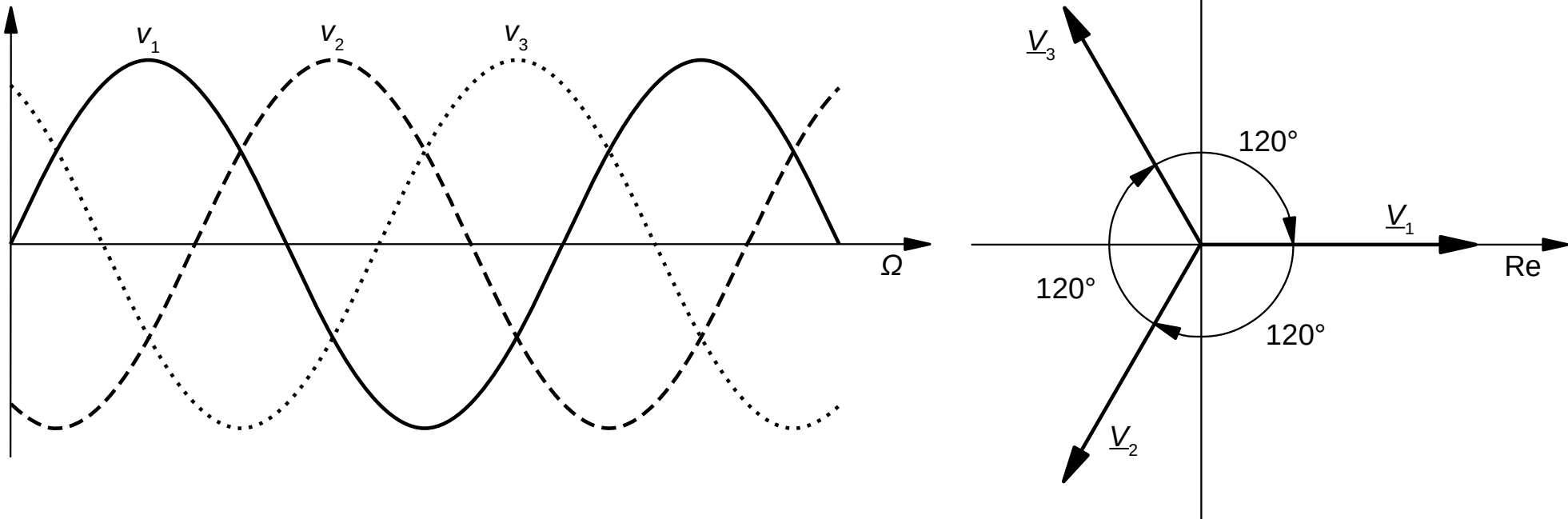
Source : Observ'ER. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde



Systemes sinusoidaux triphasés

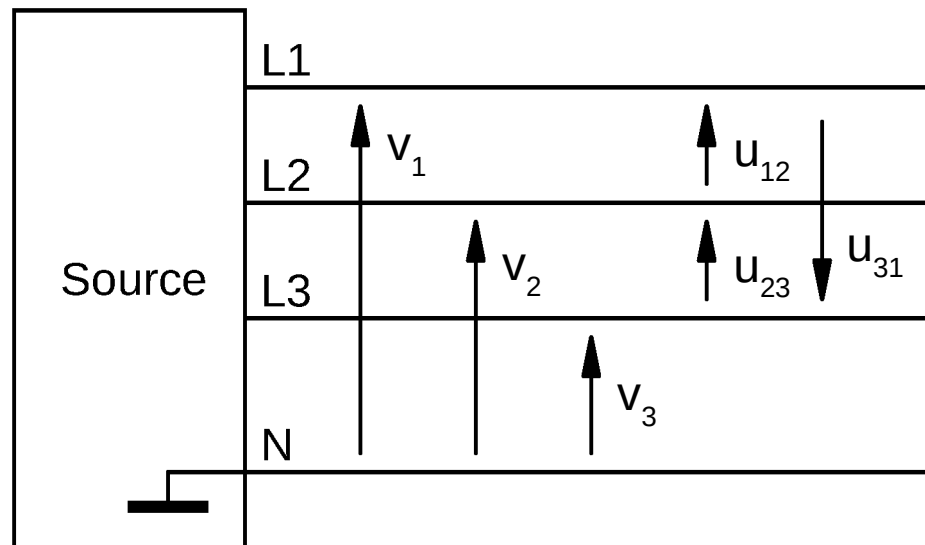
- Un **systeme triphasé** est formé par trois grandeurs électriques (tensions ou courants) sinusoidales
- Dans un systeme parfait, les **amplitudes** des trois grandeurs sont **identiques** mais elles sont **déphasées** entre eux de $360^\circ/3 = 120^\circ = 2\pi/3$

$$\begin{aligned}v_1 &= V \sqrt{2} \sin(\omega t) \\v_2 &= V \sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \\v_3 &= V \sqrt{2} \sin(\omega t - 240^\circ)\end{aligned}$$



Tensions dans un système triphasé

- Les tensions v_1 , v_2 et v_3 sont définies **par rapport à la masse** et appelées **tensions simples** ou « tensions entre phase et neutre »
 - ♦ Les trois tensions sont appelées **phases** et les conducteurs associés sont désignées L1, L2 et L3
 - ♦ La masse peut être imaginée ou présente physiquement sous la forme d'un quatrième conducteur appelé **neutre** et désigné N ($v_N = 0$)
- Les **tensions composées** sont celles présentes **entre deux phases** (aussi appelées « tensions entre phases »)

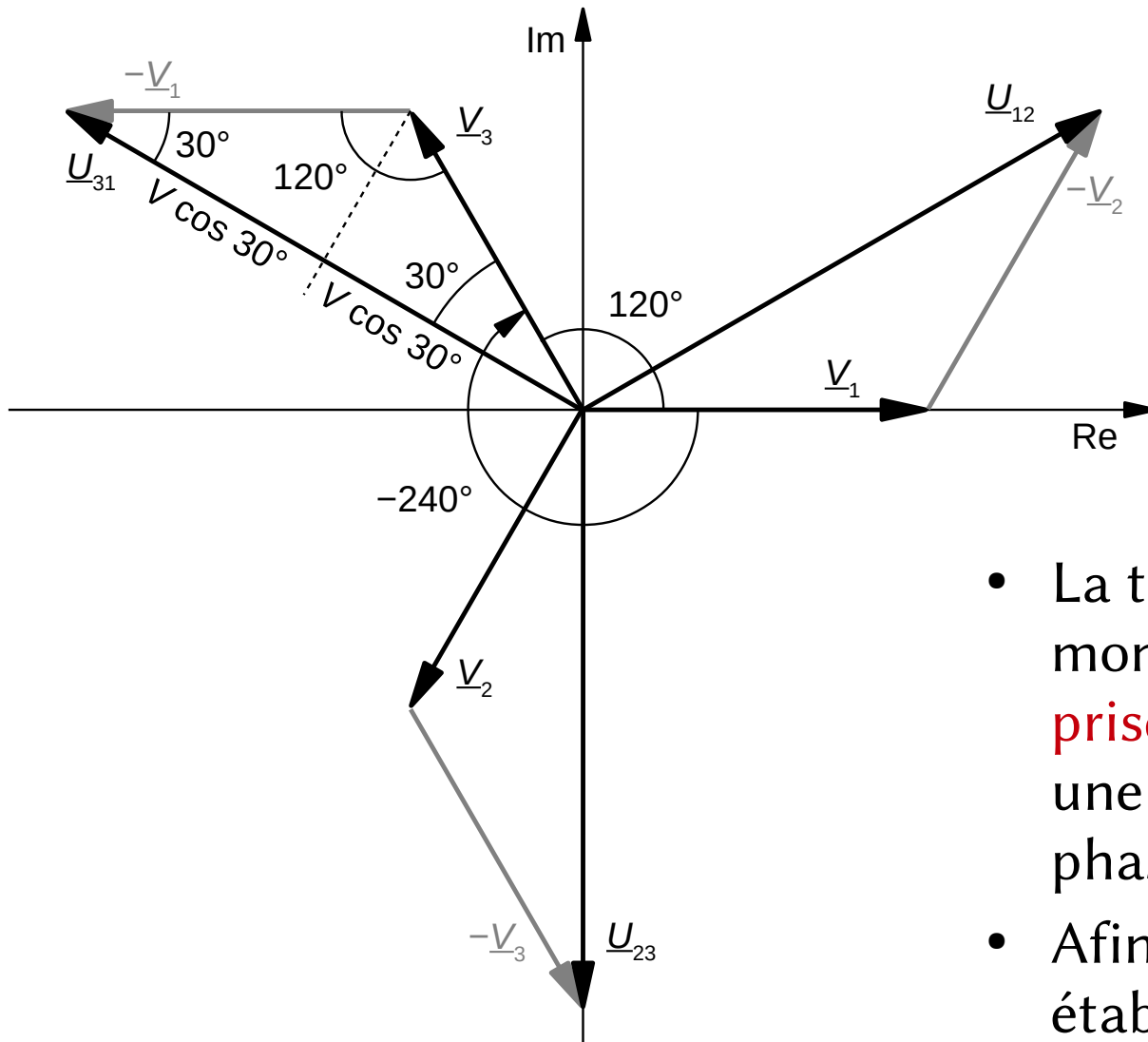


$$u_{12} = v_1 - v_2$$

$$u_{23} = v_2 - v_3$$

$$u_{31} = v_3 - v_1$$

Valeur efficace des tensions composées

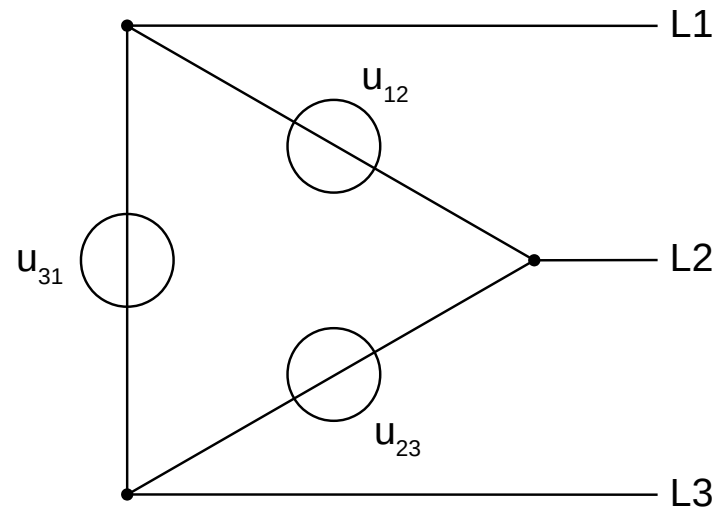
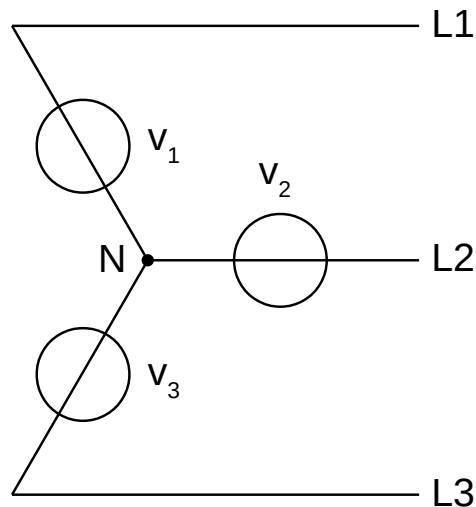


$$\begin{aligned} U &= |U_{31}| = 2 \cdot V \cos 30^\circ = \\ &= 2 \cdot V \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} V \\ U &= U_{12} = U_{23} = U_{31} \end{aligned}$$

- La tension d'alimentation monophasée présente dans une **prise de courant** représente une des **tensions simples** (entre phase et neutre)
- Afin d'achever $V = 230 \text{ V}$, on a établi la valeur standardisée $U = 400 \text{ V} \approx 230 \text{ V} \cdot \sqrt{3}$

Schémas de couplage triphasés

- Une **source de tension** (ou de courant) **triphasee** est composée de **trois sources couplées** selon un des deux schémas :
 - ♦ **étoile** (Y) : les sources correspondent aux tensions simples
 - ♦ **triangle** (Δ) : les sources correspondent aux tensions composées



- Pas de neutre dans le couplage en triangle
- Il est possible de transformer un schéma dans l'autre
- Un **récepteur triphasé** est composé de **trois dipôles couplés**
 - ♦ Les deux schémas de couplage s'y appliquent (indépendamment de la source)

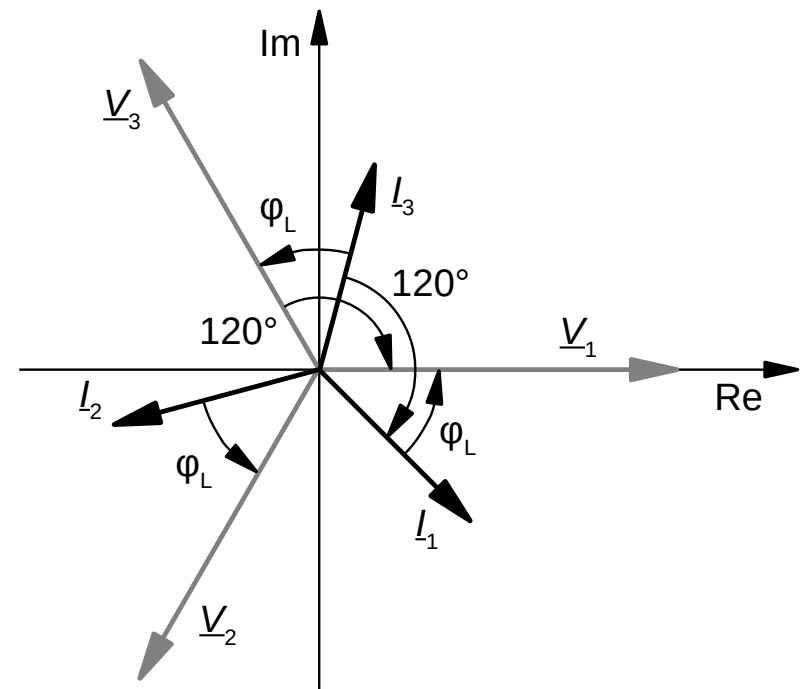
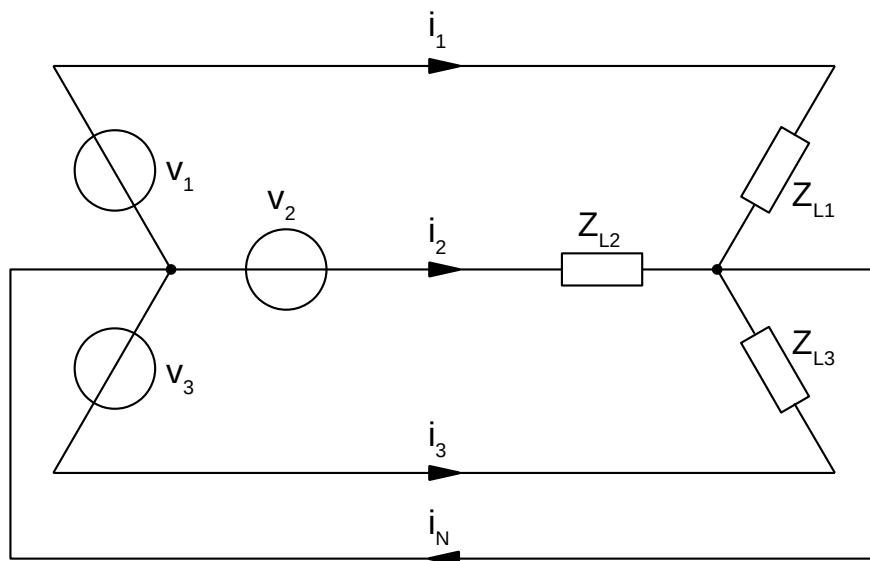
Systeme triphasé équilibré

- Dans un **systeme équilibré**, les valeurs efficaces des trois tensions de source et les trois **impédances de charge sont identiques**
- Alors les **courants** :
 - ♦ possèdent la même valeur efficace
 - ♦ sont déphasés de φ_L par rapport aux tensions correspondantes
 - ♦ forment un systeme triphasé
- Le **courant neutre est nul**

$$\underline{I}_1 = \frac{V_1}{\underline{Z}_{L1}} \quad \underline{I}_2 = \frac{V_2}{\underline{Z}_{L2}} \quad \underline{I}_3 = \frac{V_3}{\underline{Z}_{L3}}$$

$$\underline{Z}_{L1} = \underline{Z}_{L2} = \underline{Z}_{L3} = \underline{Z}_L e^{j\varphi_L}$$

$$\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$$



Puissance dans un système équilibré

- Puissances dissipées dans les trois impédances de charge

$$v_1 = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad v_2 = V\sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ) \quad v_3 = V\sqrt{2} \sin(\omega t - 240^\circ)$$

$$i_1 = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_L) \quad i_2 = I\sqrt{2} \sin(\omega t - 120^\circ + \varphi_L) \quad i_3 = I\sqrt{2} \sin(\omega t - 240^\circ + \varphi_L)$$

$$p_1 = u_1 \cdot i_1 = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \cdot V\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_L) = \\ = V I \cdot 2 \sin(\omega t + \varphi_L) \sin(\omega t) = V I [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L)]$$

$$\text{car } 2 \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$$

$$p_2 = V I [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L - 120^\circ)] \quad p_3 = V I [\cos \varphi_L - \cos(2\omega t + \varphi_L - 240^\circ)]$$

- Puissance totale

$$p = p_1 + p_2 + p_3 =$$

$$= V I \cdot 3 \cos \varphi_L - V I [\cos(2\omega t + \varphi_L) + \cos(2\omega t + \varphi_L - 120^\circ) + \cos(2\omega t + \varphi_L - 240^\circ)]$$

- ♦ Le deuxième terme représente un système triphasé alors sa somme est nulle (comme démontré pour les courants)

$$p = 3 V I \cos \varphi_L = \text{const} \quad \text{donc} \quad P = p_{\text{av}} = p$$

- Dans un système triphasé équilibré, la **puissance totale** mise en jeu dans le récepteur est **constante dans le temps**

- ♦ Elle est alors identique à la puissance active

Transmission monophasée et triphasée – pertes dans la ligne

- Réseau monophasé

- ♦ P : puissance délivrée au récepteur

$$P_{\text{loss},1\varphi} = 2 \cdot R I^2 \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

$$P_{\text{loss},1\varphi} = \frac{2 R P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

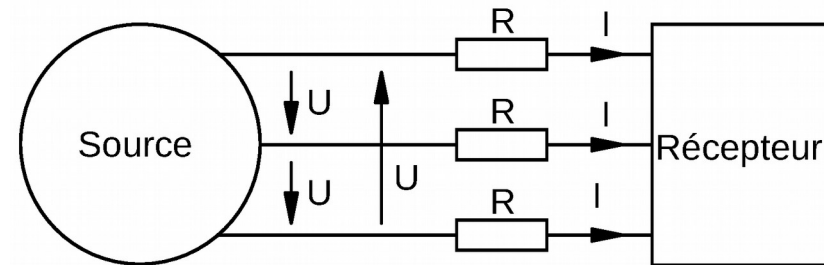
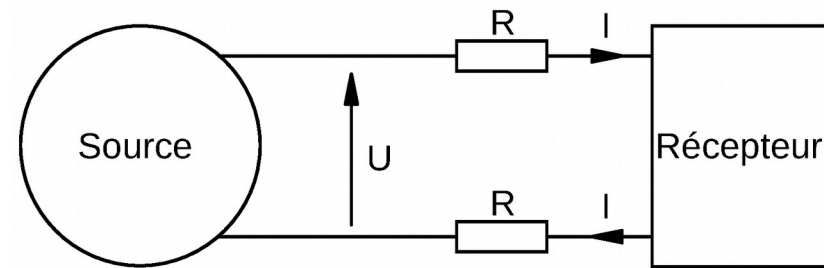
- Réseau triphasé

- ♦ Assumant que les résistances des lignes restent les mêmes et que U comme définie selon les schémas reste la même

$$P_{\text{loss},3\varphi} = 3 \cdot R I^2 \quad P = 3 V I \cos \varphi = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I \cos \varphi = \sqrt{3} U I \cos \varphi \Rightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

$$P_{\text{loss},3\varphi} = \frac{3 R P^2}{3 U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{R P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{P_{\text{loss},1\varphi}}{2}$$

- Les pertes sont **deux fois plus basses dans le système triphasé**



Transmission monophasée et triphasée – volume du matériau conducteur

- Autre approche : on veut garder les pertes au même niveau
- On peut alors **diminuer la section du conducteur** S dans le système triphasé
- En exprimant la résistance du conducteur comme $R = \rho \ell / S$

$$P_{\text{loss},1\varphi} = \frac{2 \rho \ell P^2}{S_{1\varphi} U^2 \cos^2 \varphi} \quad P_{\text{loss},3\varphi} = \frac{\rho \ell P^2}{S_{3\varphi} U^2 \cos^2 \varphi}$$
$$P_{\text{loss},1\varphi} = P_{\text{loss},3\varphi} \Rightarrow S_{3\varphi} = \frac{S_{1\varphi}}{2}$$

- Le volume du matériau

$$V_{1\varphi} = 2 S_{1\varphi} \ell \quad V_{3\varphi} = 3 S_{3\varphi} \ell = 3 \frac{S_{1\varphi}}{2} \ell = \frac{3}{4} V_{1\varphi}$$

- Pour transmettre la même puissance avec les mêmes pertes dans la ligne, un système triphasé utilise **75 % du matériau** nécessaire dans un système monophasé

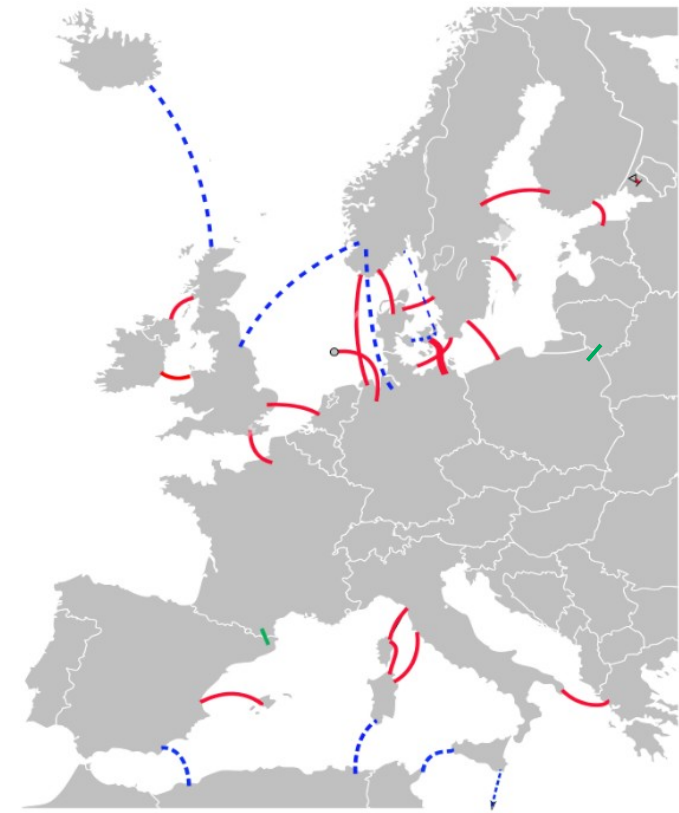
Tension de transmission

- Pertes dans la ligne
 - ♦ Pertes $\propto I^2 \Rightarrow$ mieux vaut un **courant moins élevé**
 - ♦ Puissance transmise $\propto U \cdot I \Rightarrow$ mieux vaut une **tension plus haute**
- Mais le **danger** pour le consommateur ne peut pas être trop élevé
- Il est possible de générer une tension continue ainsi qu'alternative
 - ♦ Générateur **alternatif (alternateur) plus simple** et **moins cher**
- Il est nécessaire d'**élever la tension** à la centrale et ensuite la baisser chez le consommateur
 - ♦ C'était impossible avec tension continue avant l'électronique de puissance
 - ♦ Aujourd'hui on dispose des convertisseurs électroniques mais ils sont coûteux (à cause des dispositifs à semi-conducteurs de puissance)
 - ♦ Pourtant il y a longtemps on a découvert le transformateur qui peut réaliser cette tâche pour une tension alternative et qui n'est ni coûteux, ni complexe
 - ♦ Dans les deux cas, il faut minimiser les pertes de conversion
- Par conséquent, la plupart des lignes de transmission sont **à haute tension alternative**



Transmission à tension continue

- Entre les fils d'un câble existent des **capacitances parasites**
 - ◆ Des **courants alternatifs circulent** à travers ces capacités et donc une partie de la puissance générée n'arrive pas à la destination
 - ◆ Par contre, **aucun courant continu** ne traverse une capacité – avantage
- **Distance** limite (inférieure) de **rentabilité**
 - ◆ Lignes terrestres : 500 km
 - ▶ États-Unis, Chine, Inde, Brésil
 - ◆ Câbles souterrains (surtout sous-marins) : 50 km
 - ▶ Pologne – Suède (Słupsk – Karlshamn)
 - ▶ France – Espagne (Baixas – Santa Llogaia)
- Liens entre des **systèmes non synchrones**
 - ◆ Différence de fréquence
 - ◆ Déphasage
 - ▶ Pologne – Lituanie (Ełk – Alytus)
- **Découplage**
 - ◆ contre instabilité et perturbations



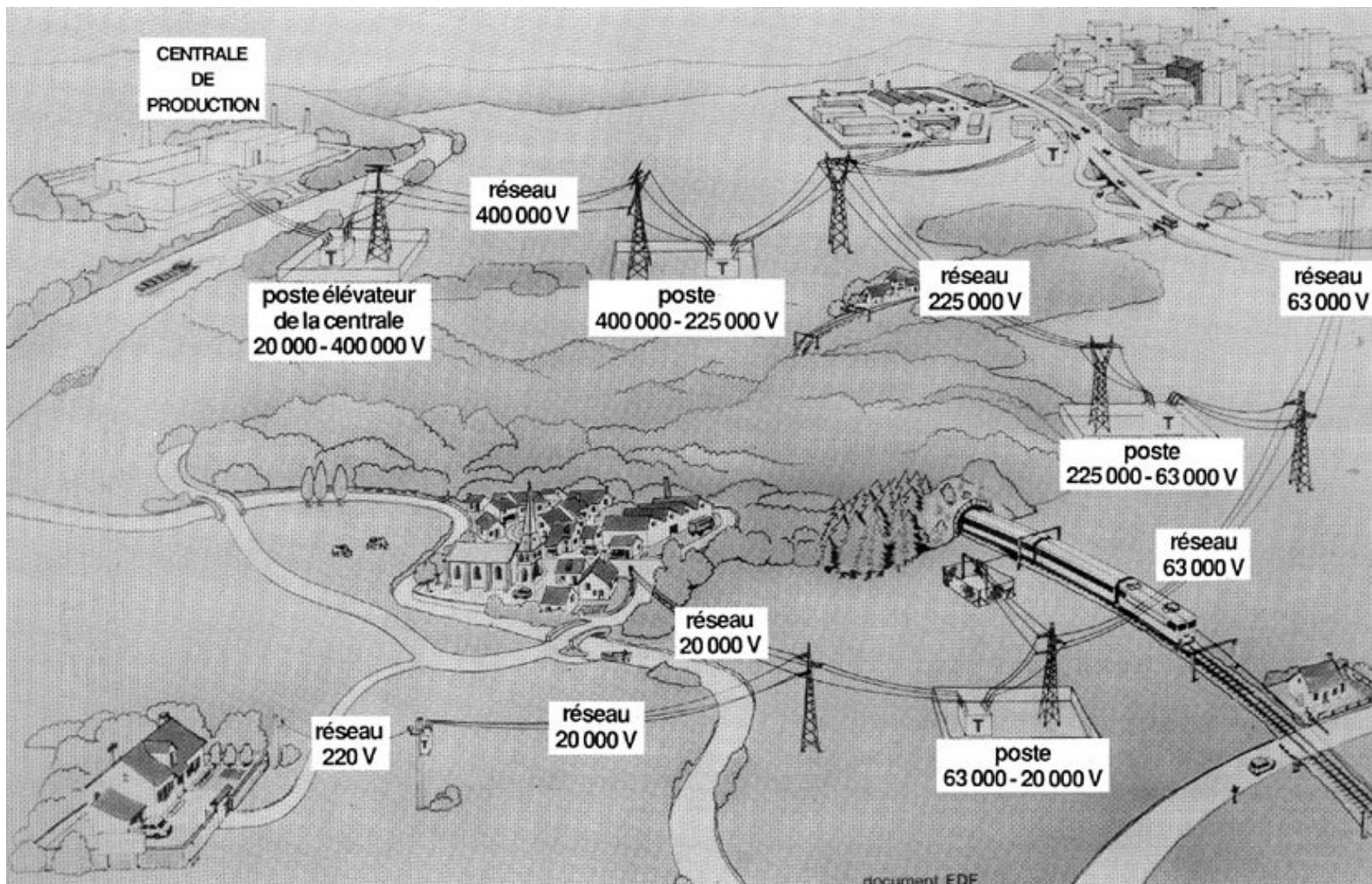
Source : Wikimedia Commons (J JMesserly, Maix, Tintazul)

Domaines de tension

- Définitions normatives CENELEC (Europe)
 - ♦ $U \leq 1 \text{ kV}$ **basse tension (BT)**
 - ♦ $1 \text{ kV} < U \leq 35 \text{ kV}$ **haute tension A (HTA)**
[anciennement : moyenne tension (MT)]
 - ♦ $U > 35 \text{ kV}$ **haute tension B (HTB)**
[anciennement : haute tension (HT)]
- Basse tension **monophasée standardisée**
 - ♦ **230 V** (220 V à 240 V) en Europe, Asie, Afrique (plupart) et partiellement Amérique du Sud
 - ♦ **120 V** (aussi 110 V, 127 V) en Amérique du Nord et partiellement latine
 - ♦ 100 V au Japon
- **Fréquence** dans les réseaux à tension alternative
 - ♦ **50 Hz** en Europe
 - ♦ **60 Hz** aux États-Unis
 - ♦ Trop élevée : **danger pour l'humain** (impédance du corps diminue)
 - ♦ Trop basse : **composants passifs coûteux et lourds** (transformateurs, bobines, condensateurs)



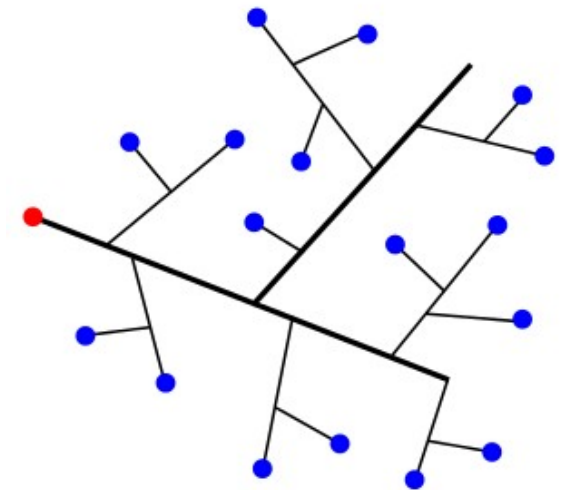
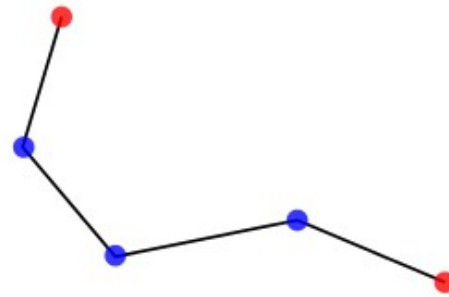
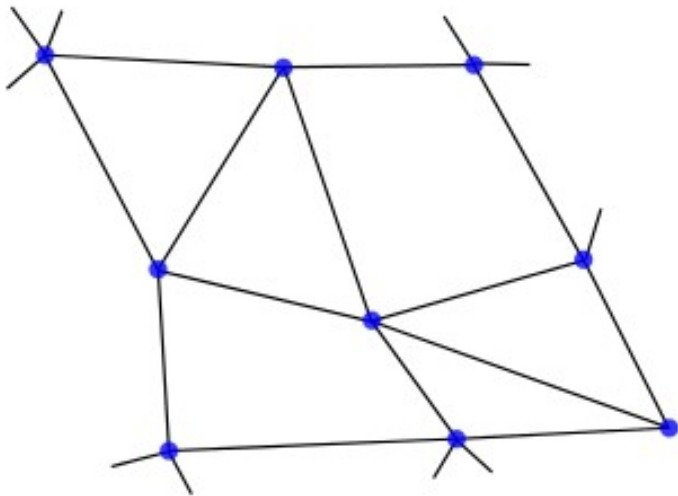
Réseau électrique type



Source : C. Puret – Cahier Technique Merlin Gerin n° 155

Structures des réseaux

- La structure est choisie de façon à **assurer l'alimentation** aux consommateurs même **dans le cas d'un défaut** d'un élément quelconque (centrale, transformateur, ligne de transmission...)
- **Maillée** : sûreté d'alimentation haute
- **Radiale (ou bouclée)** : sûreté d'alimentation élevée
 - ♦ Au moins une partie des consommateurs sont desservis
- **Arborescente** : sûreté d'alimentation faible
 - ♦ En cas d'un défaut, tous les consommateurs en aval sont coupés



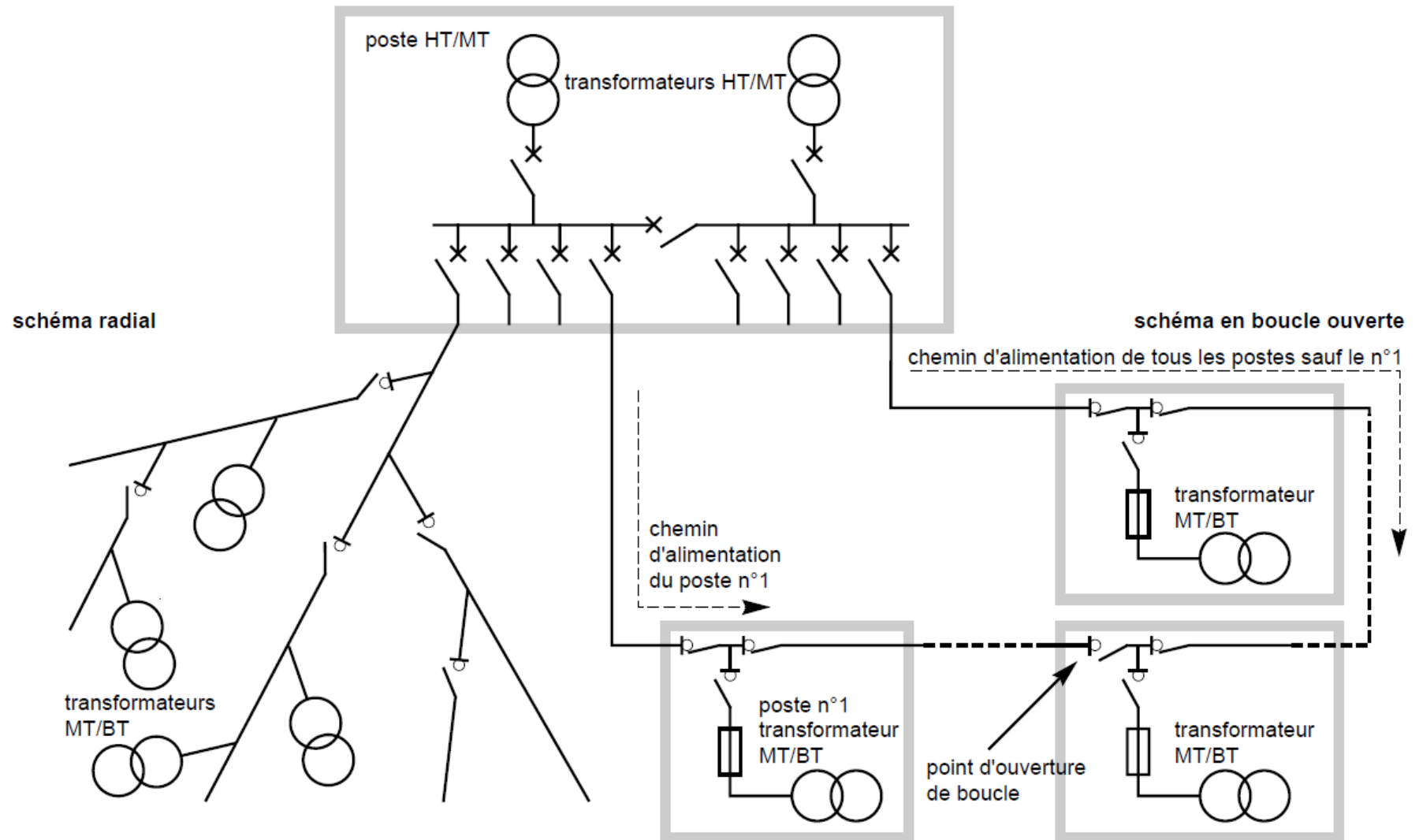
Source : Wikimedia Commons (Benoit Serrier)

Classification des réseaux électriques

- **Réseau de transport (HTB)**
 - ◆ But : transporter l'énergie à partir **des centres de production vers les régions consommatrices**
 - ◆ Structure : maillée, toujours bouclée pour la raison de sûreté
 - ◆ Beaucoup d'efforts sont déployés pour établir des interconnexions entre les différents pays de l'UE
- **Réseau de répartition (HTB ou HTA)**
 - ◆ But : assurer la fourniture de l'électricité **à l'échelle régionale**
 - ◆ Énergie est injectée par le réseau de transport mais aussi par des centrales électriques régionales de moyenne puissance
 - ◆ Structure : maillée et bouclée mais normalement exploitée débouclée (jusqu'à ce qu'un défaut se produise), ou bien arborescente
 - ▶ Critère du coût et de la densité superficielle de charge (kVA/km²)
- **Réseau de distribution (HTA ou BT)**
 - ◆ But : alimenter l'ensemble des **consommateurs**
 - ◆ Structure : arborescente, parfois avec une boucle (consommateurs critiques)
 - ▶ Coût bas et bas nombre de consommateurs affectés par un défaut

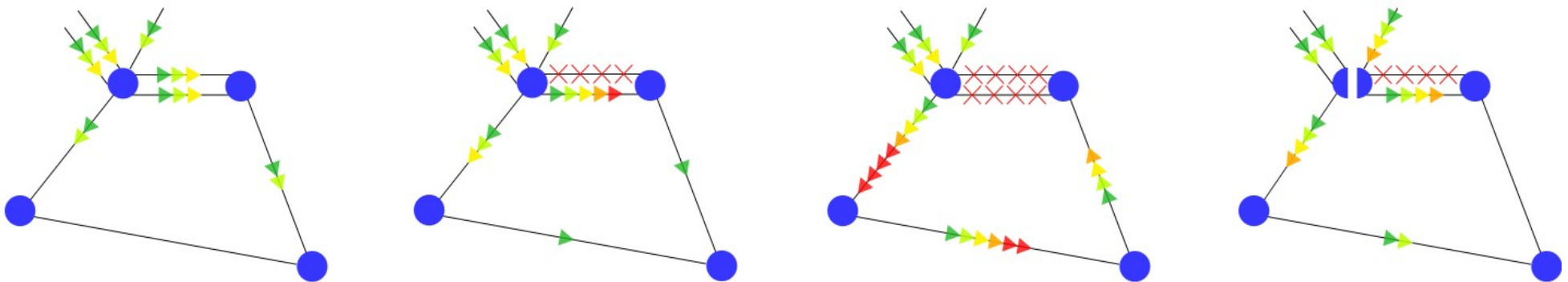


Réseau de répartition rural et urbanisé



Report de charge

- La charge des lignes dépend de leurs impédances ainsi que des puissances consommées
- En cas d'incident, la charge des lignes particulières change
- Si une ligne devient **surchargée**, cela entraîne le **déclanchement** d'un dispositif de protection
 - ♦ La situation peut **s'aggraver au lieu d'améliorer**
 - ♦ Tout une partie du réseau peut finir en être coupée d'alimentation
- Gestion nécessite des moyens de **mesure** et des méthodes de **calcul** avancés (y compris modélisation et simulation sur l'ordinateur)



Source : Wikimedia Commons (Benoit Serrier)