

Description du fonctionnement du réseau électrique

Smart Grids & Smart Cities

A. Skrzypczak

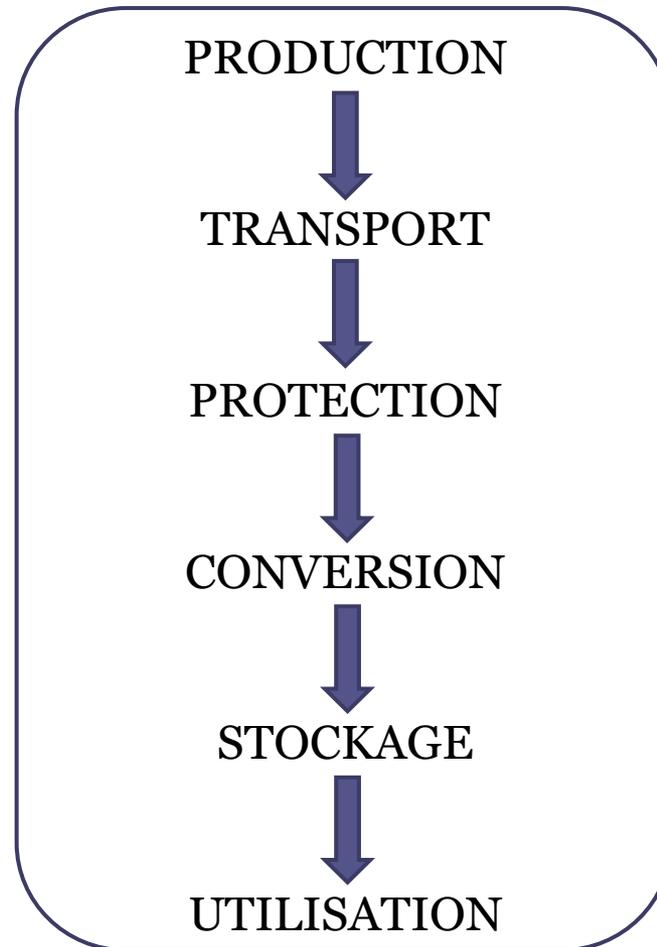
Bat. F – Bureau 311

skrzypczak@ensicaen.fr



Le réseau électrique

- Un réseau électrique classique est une succession de plusieurs étapes:



Grandeurs électriques

Unités de mesure

Prefixes

| <i>Name</i> | <i>Prefix</i> | <i>Factor</i> |
|-------------|---------------|---------------|
| tera | T | 10^{12} |
| giga | G | 10^9 |
| mega | M | 10^6 |
| kilo | k | 10^3 |
| milli | m | 10^{-3} |
| micro | μ | 10^{-6} |
| nano | n | 10^{-9} |
| pico | p | 10^{-12} |

Unités de mesure

- Tension électrique: U
 - Différence de potentiel
 - Mesurée en **Volt** (V)
- Intensité électrique
 - Mesurée en **Ampère** (A)

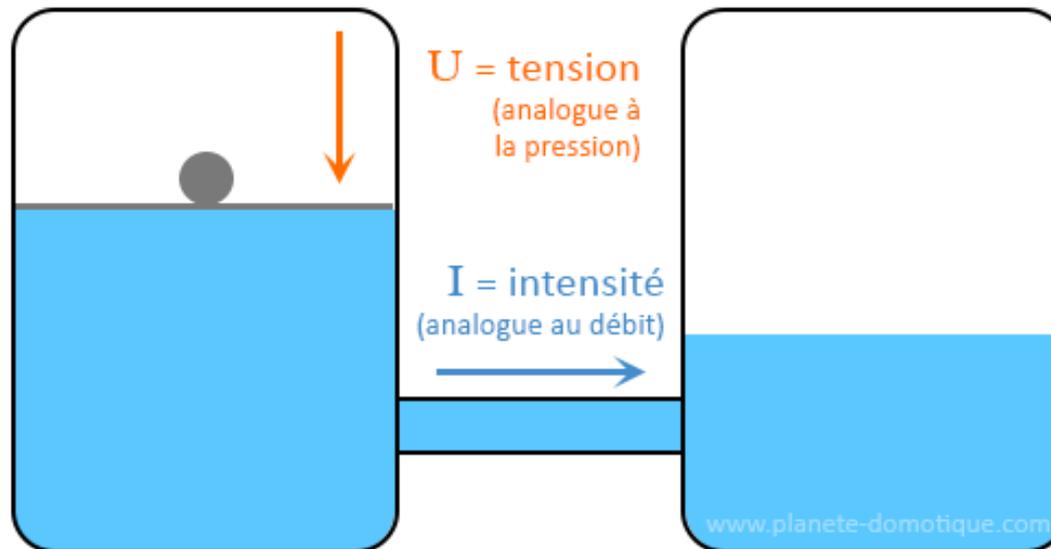
Unités de mesure

- Energie électrique: E
 - Mesurée en **Joules** (J)
 - Energie disponible sous forme d'un courant d'électrons
- Puissance électrique: P
 - Mesurée en **Watt** (W)
 - C'est une énergie par unité de temps
- **1 kWh = 3,6 MJ = $3,6 \times 10^6$ J** → c'est une unité d'énergie
- **1Tep = $4,187 \times 10^{10}$ J = 11630 kWh**

Unités de mesure

- **1 Joule**
 - *Energie nécessaire pour soulever d'un mètre une pomme*
 - *Energie nécessaire pour élever 1g d'air sec de 1°C*
- **4,18 J = 1 cal**
 - *Energie nécessaire pour élever un gramme d'eau de 1°C*
- **1000 J = 1 kJ**
 - *0,25 gramme de TNT*
- **1 MJ = 1 000 000 J**
 - *100 g de pain*
- **1 GJ = 1 000 000 000 J**
 - *Energie d'un éclair*
- **1 TJ = 10¹² J**
 - *1000 tonnes de TNT*

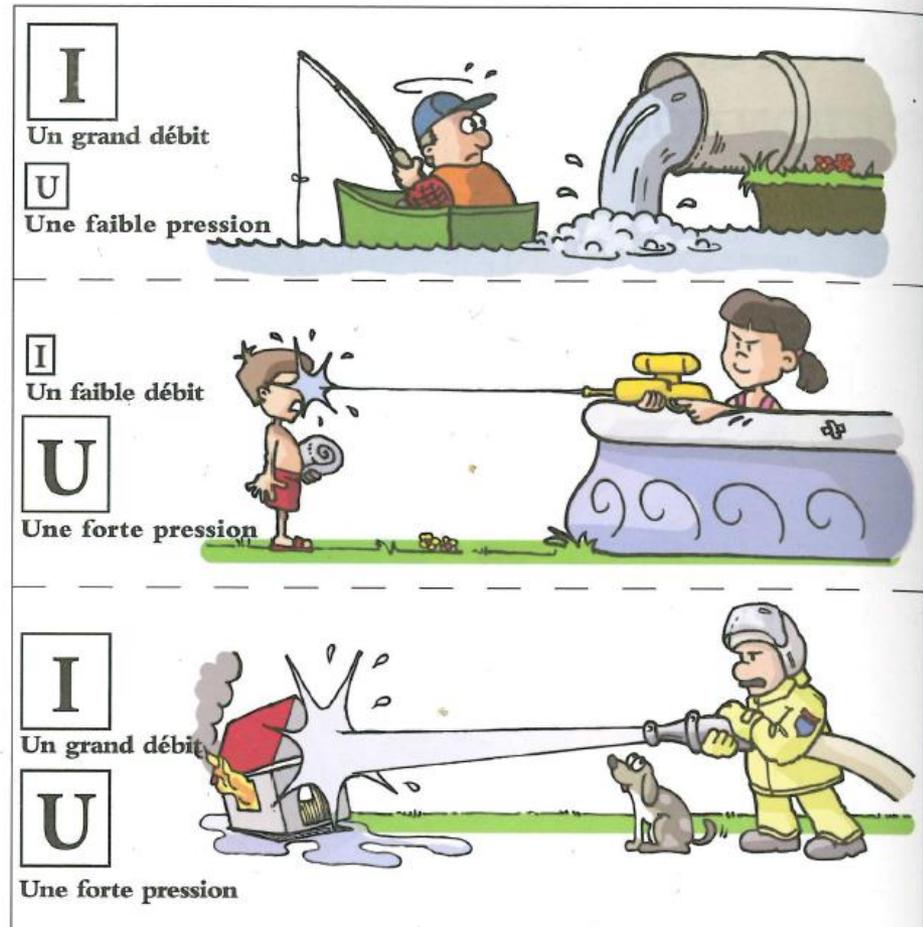
Analogie avec les fluides



Analogie entre l'électricité
et un montage hydraulique

Analogie avec les fluides

FIGURE 1.4
Une analogie



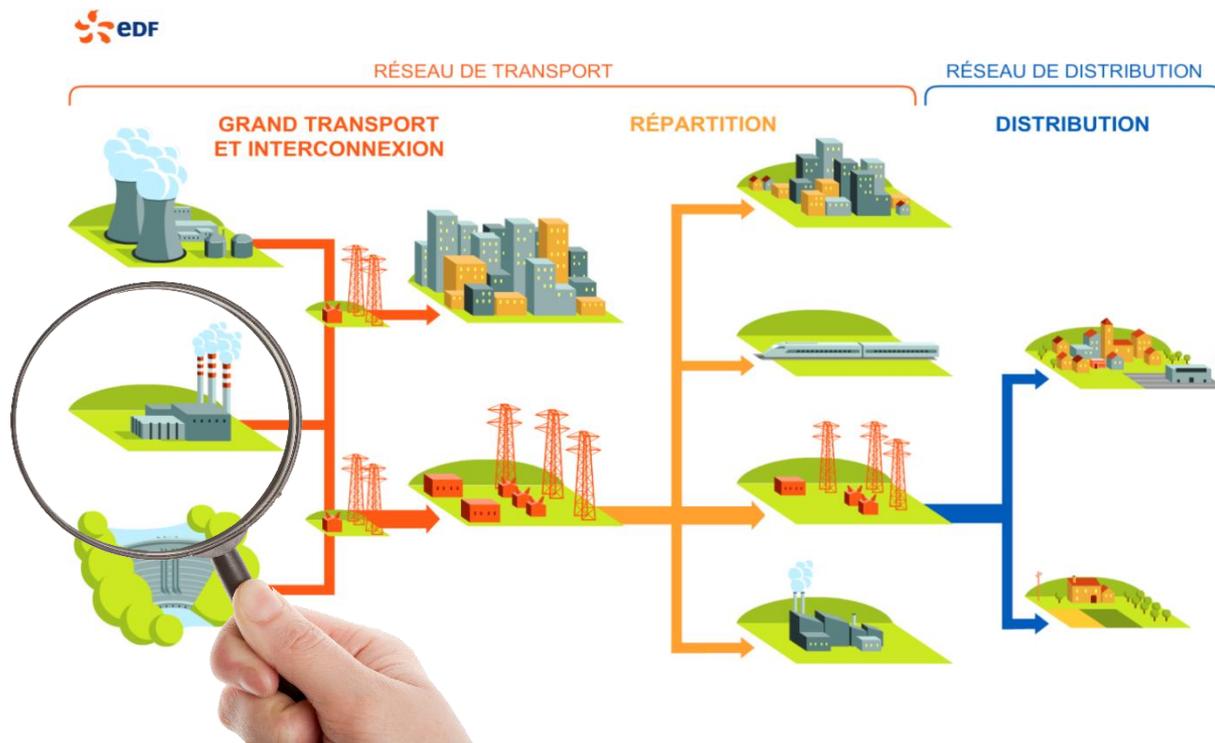
$$P = U \times I$$

Production d'énergie électrique

QUELQUES GENERALITES

Production électrique

La production électrique est un secteur industriel visant à assurer un **service d'approvisionnement d'énergie électrique** le plus régulier, stable et sécurisé possible

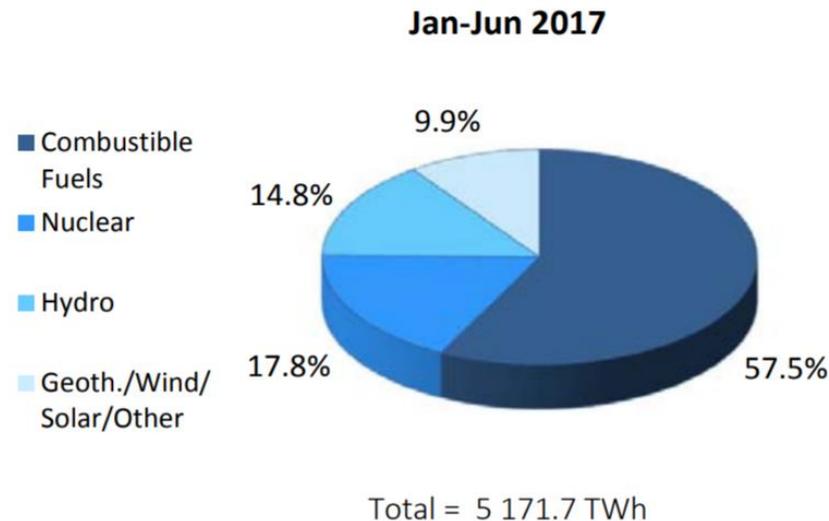


Production électrique

- L'énergie électrique n'est pas une source d'énergie primaire
- La production électrique nécessite des ressources d'énergie
 - Ressources **renouvelables** (i.e. inépuisables à l'échelle du temps humain)
 - Ressources **non-renouvelables**
 - Actuellement la plus usitée au niveau mondial
 - Consommation des ressources jusqu'à épuisement ?

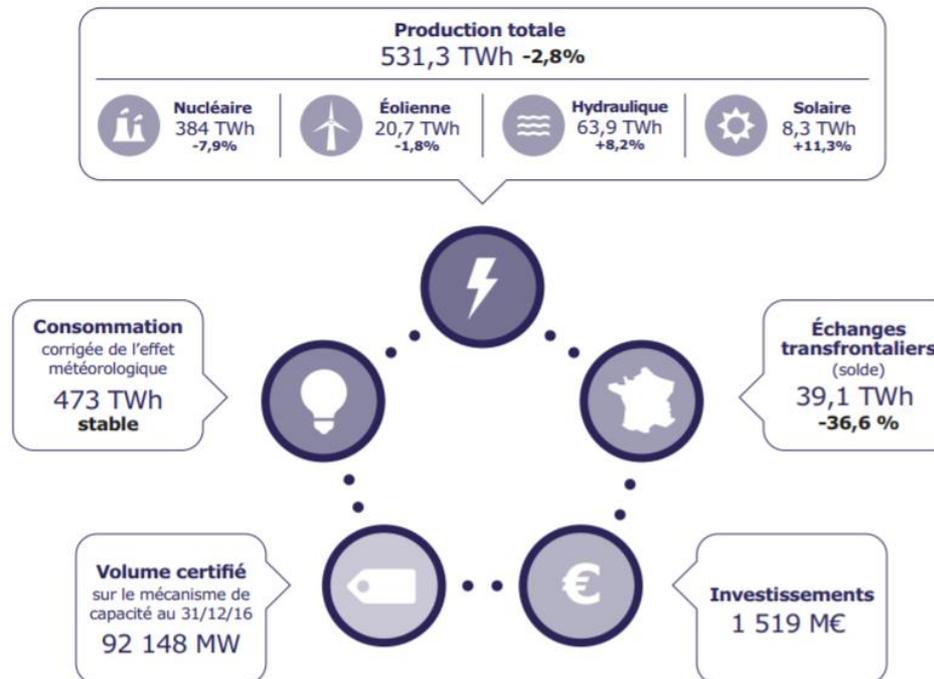
Production électrique

- Production mondiale ~ 10000 TWh



Production électrique

- En France, en 2016:
 - Production: **530 TWh** → essentiellement nucléaire
 - Consommation: **473 TWh**
 - L'excédent représente essentiellement l'exportation aux pays voisins



Puissance électrique

- Sachant que la France produit une énergie de 530 TWh chaque année, quelle **puissance électrique moyenne** cela représente-t-il ?
- Réponse:
 - 1 année = 365 x 24h = 8760 h
 - $P = E / T = 530 \text{ TWh} / 8760 \text{ h} = 60,5 \text{ GW}$

Production électrique



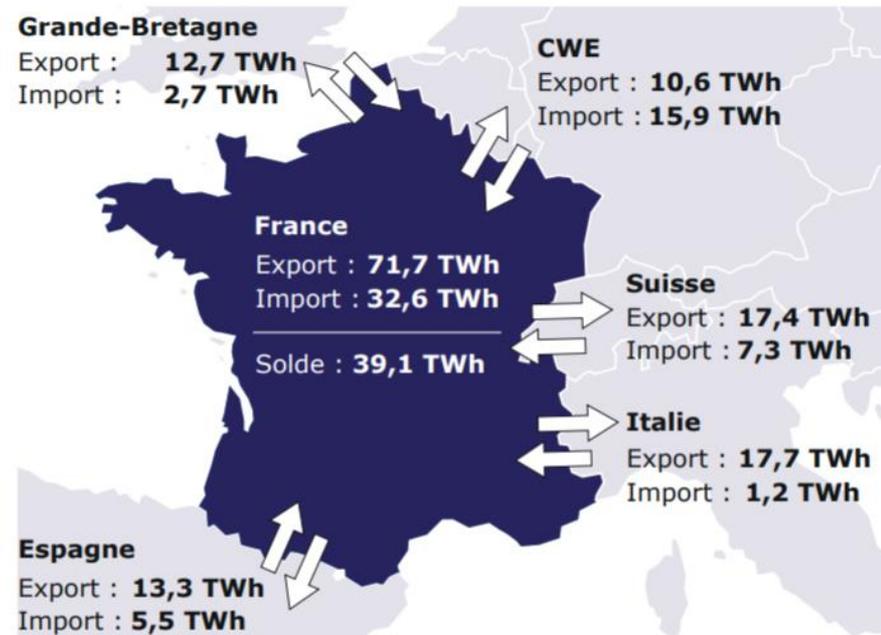
- 1^{er} producteur d'électricité au monde (2017):
EDF
 - 95% de la production française ne génère pas de gaz à effet de serre.
 - En France, EDF est **un service public**
 - *Continuité de service*
 - *Sécurité*
 - *Adaptabilité des besoins*
 - *Egalité des traitements*

Export



France-Espagne
Nouvelle liaison souterraine
65Km – 2,8GW

Bilan des échanges contractuels en 2016



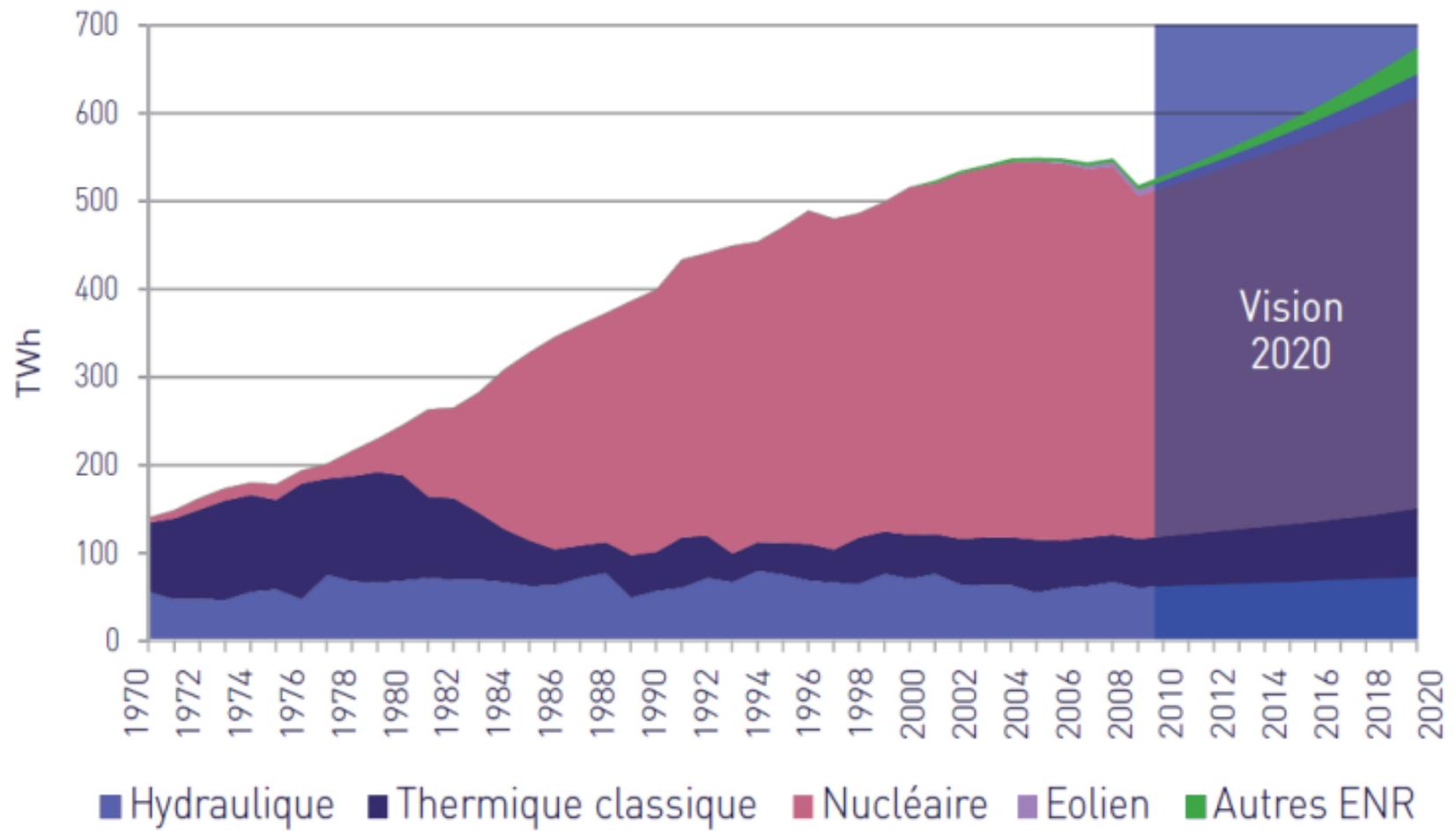
Production électrique

- 19 centrales nucléaire
 - 58 tranches
- 29 centrales thermiques
 - Pétrole, fioul, charbon
 - ...
- 10 centrales au gaz naturel
- 570 centrales hydrauliques

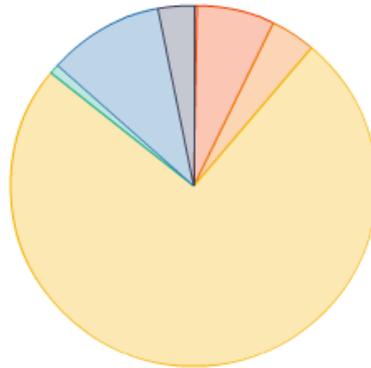
Répartition des capacités certifiées par filière au 31/12/16t

| | | |
|---|---------------------|------------------|
|  | Nucléaire | 54 147 MW |
|  | Thermique classique | 11 014 MW |
|  | Hydraulique | 14 333 MW |
|  | Solaire | 219 MW |
|  | Eolien | 1 873 MW |
|  | Autres | 8 687 MW |
|  | Effacement | 1 875 MW |
| | TOTAL | 92 148 MW |

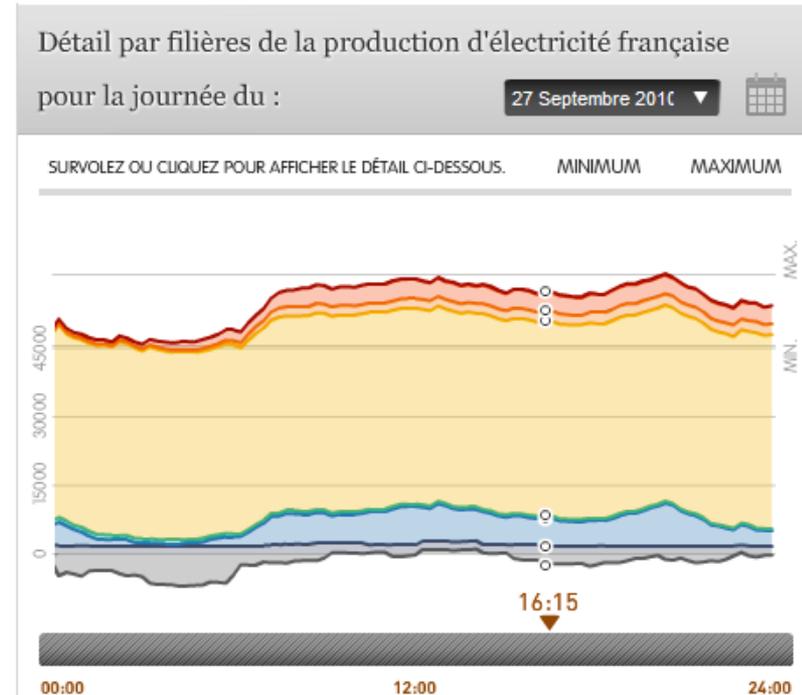
Production électrique



Production électrique



Survolez les légendes pour obtenir plus de détails.

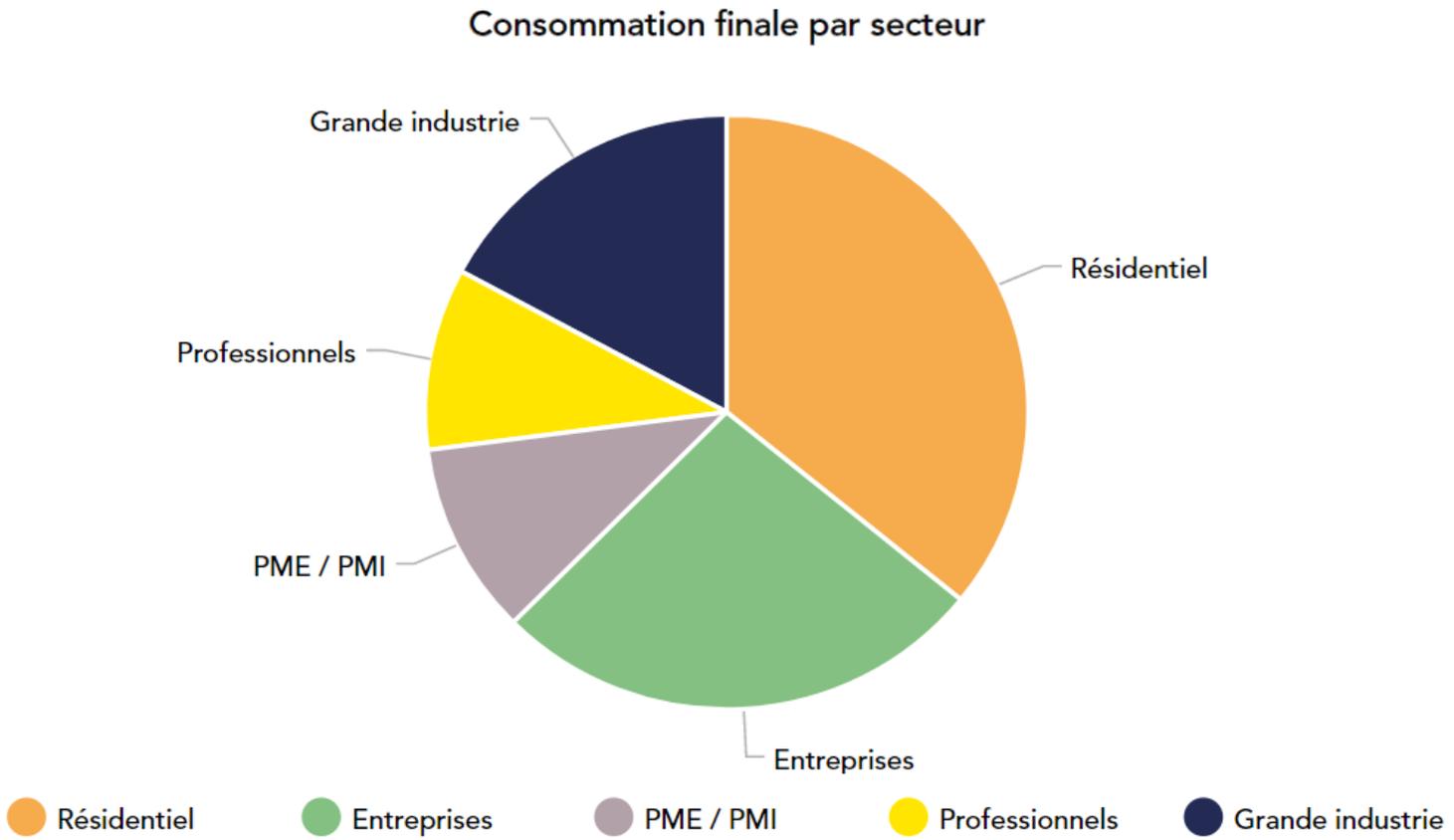


Fluctuation de la production en fonction de la consommation (saison, moment de la journée ...)

<https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>

→ **Nécessité de plusieurs sources primaires** pour s'adapter aux besoins de production et de la disponibilité/capacité de production

Consommation



Production d'énergie électrique

ENERGIE NUCLEAIRE

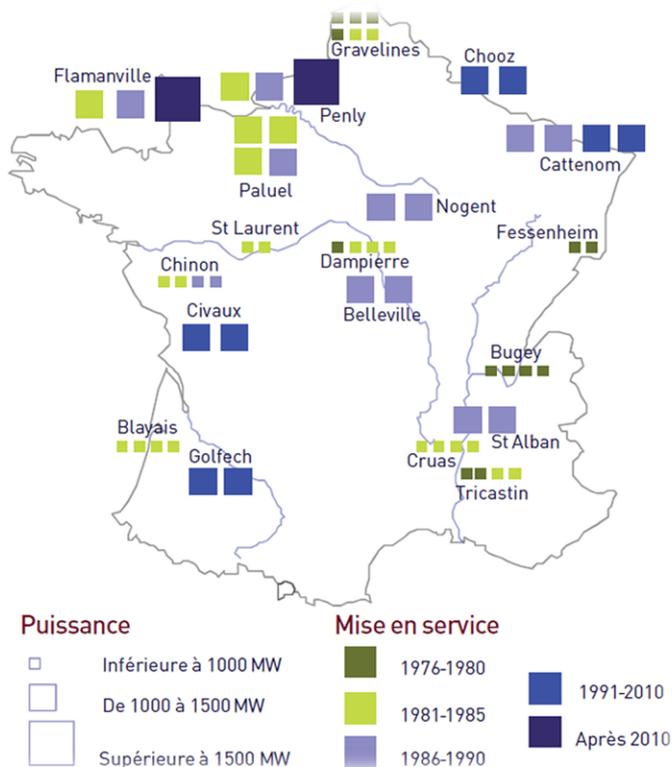
Production d'énergie électrique de source primaire nucléaire

- Production totale / pourcentage de l'énergie produite par le pays

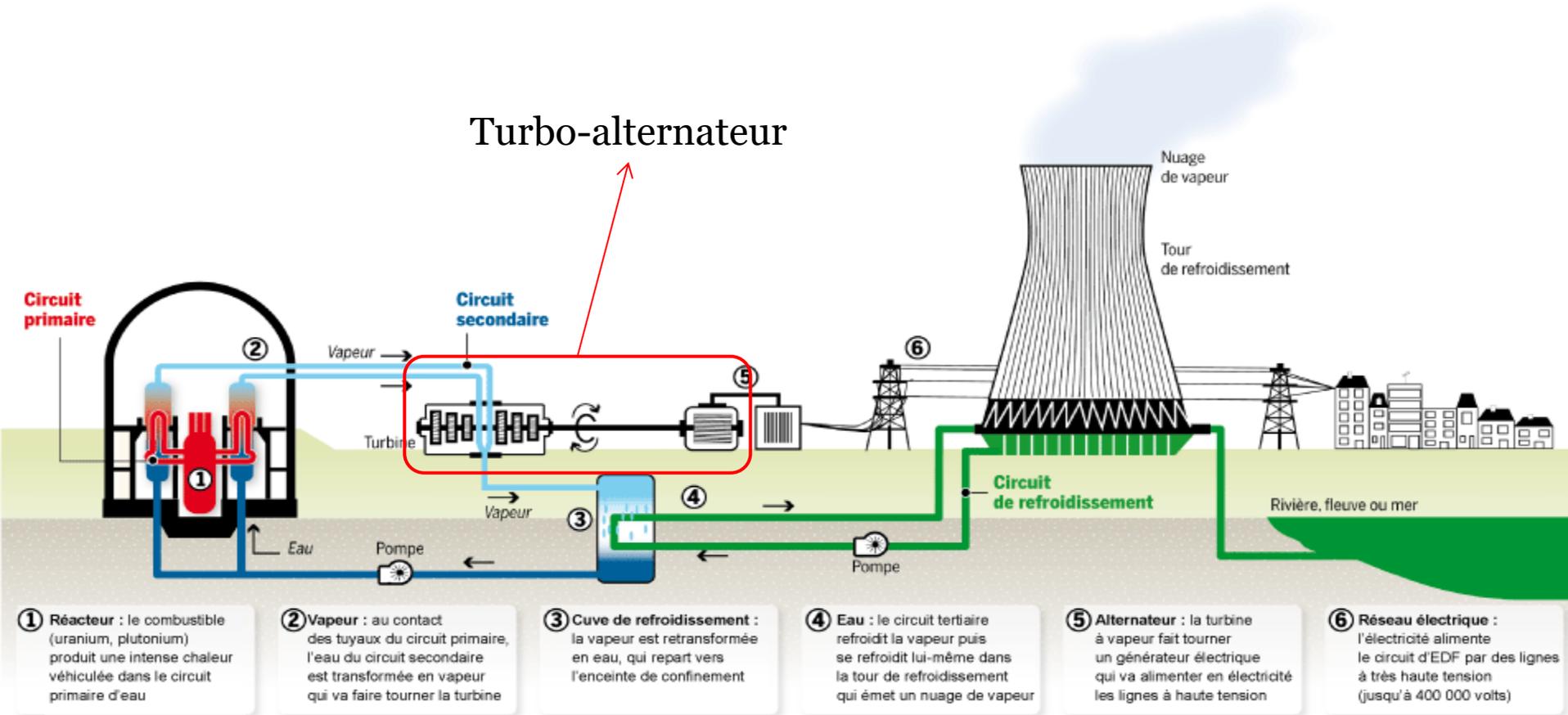
| Pays | Total énergie nucléaire | Part du nucléaire dans la production totale |
|--------|-------------------------|---|
| USA | 798,7 TWh | 20 % |
| France | 384 TWh | 72 % |
| Japon | 263,1 TWh | 29 % |

Energie nucléaire

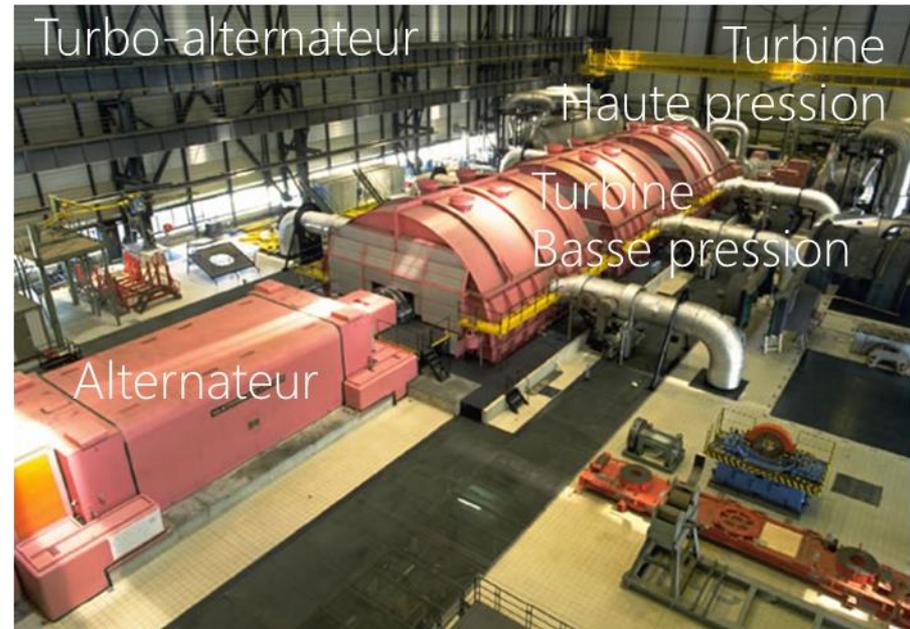
- 436 tranches dans le monde dont 58 en France
 - 1 Tranche peut produire 1GW
 - 1 EPR peut produire 1,65 GW



Principe de production



Principe de production



Energie nucléaire

- Pour:
 - **Une tranche est particulièrement productive** en termes de puissance
 - **Stockage de la source primaire** relativement simple
 - Cours de la source primaire peu fluctuante
- Contre:
 - Ressource épuisable (uranium, plutonium, ...)
 - **Dangers très graves en cas d'accident**
 - Stockage et retraitement des déchets très difficiles
 - **Rendement faible** ($\sim 33\%$ pour une tranche classique et 35% pour un EPR).

Production d'énergie électrique

ENERGIE FOSSILE

Energie fossile

- **Charbon**
 - Ressource à forte disponibilité
 - Mais génère beaucoup de pollution
- **Gaz naturel**
- **Pétrole/Fioul**
- **Biomasse** (matière organique), déchets, ...



Près de **60% de la production mondiale** d'électricité utilise les ressources fossiles comme source d'énergie primaire

Acteurs majeurs



Production d'électricité hors
pétrole (3^e groupe mondial)

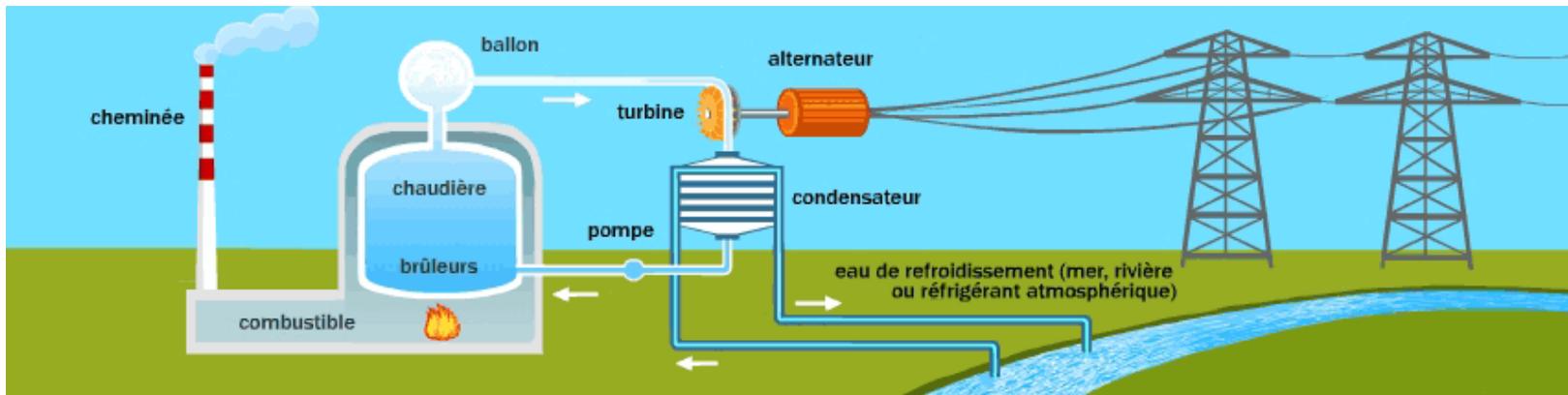
Transport, distribution et stockage
de gaz naturel



1^{ere} entreprise française du CAC40

Extraction, raffinage, exploitation
du pétrole

Centrales thermiques



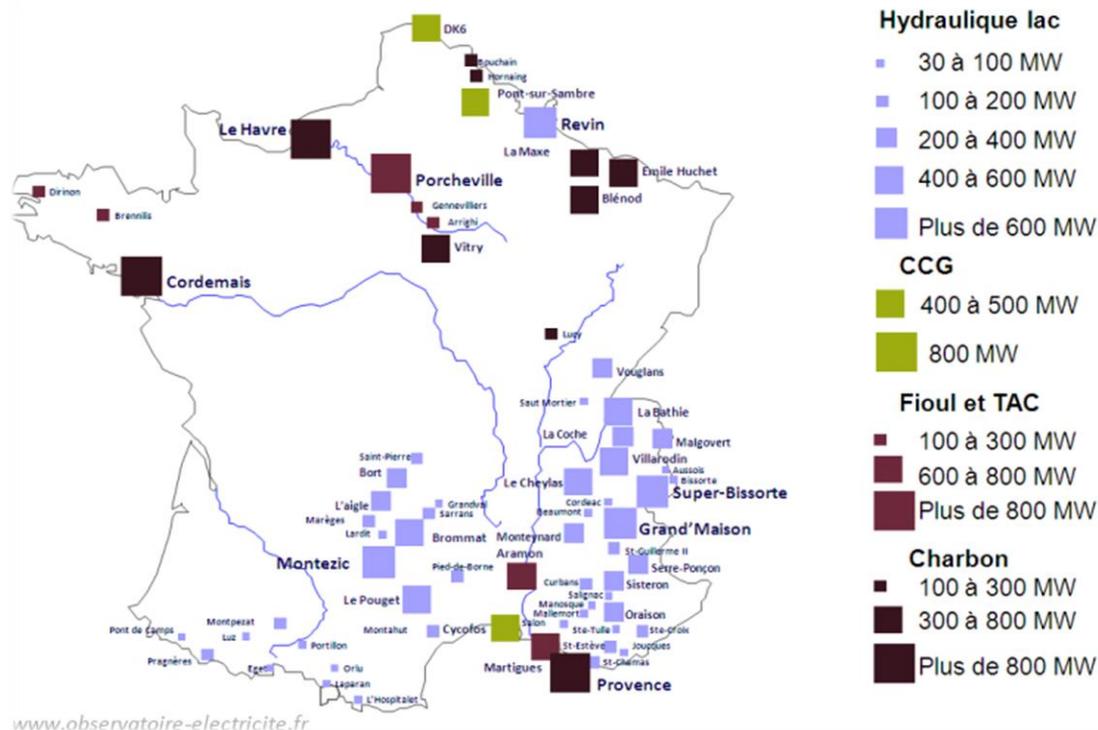
Centrales thermiques

- Les centrales thermiques ont pour avantage **une grande réactivité**
 - Mise en production plus rapide que les centrales nucléaires
 - Permet de faire face aux pointes de consommation
 - Exemple: centrale de Porcheville → sécurisation de la production d'électricité en région parisienne



Infrastructures en France

- Infrastructures de complément au nucléaire
 - Présentes pour **assurer continuité et stabilité** du réseau
 - Implantations où absence d'autres centrales



Centrales à énergie fossile

- Pour
 - **Mise en route rapide**
 - **Bon rendement** (>45%) pour les technologies récentes
 - Centrales délivrant de **fortes puissances**
 - Stockage d'énergie primaire **simple**
 - Coût de production faible
- Contre
 - **Forte pollution**
 - Forte dépendance aux ressources
 - Ressources épuisables

Production d'énergie électrique

ENERGIE HYDRAULIQUE

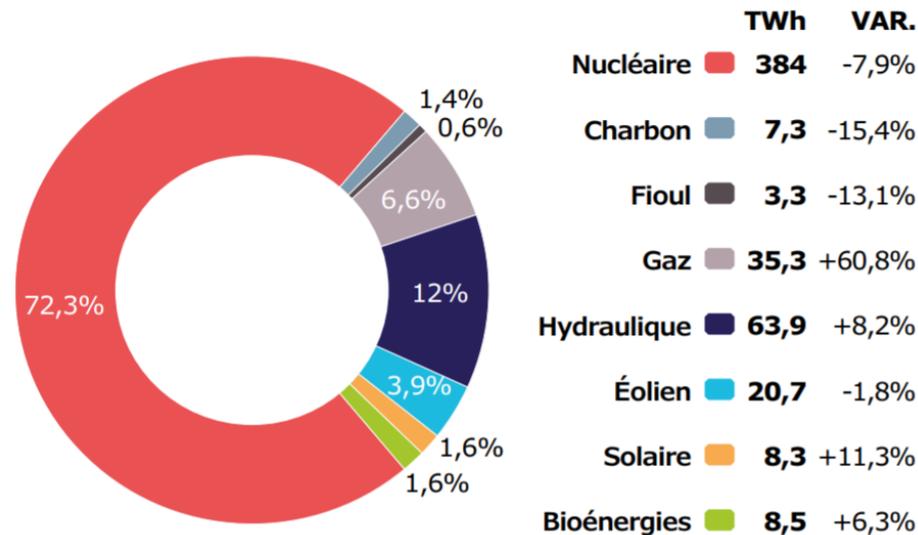
Energie hydroélectrique

- **70% du potentiel hydroélectrique** est déjà exploité en France via 570 centrales
- Représente environ 15% de la production française d'électricité
- **EDF** gère le parc de centrales hydrauliques en France
 - 1^e producteur européen

Energie hydroélectrique

- Part de l'hydroélectricité en France

Énergie produite : 531,3 TWh
(-2,8% par rapport à 2015)

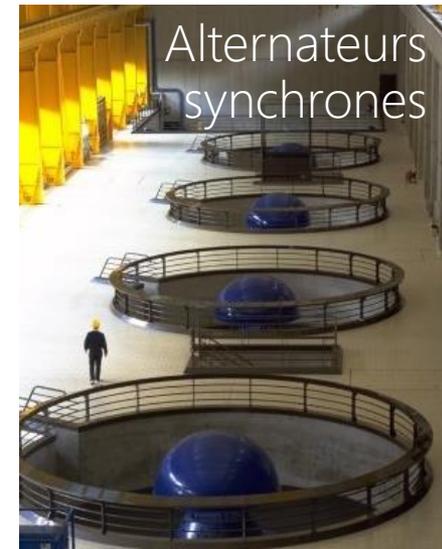
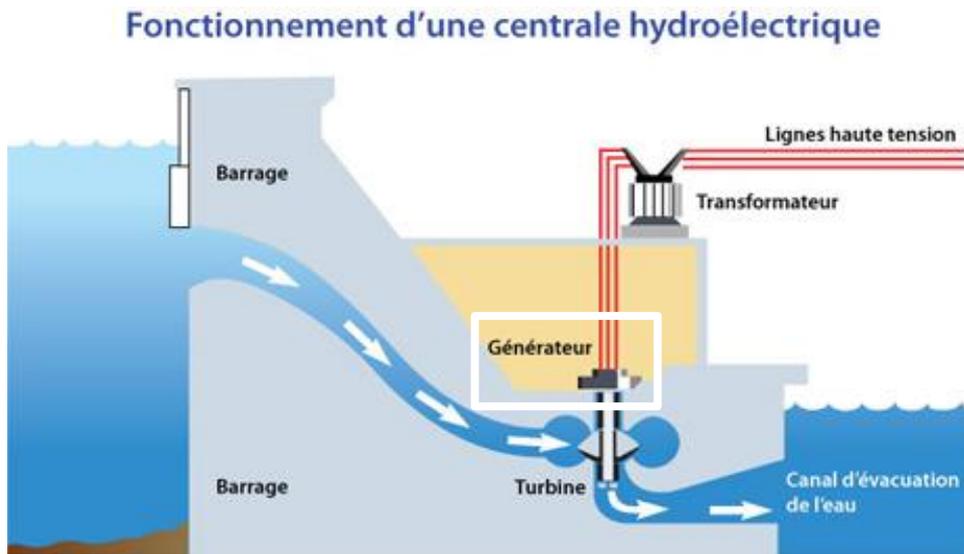


Energie hydroélectrique

- **Energie renouvelable sans stockage** de matière première
- Malgré la nécessité de construction de barrages et de canaux artificiels, énergie faiblement impactante sur l'environnement

Centrales hydroélectriques

- Principe



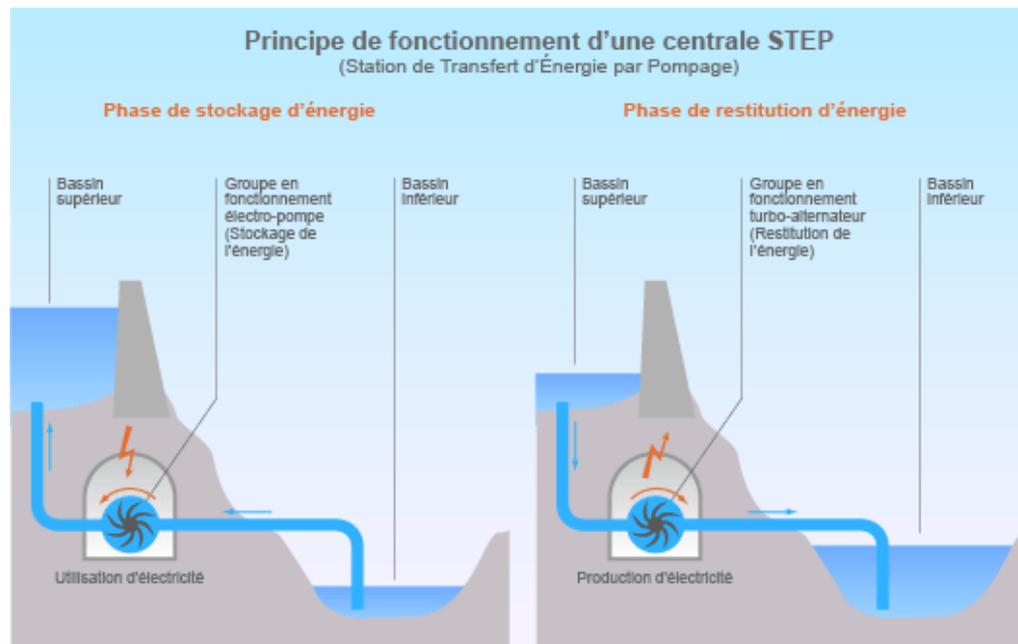
Centrales hydroélectriques

- Peuvent se positionner sur **un barrage, un lac, une chute d'eau, un canal, une zone à fortes marées** (ex: usine marémotrice de la Rance)



Centrales hydroélectriques

- Usines STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage)
 - **Stockage indirect** d'énergie primaire
 - Production d'électricité en appoint pour palier aux pics de consommation
 - Rendement important: entre 70% et 85%

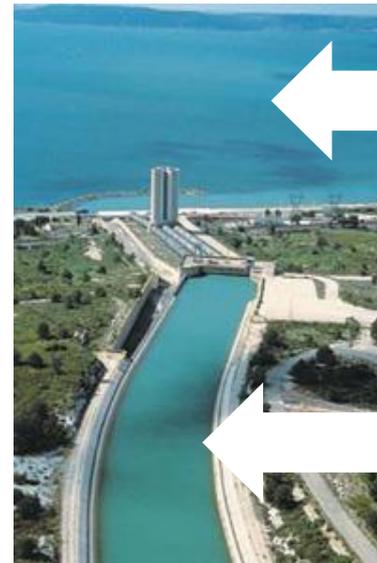


Hydroélectricité = énergie verte ?

- Attention: l'hydroélectricité utilise une ressource renouvelable, elle a cependant **un impact sur l'environnement**
 - Centrale de St Chamas
 - Conséquences hydrologiques et écologiques



Centrale EDF de St Chamas sur l'étang de Berre en Provence

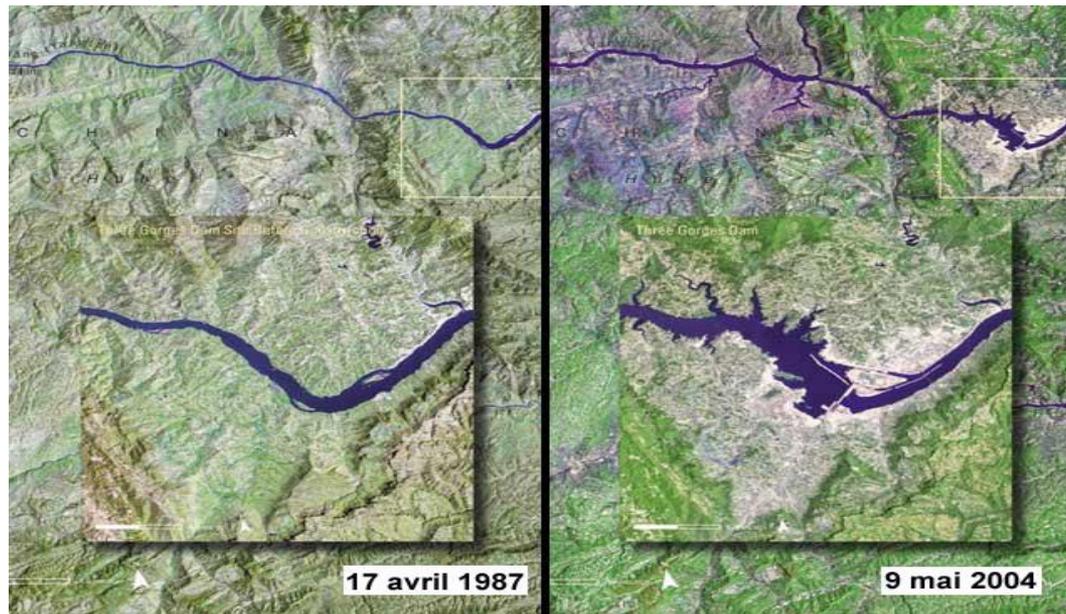


← Etang d'eau salée en Provence

← Canal d'eau douce, détournement Durance

Hydroélectricité = énergie verte ?

- Plus grande centrale hydroélectrique mondiale (barrage des 3 gorges en Chine)
 - Production instantanée de 18,2GW
 - Equivalent de 12 tranches nucléaires
 - **Impact important** sur l'environnement



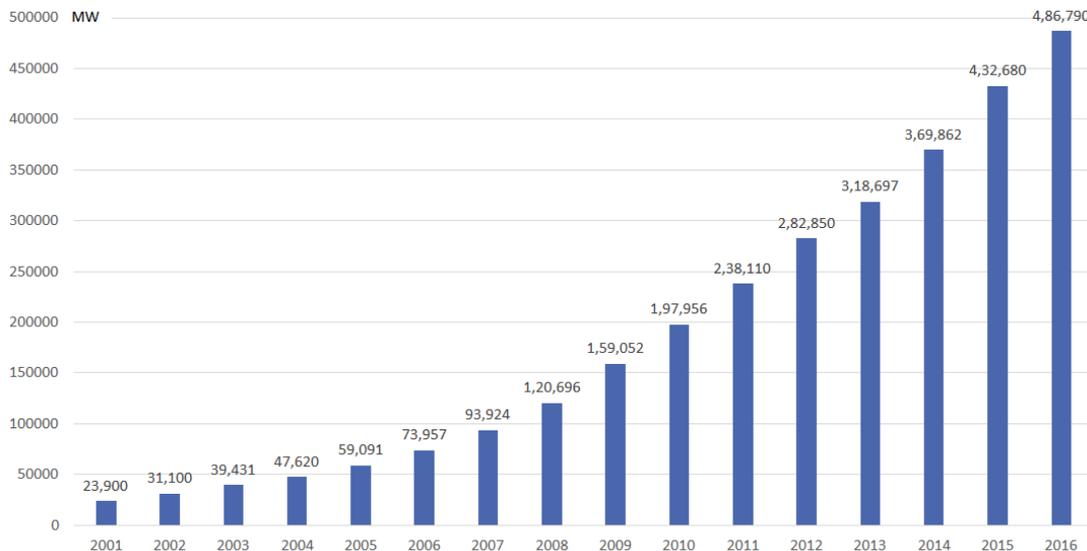
Production d'énergie électrique

ENERGIE EOLIENNE

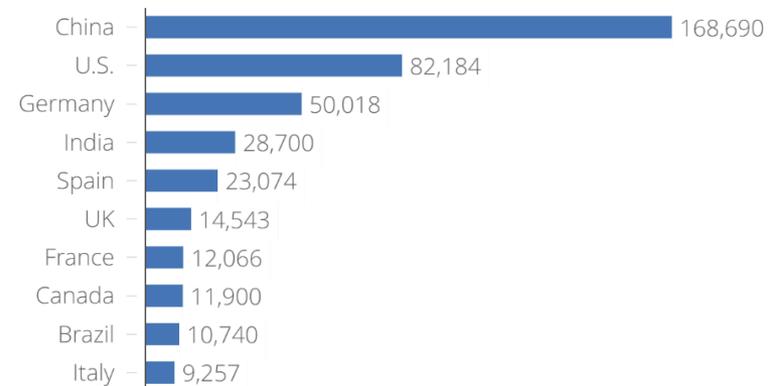
Energie éolienne

- Basée sur la force du vent
 - **Energie renouvelable**
 - Or installation et gestion du cycle de vie d'une éolienne, c'est une énergie propre.
- Parc mondial

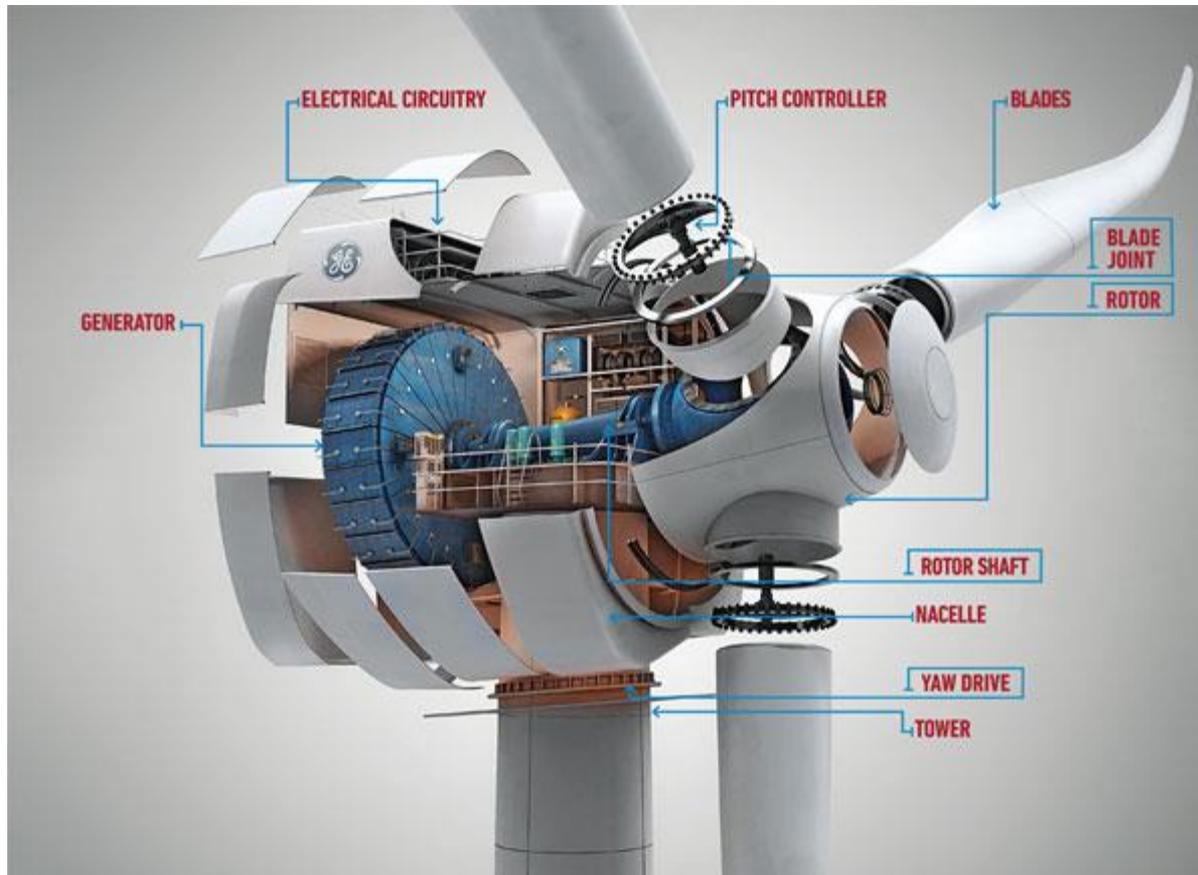
Global cumulative installed wind capacity 2001-2016



Top 10 Cumulative Installed Capacity at the End of 2016 (in MW)



Principe de fonctionnement d'une éolienne

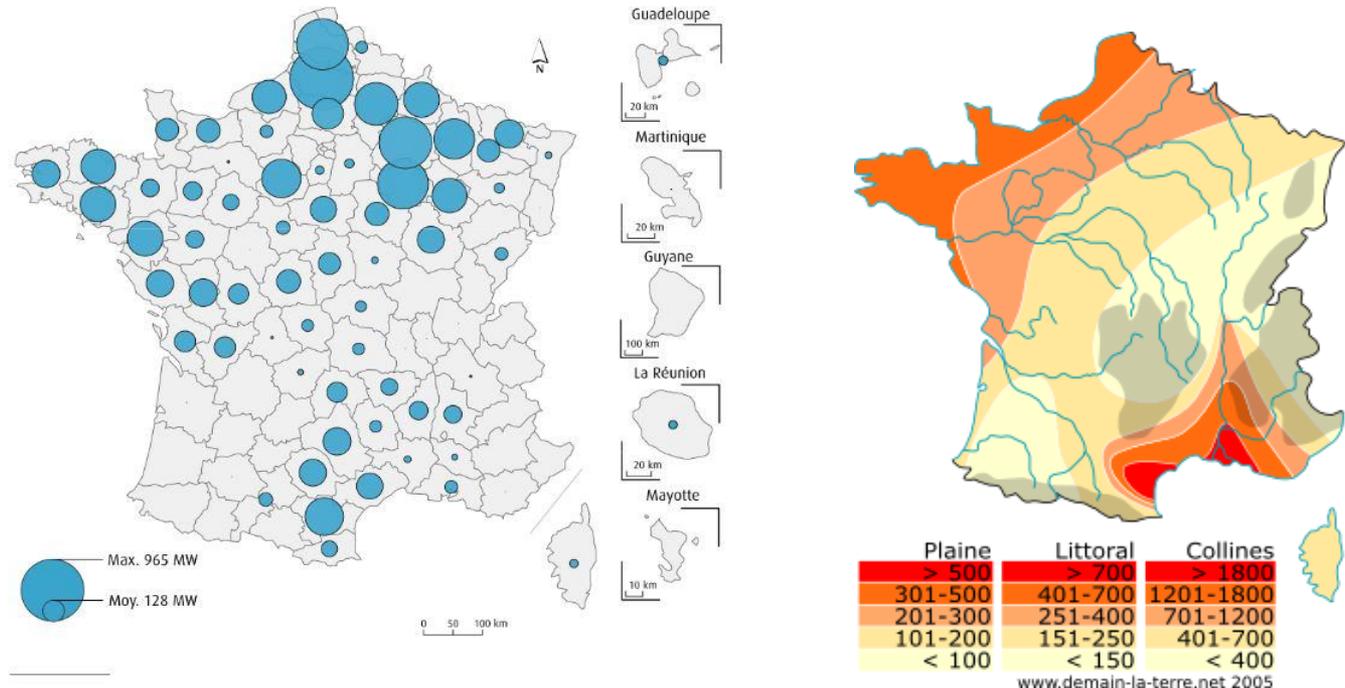


Parc éolien français

- Puissance installée en France: environ 12GW

Puissance éolienne totale raccordée par département au 31 mars 2016

En MW



Champ : métropole et DOM.

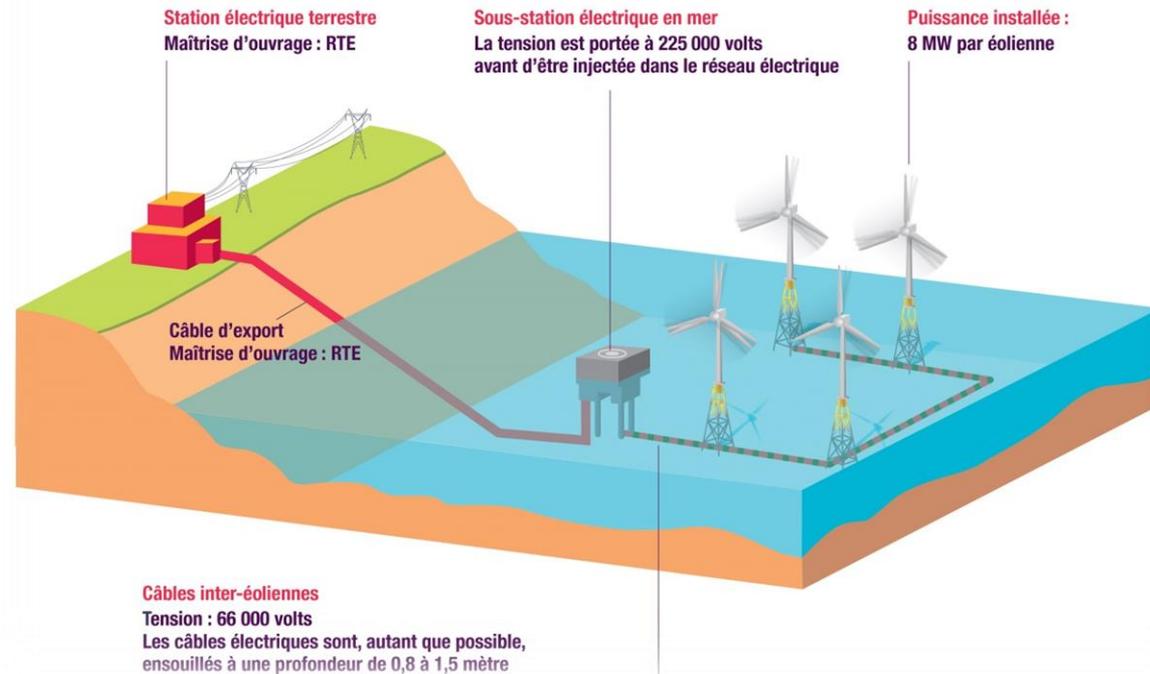
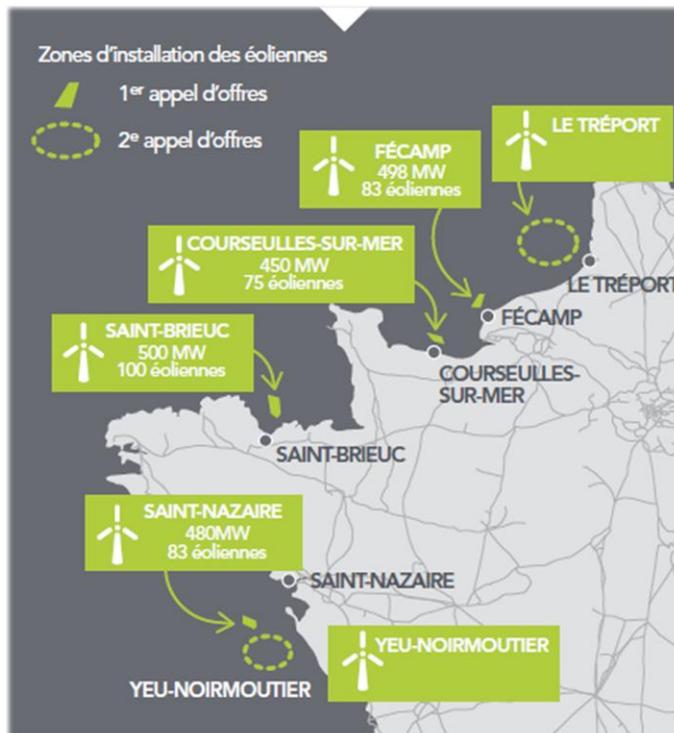
Source : SOeS d'après ERDF, RTE, EDF-SEI, CRE et les principales ELD

Energie éolienne

- Attention: puissance installée et non pas puissance effective
 - Une éolienne ne fonctionne en moyenne que **2000h par an** (une année = 8760h).
 - En moyenne, lissée sur une année, une éolienne ne produit que **600kW**.
 - A titre de comparaison, **la production d'une tranche de centrale nucléaire équivaut à 1500 éoliennes**.
- Attention: un parc uniquement basé sur l'éolien n'est pas **une solution viable**
 - Instabilité de production
 - Discontinuité de service

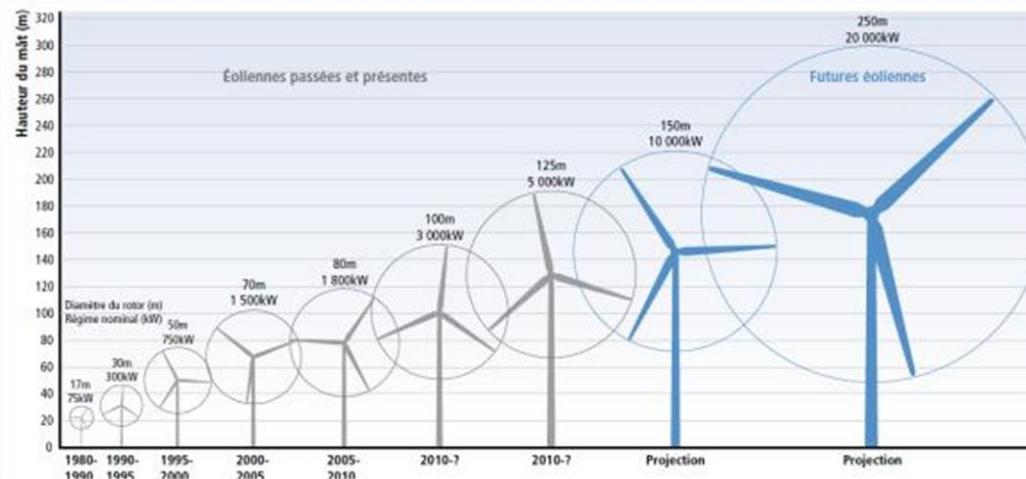
Eolienne offshore

- Eoliennes installées au large du littoral
 - Plusieurs projets en cours



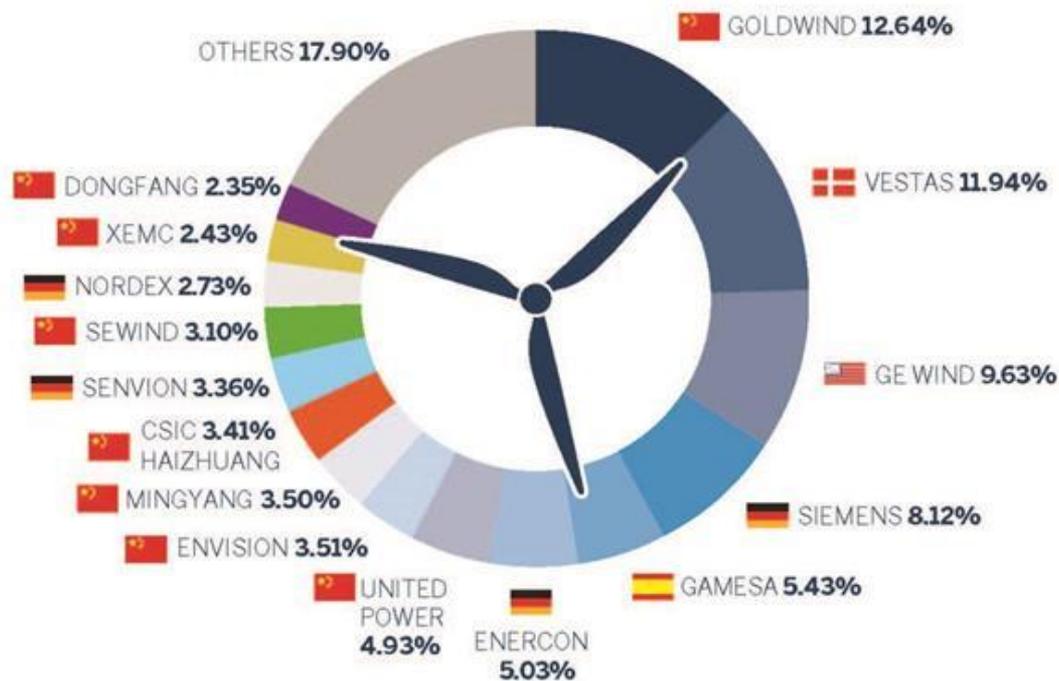
Eoliennes offshore

- Intérêt des éoliennes offshore
 - **Plus grand diamètre** → plus grande puissance produite
 - Actuellement, 164m pour une puissance de 8MW
 - Moins de nuisances sonores



Acteurs mondiaux du secteur

Top 15 wind turbine suppliers in annual global market 2015



Coût de production



(hors subventions et avantages fiscaux)

Production d'énergie électrique

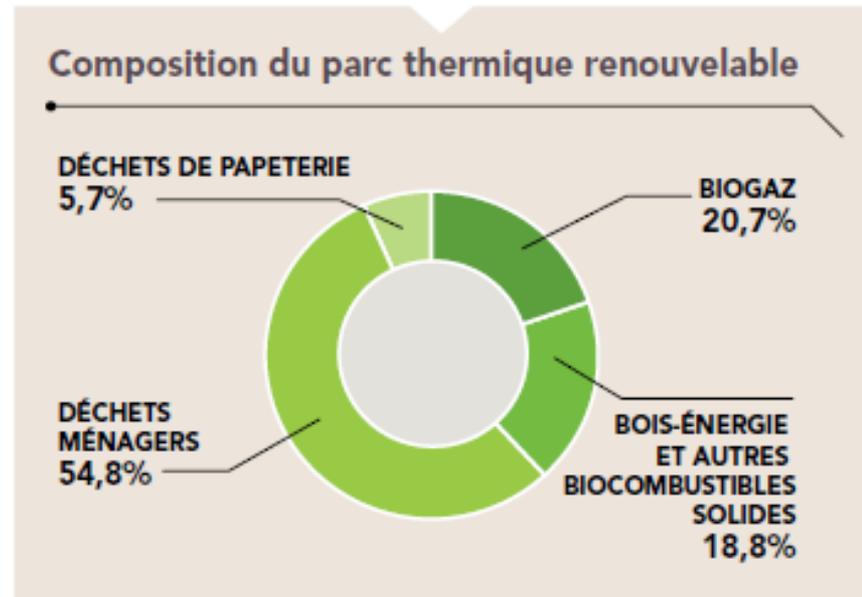
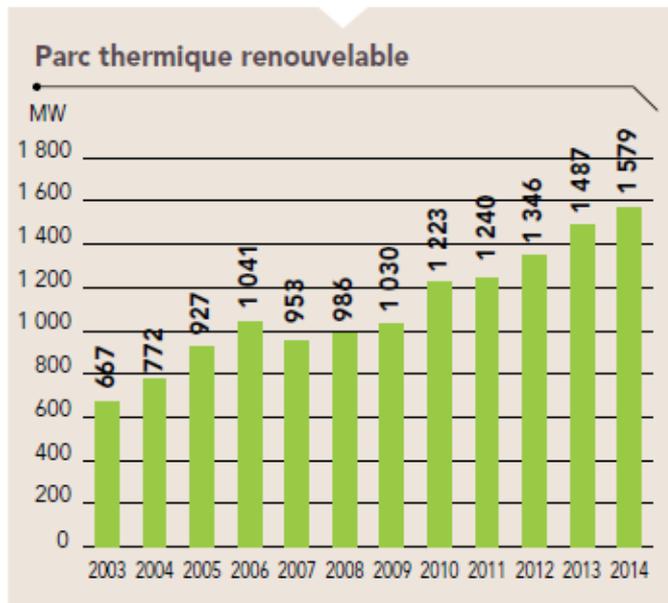
ENERGIE RENOUVELABLE

Energies renouvelables

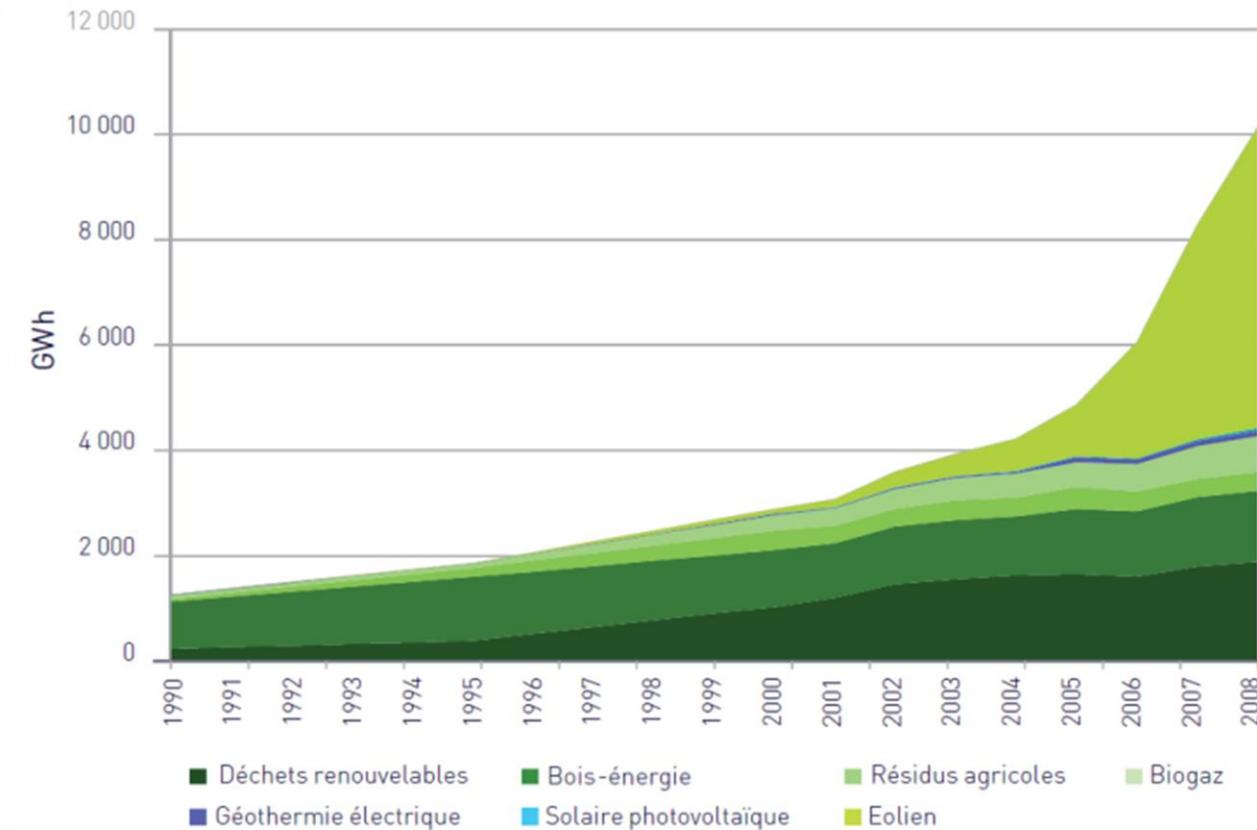
- Biomasse (exploitation de matières organiques) ou déchets renouvelables
- Production mondiale issue du renouvelable (i.e. 20% de la production totale environ)



Parc renouvelable français

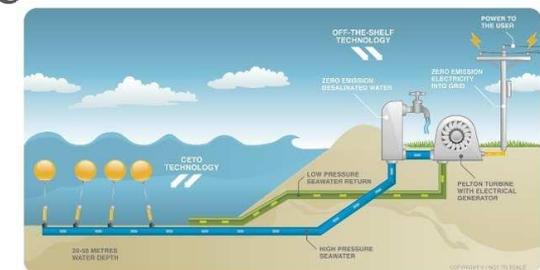
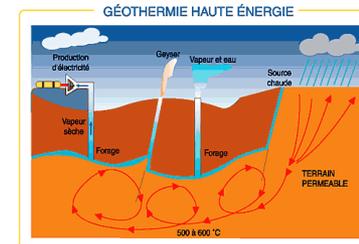


Parc renouvelable français



Autres sources d'énergie renouvelable

- **Solaire:**
 - 73GW installés dans le monde.
 - Secteur en croissance
- **Géothermie:**
 - marginal en France
 - Environ 13GW produits dans le monde
- **Force des vagues**
 - Solution innovante en développement
- **Hydrolienne**
 - Exploitation des courants marins et fluviaux



Transport de l'énergie électrique

Réseau électrique

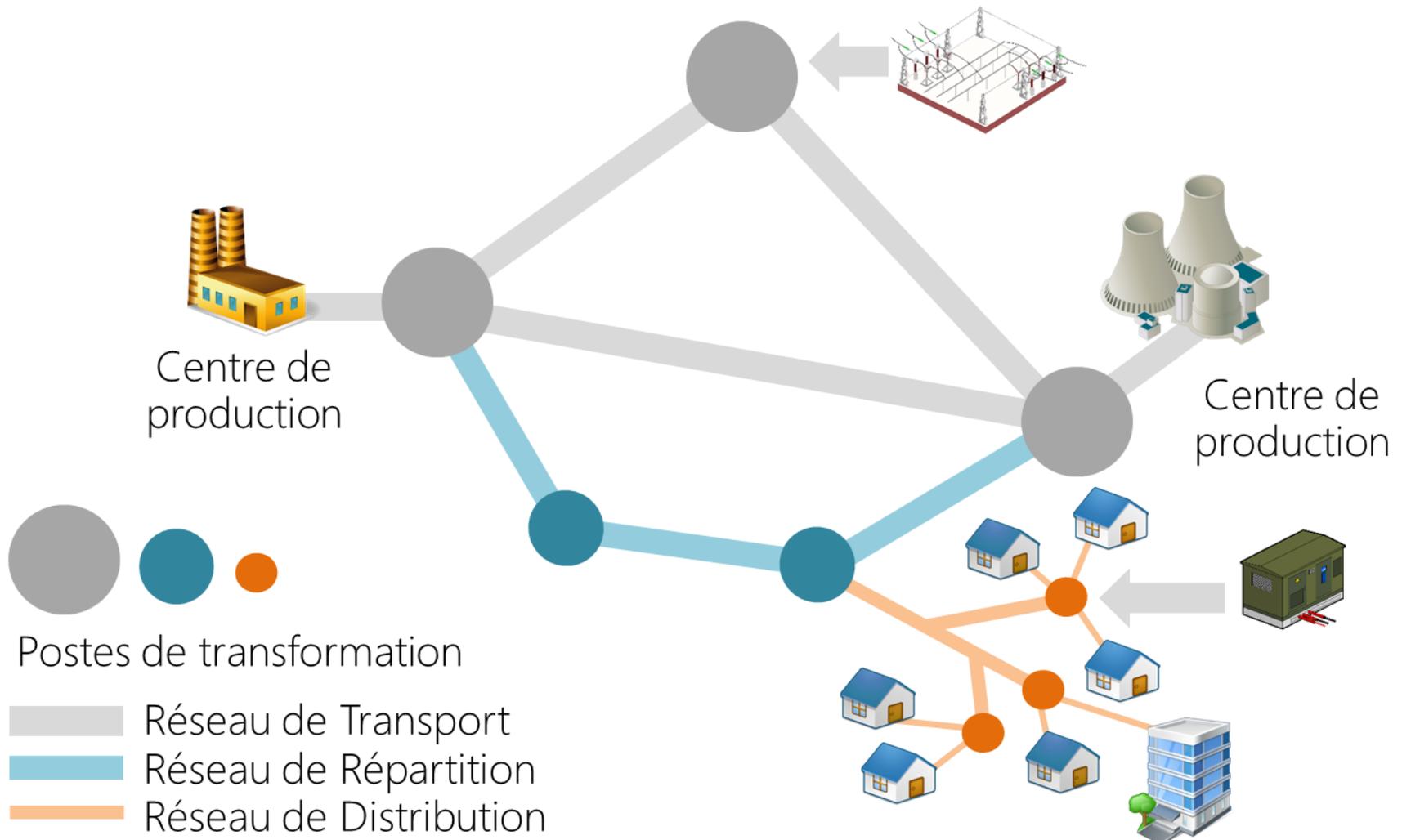
- Le réseau électrique est l'ensemble des **infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique** depuis les lieux de production vers les consommateurs
 - Pylônes
 - Lignes hautes tension
 - Transformateurs
 - ...
- Le réseau électrique doit garantir **stabilité** et **continuité de service**



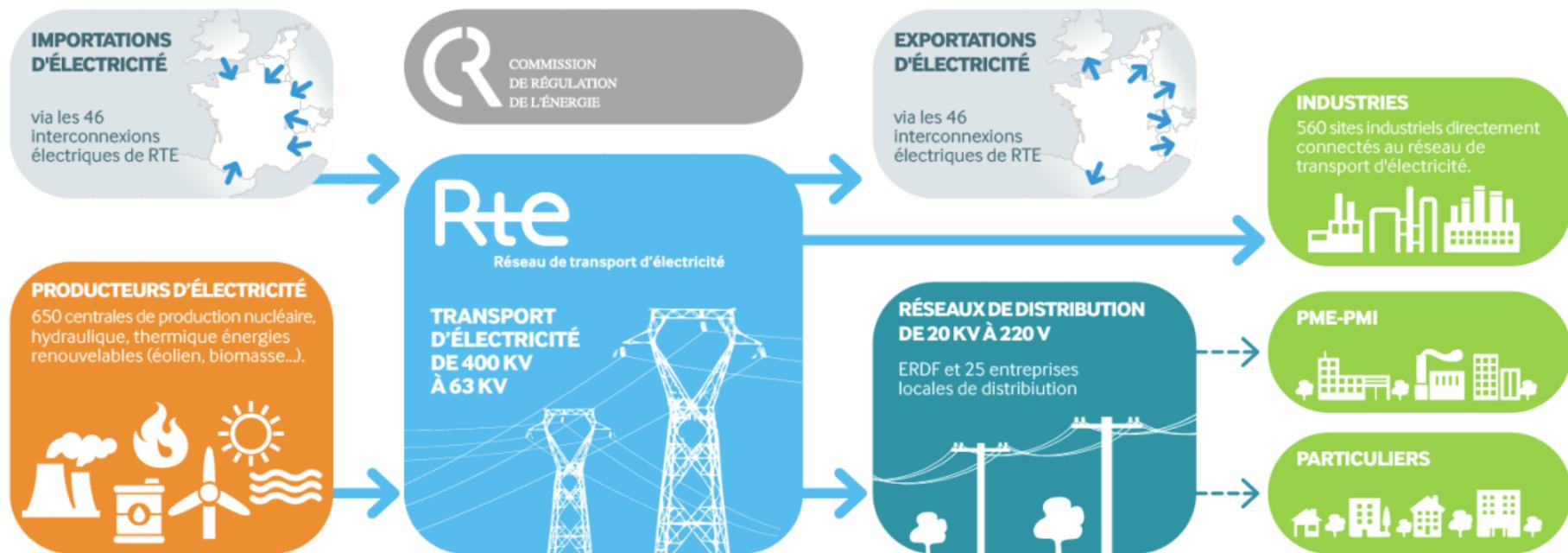
Réseau électrique

- **Réseau de transport**
 - Achemine l'énergie depuis les grands centres de production vers les régions consommatrices
 - Tension: 225kV/400kV
 - Autoroute énergétique
- **Réseau de répartition**
 - Desserte régionale
 - Tension: 63kV/90kV
 - Routes départementales
- **Réseau de distribution**
 - Distribution au client final
 - Tension: <50kV

Réseau électrique

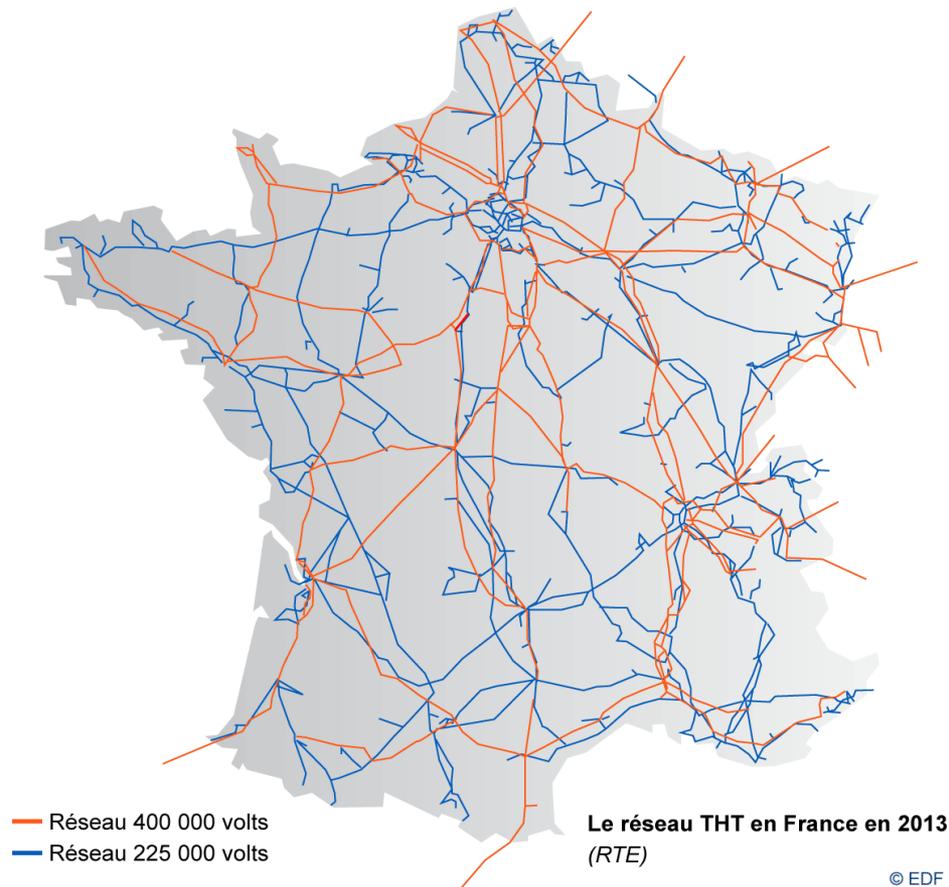


Réseau électrique



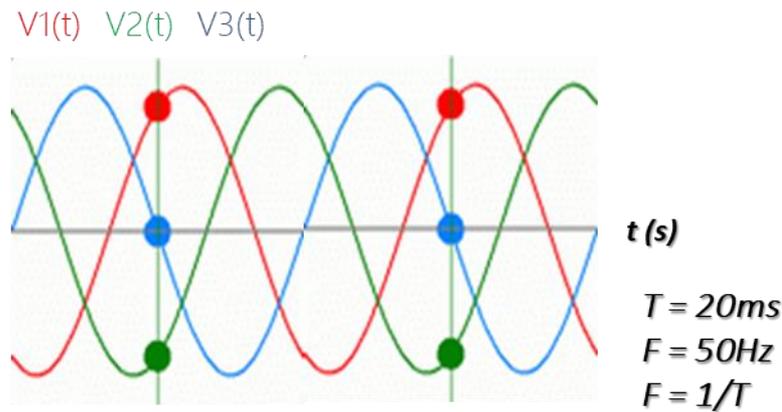
Gestion des réseaux de transport et de répartition

Réseau électrique



Réseau électrique

- Le transport de l'énergie électrique se fait en **triphase alternatif** (sinusoïdal à 50 Hz)
 - HVAC: High Voltage Alternative Current



Réseau électrique

- Les tensions de transport sont **très élevées**
 - Limitation des pertes par **effet Joule**

$$P_j = RI^2$$

- Réduction de la **chute de tension** en ligne

$$U' = 2IL \left(\frac{\rho}{S} \cos \theta + X \sin \theta \right)$$

- Moins de **sensibilité aux perturbations** → plus grande stabilité du réseau

Pertes par effet Joule

- **2,5% de la production**, soit environ 15TWh sont perdus par l'effet Joule du au transport.
 - De manière globale, 7% de de l'énergie produite s'échappe sous forme de perte chaque année
- Les constructeurs de câble (ex: Nexans) travaillent sur les matériaux pour **limiter les pertes** dues aux câbles

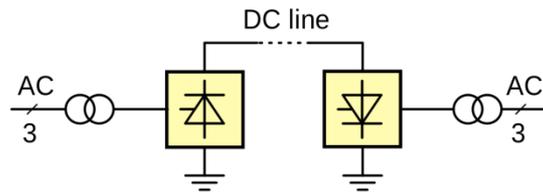


Ligne Haute Tension



Transport longues distances

- Moins couteux et plus efficace de transporter l'énergie électrique **en continu**
 - HVDC: High Voltage Direct Current
- Conversion



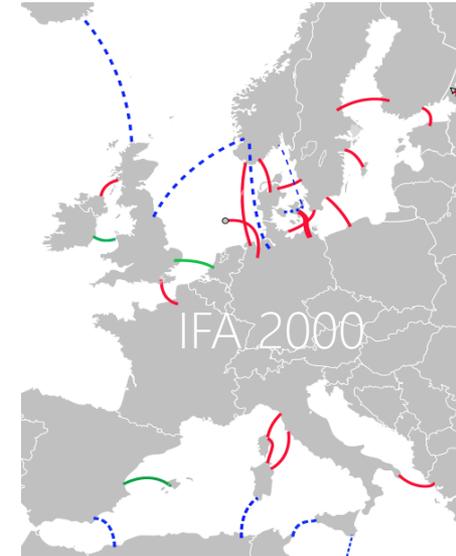
- Cas d'utilisation: transport sous-marin

Transport longues distances

- Avantages du HVDC
 - Diminution du **nombre de conducteurs**
 - *1 faisceau HVDC = 3 faisceaux HVAC*
 - *Section de câble HVDC plus faible*
 - Facilitation de **l'interconnexion entre pays**
 - *Tensions/fréquences différentes*
 - *Connection avec l'éolien offshore*
 - Un câble a **un comportement capacitif** en courant alternatif
 - *Charge et décharges qui peuvent consommer l'intégralité du courant*
 - *Sur des distances raisonnables, on peut compenser cet effet capacitif*
 - *En courant continu, cet effet n'existe pratiquement pas*

Transport longues distances

- Liaison France-UK (IFA 2000)



Transport longues distances

- Barrage des 3 Gorges (Chine)



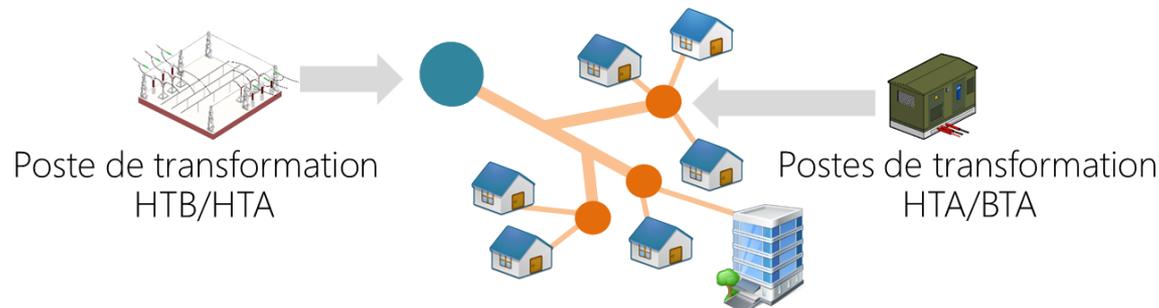
- Ligne de 1400 km pour une capacité de 5GW
- 2 pylônes DC remplacent 5 pylônes AC

Distribution de l'énergie électrique

Réseau de distribution

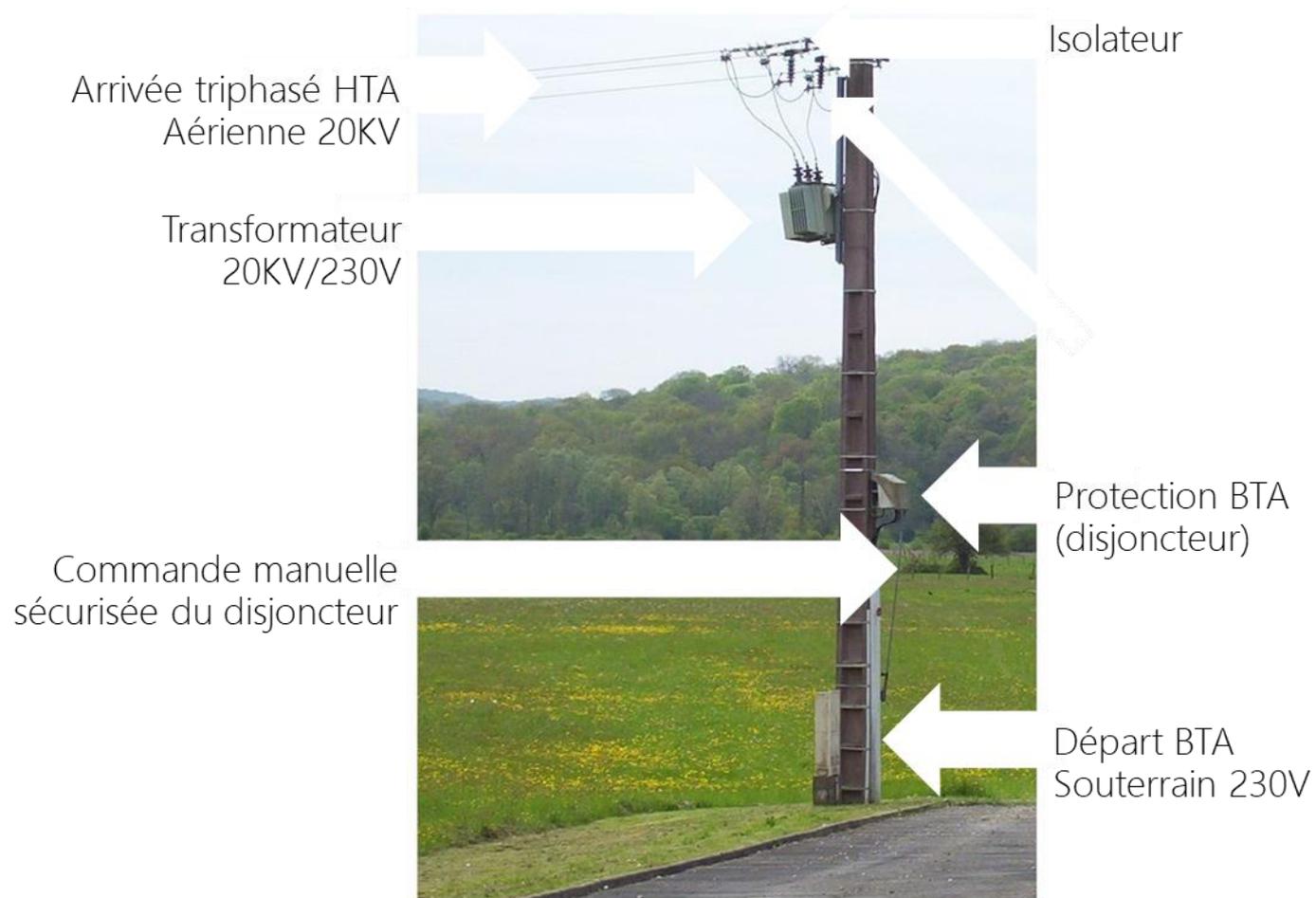
- Pour la distribution, il existe 4 niveaux de tension
 - Moyenne tension/basse tension
 - 20kV/15kV/400V/230V

- Réseau en arborescence

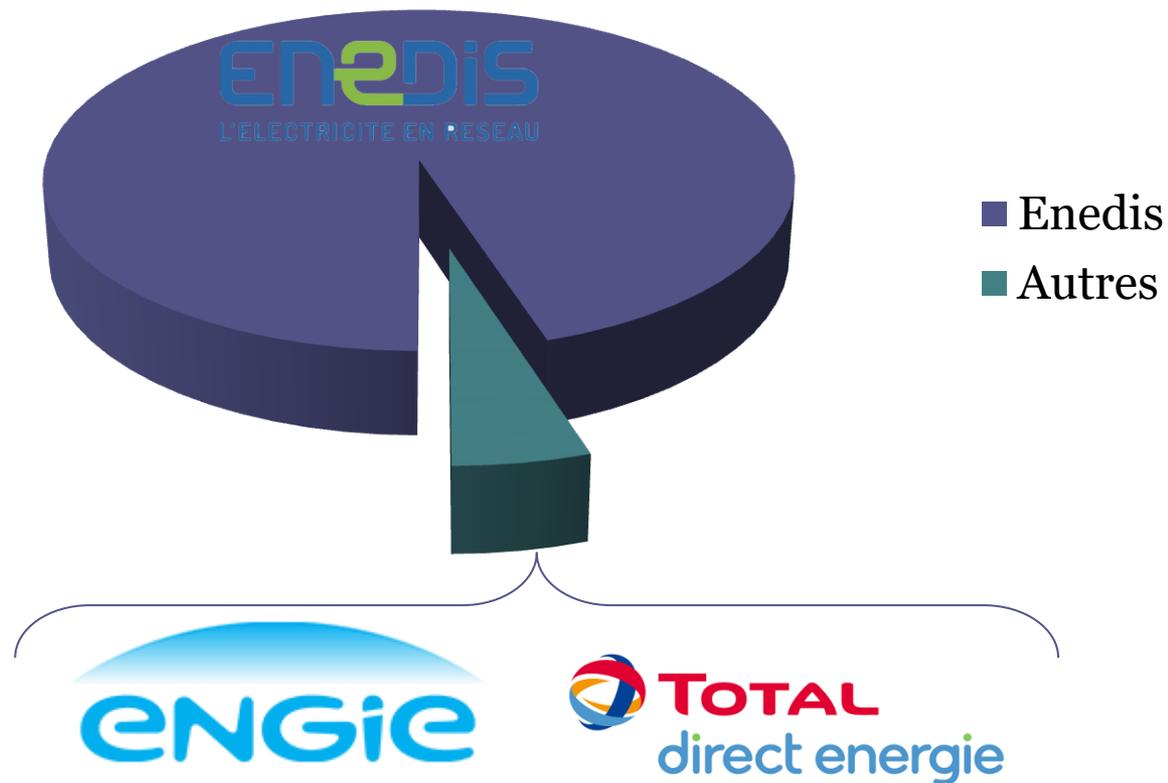


- Topologie peu couteuse et efficace
- Mais peut avoir des **problèmes de robustesse**
 - *Un défaut sur le réseau moyenne tension impactera beaucoup de clients en aval*

Poste de transformation



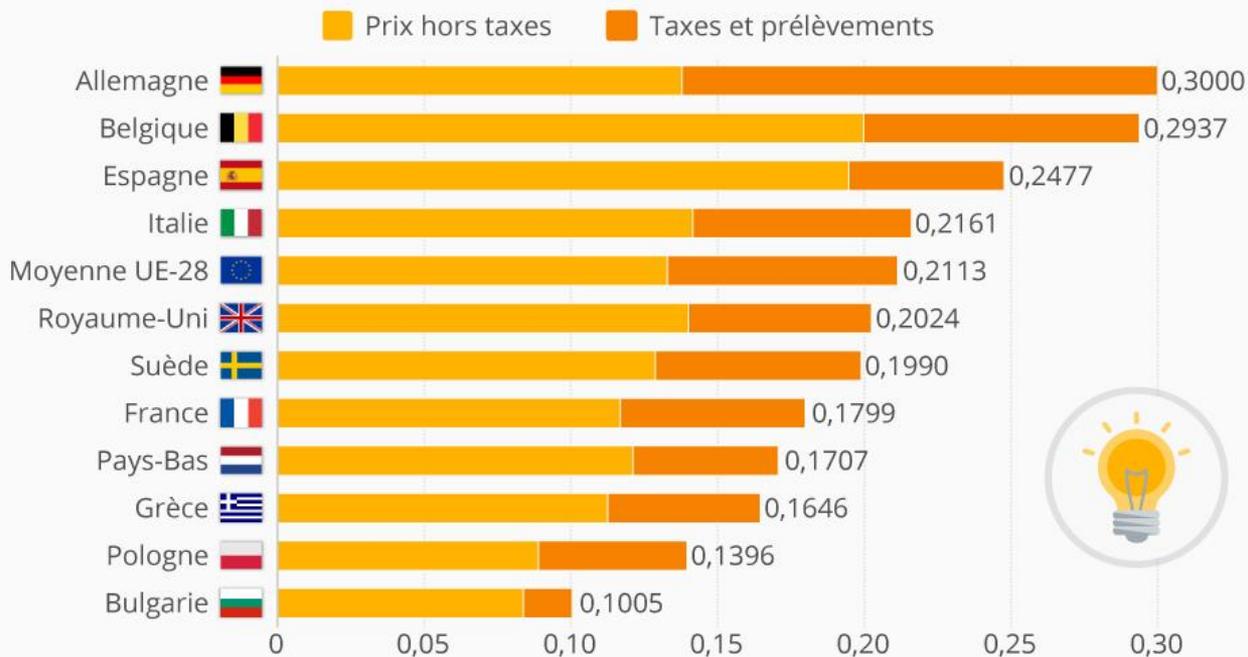
Acteurs de la distribution



Cout à la consommation

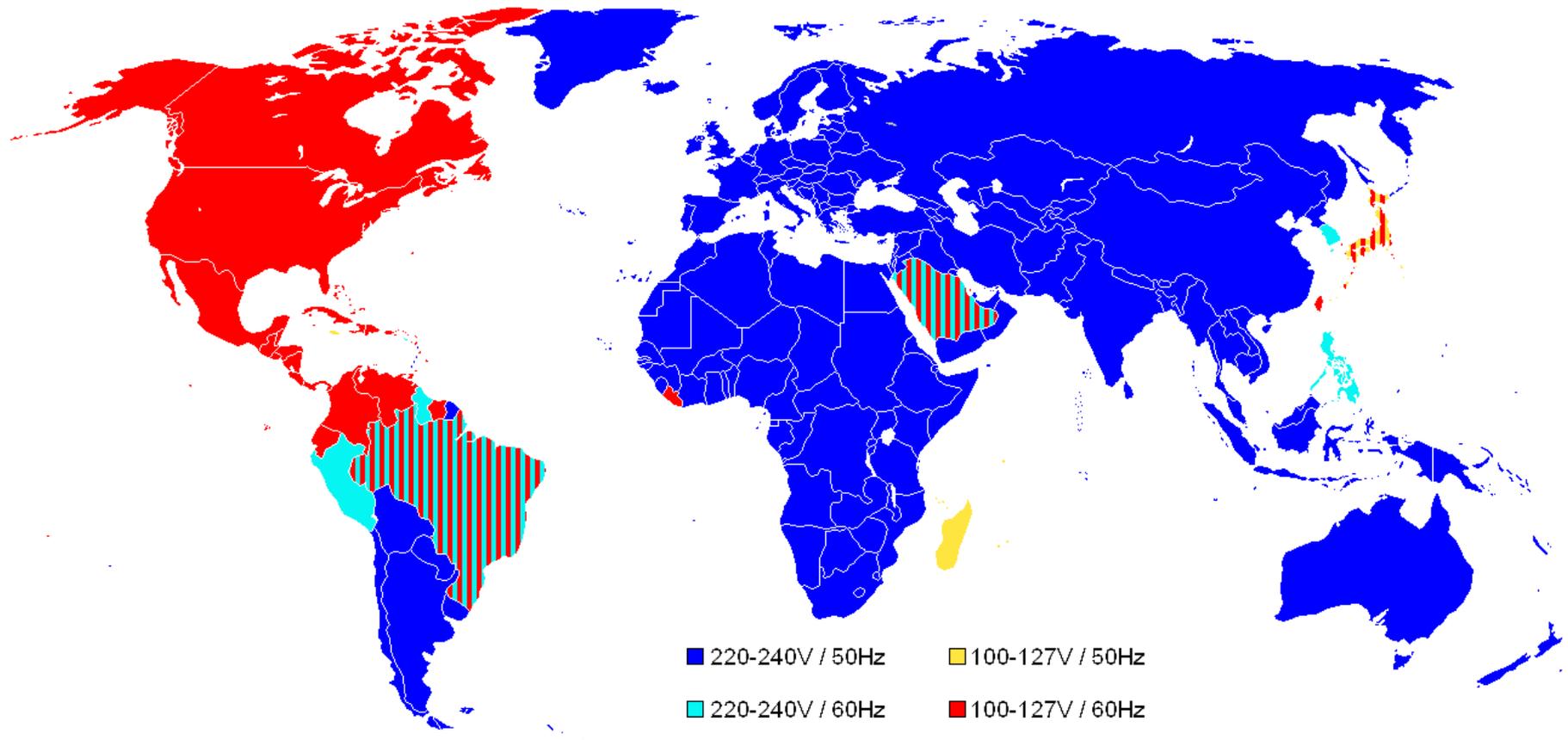
Le prix de l'électricité en Europe

Prix de l'électricité dans une sélection de pays en 2018 (en euro par kilowattheure) *



* Deuxième semestre 2018. Pour une consommation comprise entre 2 500 et 5 000 kWh, taxes et prélèvements inclus.

Basse tension dans le monde

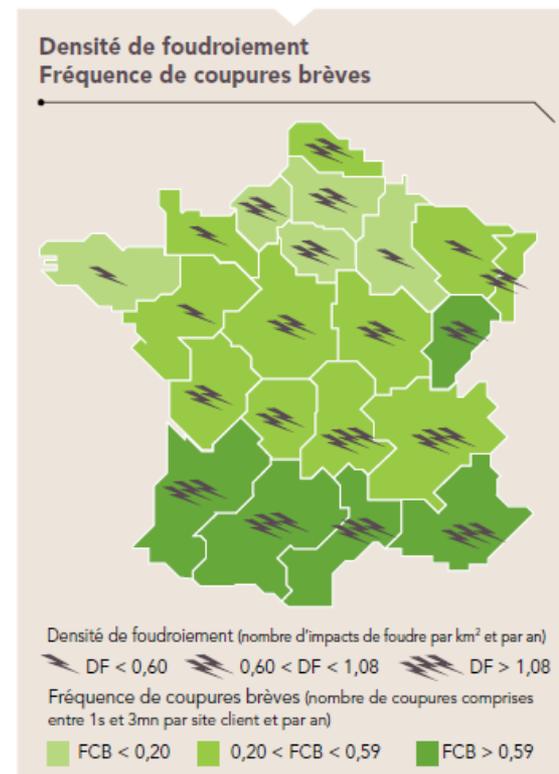
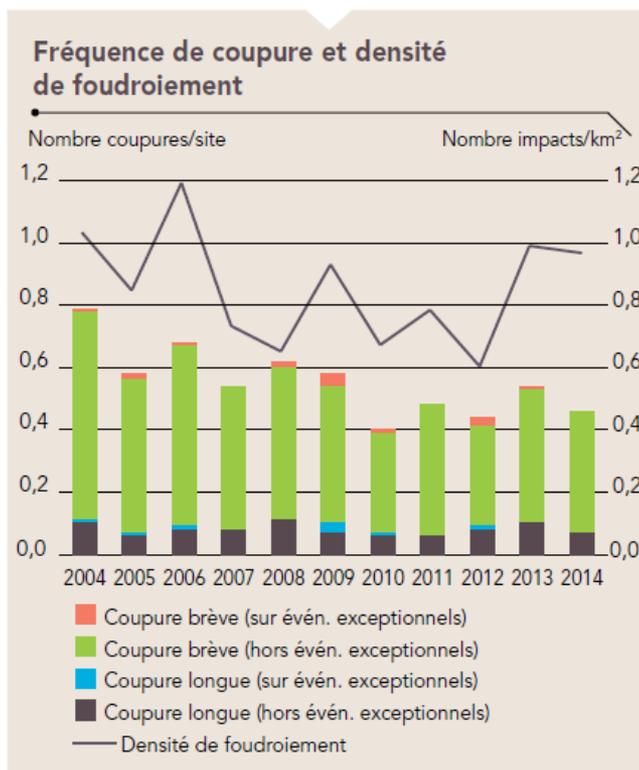


Protection

QUELQUES GENERALITES

Incidents sur le réseau

- Sur les lignes très haute tension (400kV), on observe en moyenne **2,5 défauts par an** pour 100 km de ligne
- Sur le réseau de distribution (20kV), on observe **150 incident par an pour 100 km** de ligne



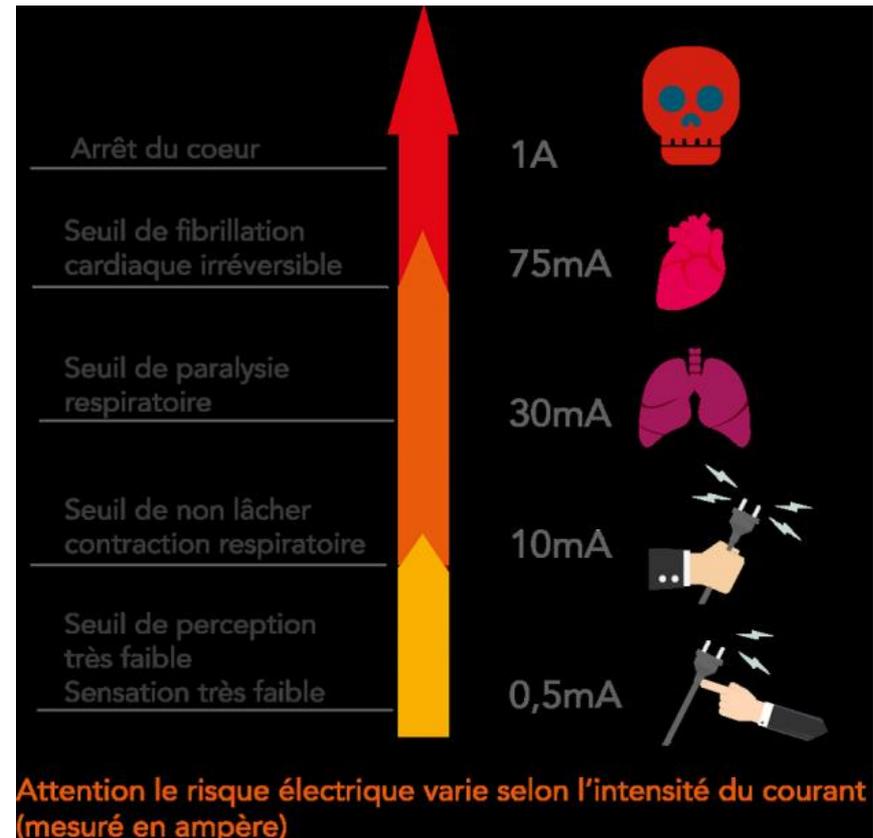
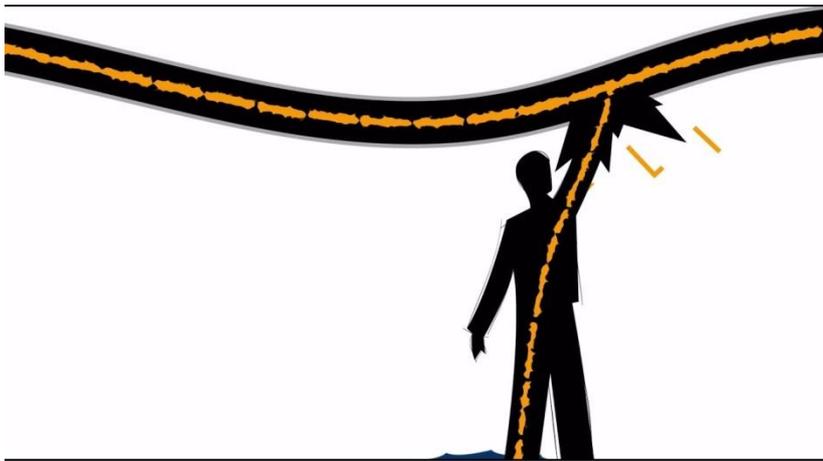
Protection des biens

- Assurer la **protection des biens**
 - Branchés sur le réseau (appareils électriques)
 - En lien avec le réseau (transformateurs, alternateurs, ...)



Protection des personnes

- En 2015, l'électricité serait responsable de:
 - 60 électrocutions
 - 3000 électrisations
 - 50000 départs d'incendie



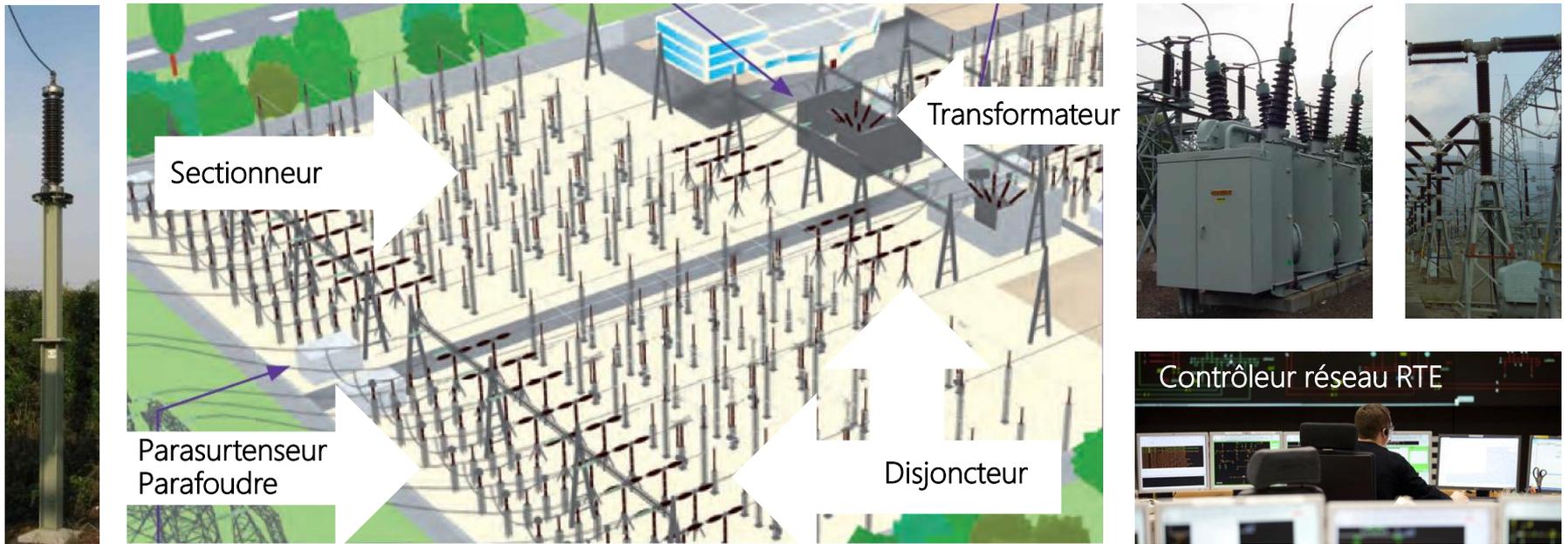
Protection

PROTECTION DES BIENS

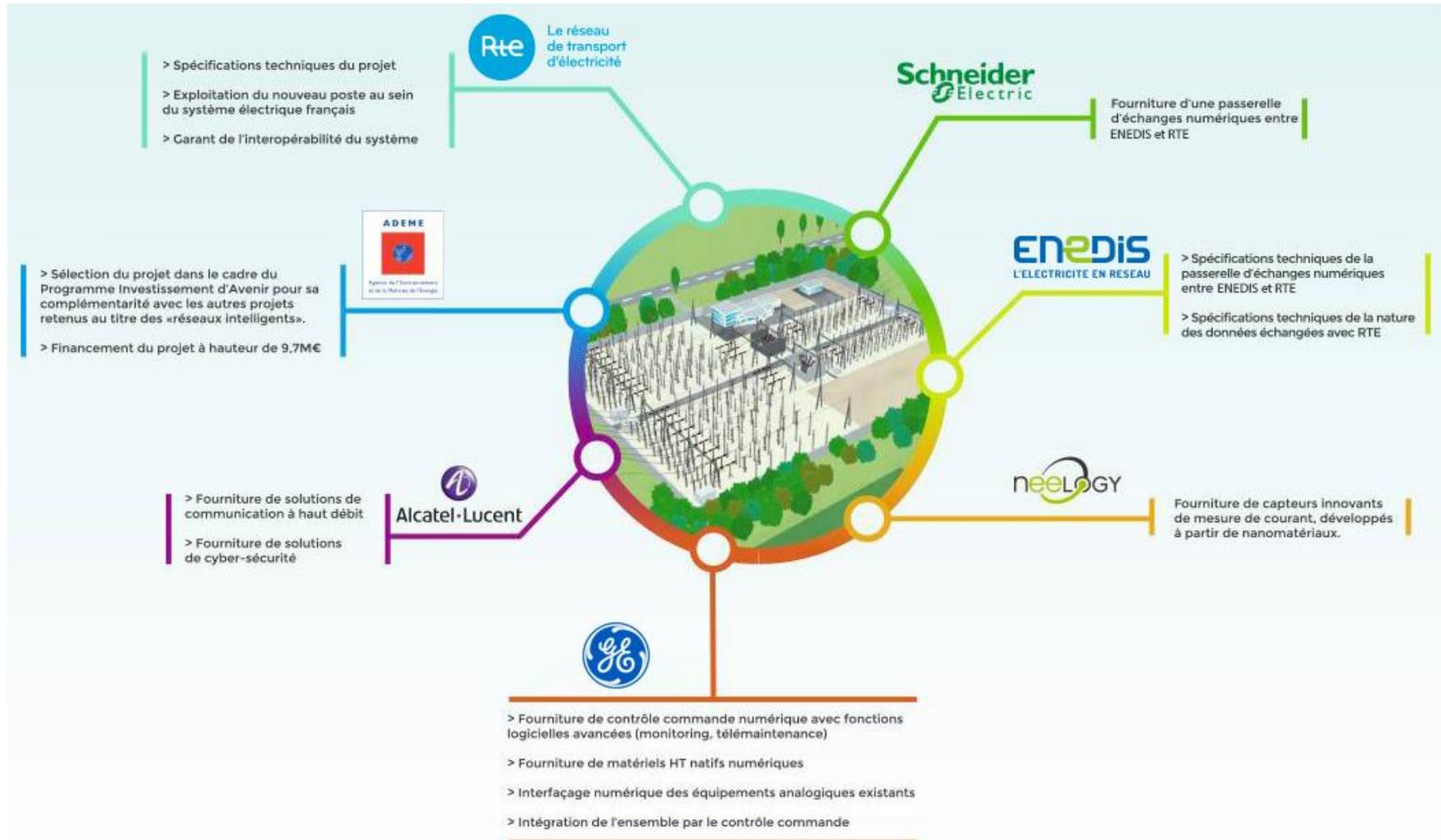
Appareillages de protection

- Disjoncteur
- Sectionneur
- Interrupteur
- Contacteur
- Fusible

Poste de transformation électrique

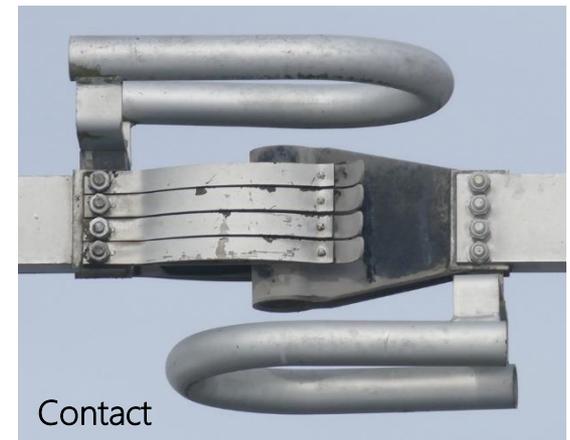
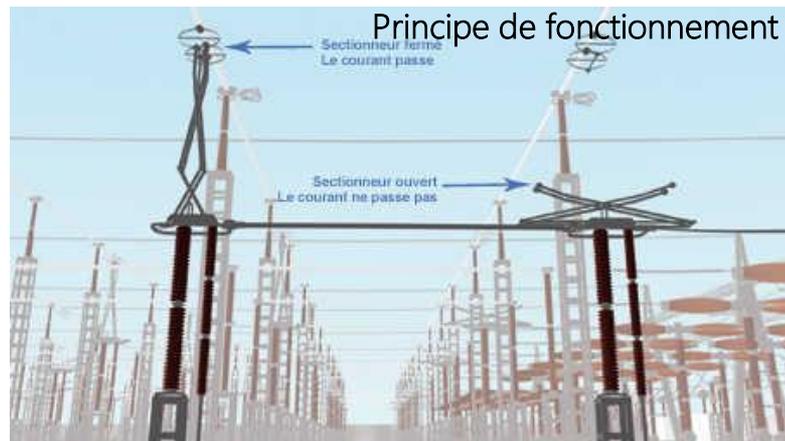


Poste de transformation électrique



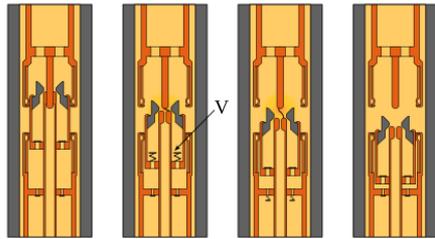
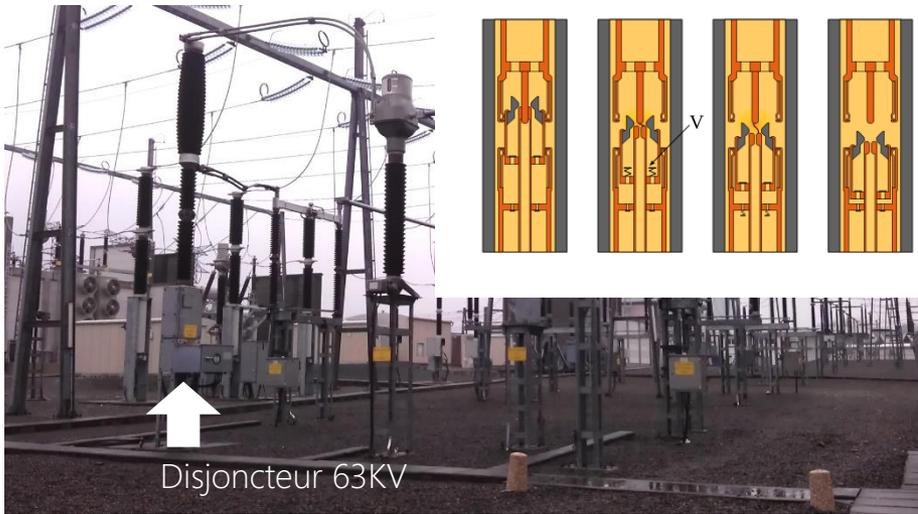
Sectionneur

- Appareillage d'aiguillage et de protection
 - **Routage de l'énergie** d'un réseau à un autre
 - Peut **isoler une partie du réseau** (mais pas le couper)



Disjoncteur

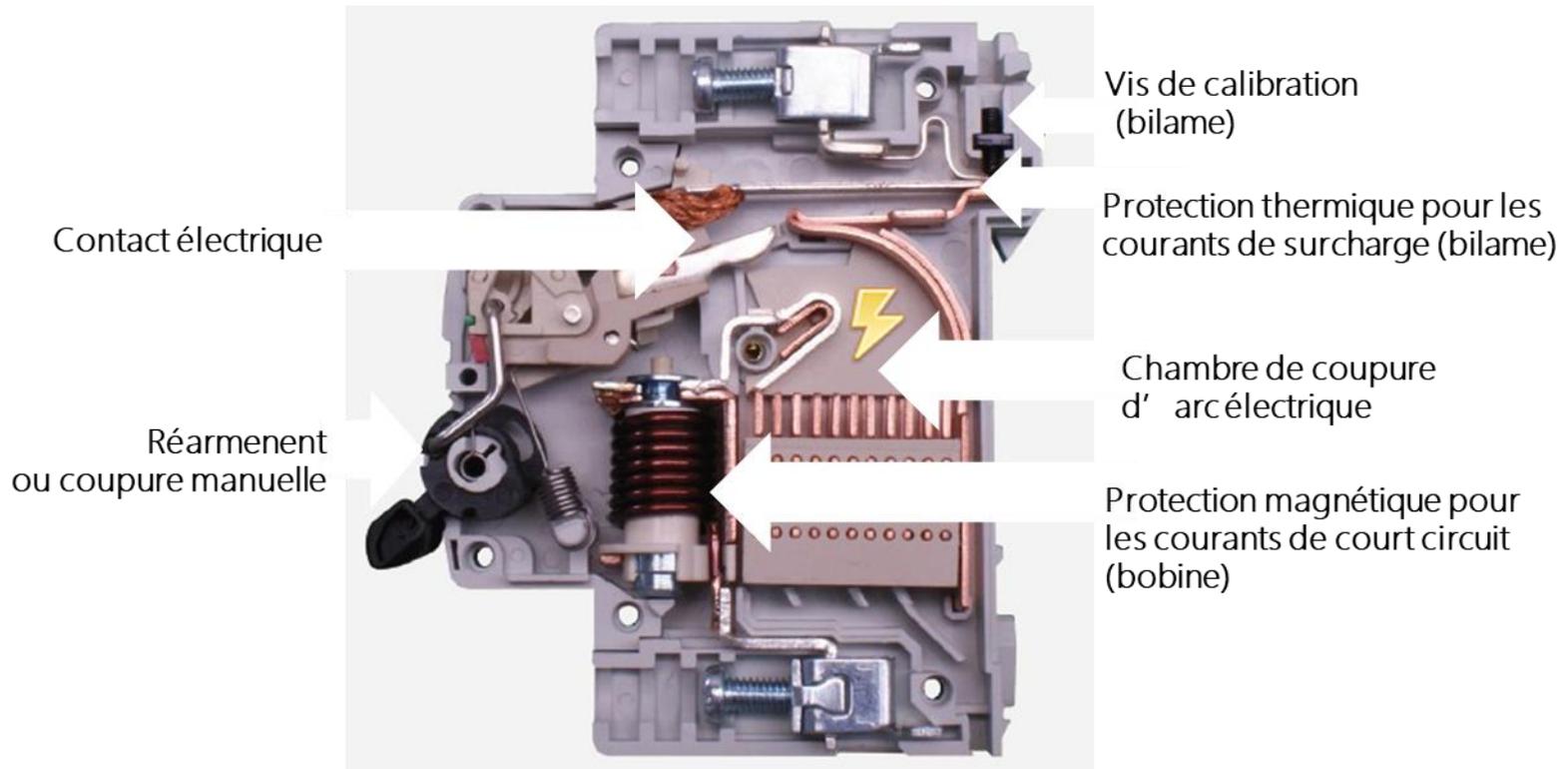
- Assure la protection contre les **surcharges** en tension et les **court-circuits**



Disjoncteur Legrand
230V 16A

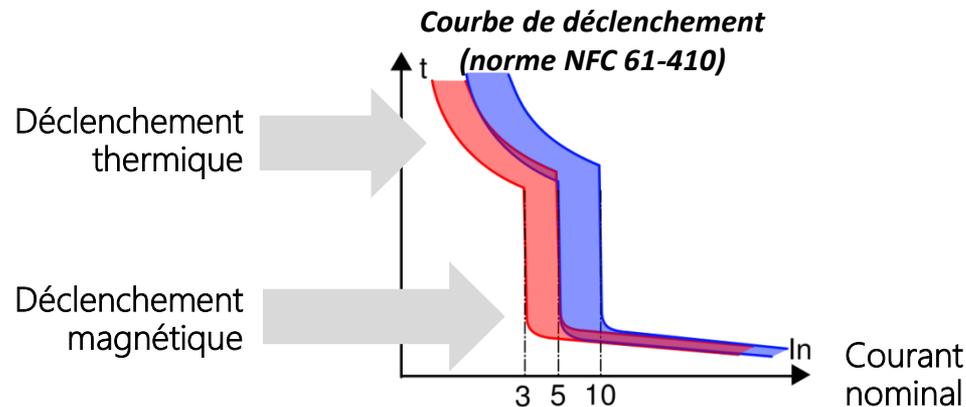


Disjoncteur domestique



Disjoncteur domestique

- Capable de protéger du:
 - Courant de surcharge par **déclenchement thermique**
 - Courant de court-circuit par **déclenchement magnétique**



Acteur du secteur

- Legrand: numéro 1 mondial pour les infrastructures électriques du bâtiment



Protection

PROTECTION DES PERSONNES

Danger électrique

| Intensité | Effets | Durée du contact |
|-----------|---|------------------|
| ~0,5–1mA | Seuil de perception | |
| ~8mA | Choc au toucher | |
| ~10mA | Contractions musculaires | ~4m30s |
| ~30mA | Paralysie ventriculaire | ~30s |
| ~40mA | Fibrillation ventriculaire | ~3s |
| ~75mA | Fibrillation ventriculaire | ~1s |
| ~300mA | Paralysie et fibrillation ventriculaire | ~110ms |

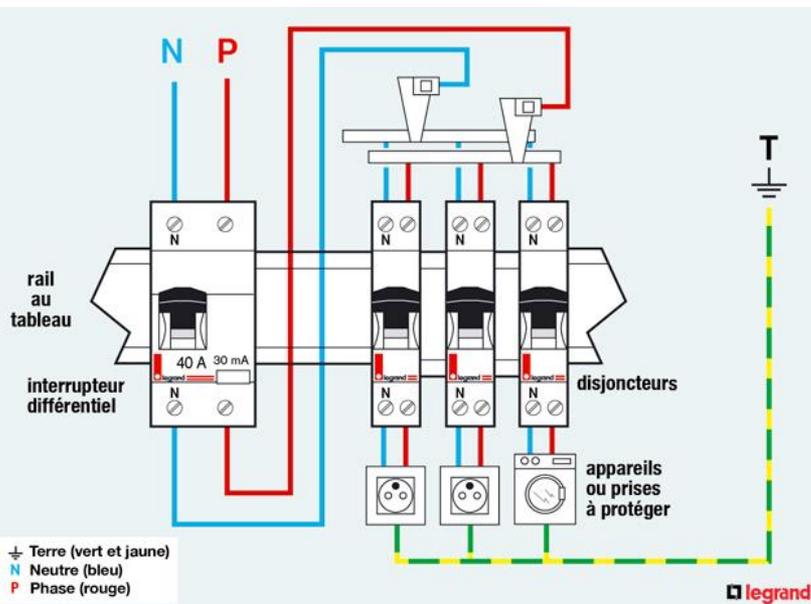
Facteurs aggravants:

- Epaisseur de la peau
- Humidité
- Surface et pression de contact

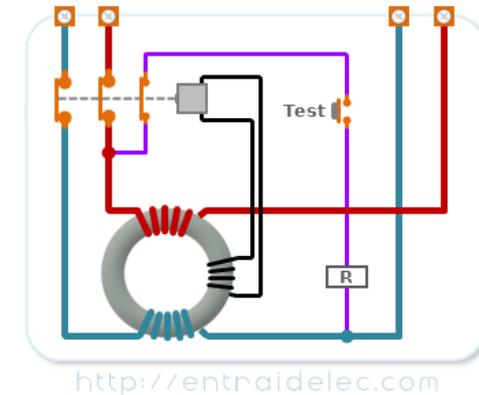
RM: le corps humain a une **résistance relative de l'ordre de 1kΩ**

Disjoncteur différentiel

- Rôle: assurer **une coupure** en cas de mesure d'une différence entre phase et neutre supérieure à 30 mA

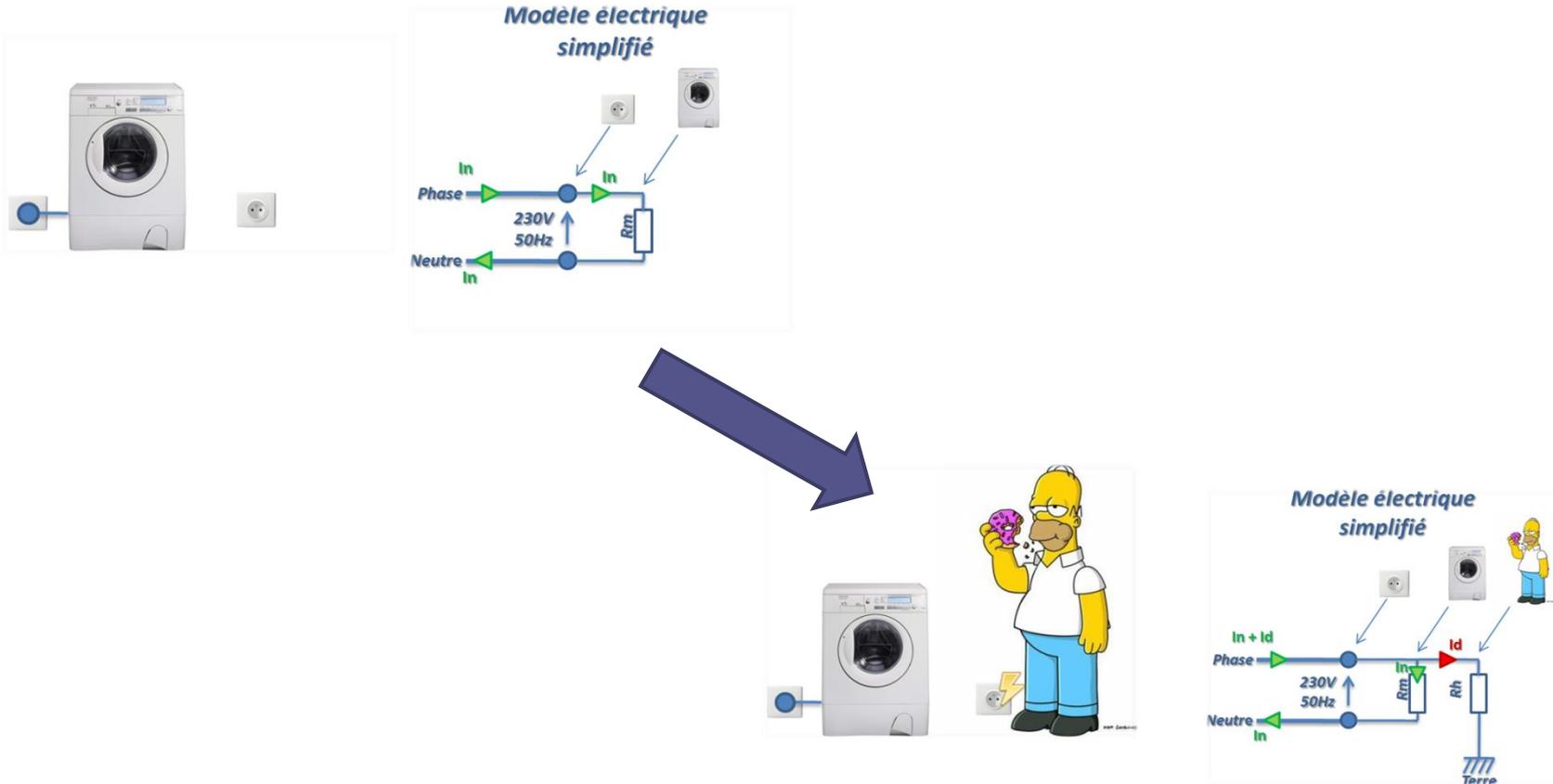


Disjoncteur Legrand 40A (surcharge) et différentiel 30mA



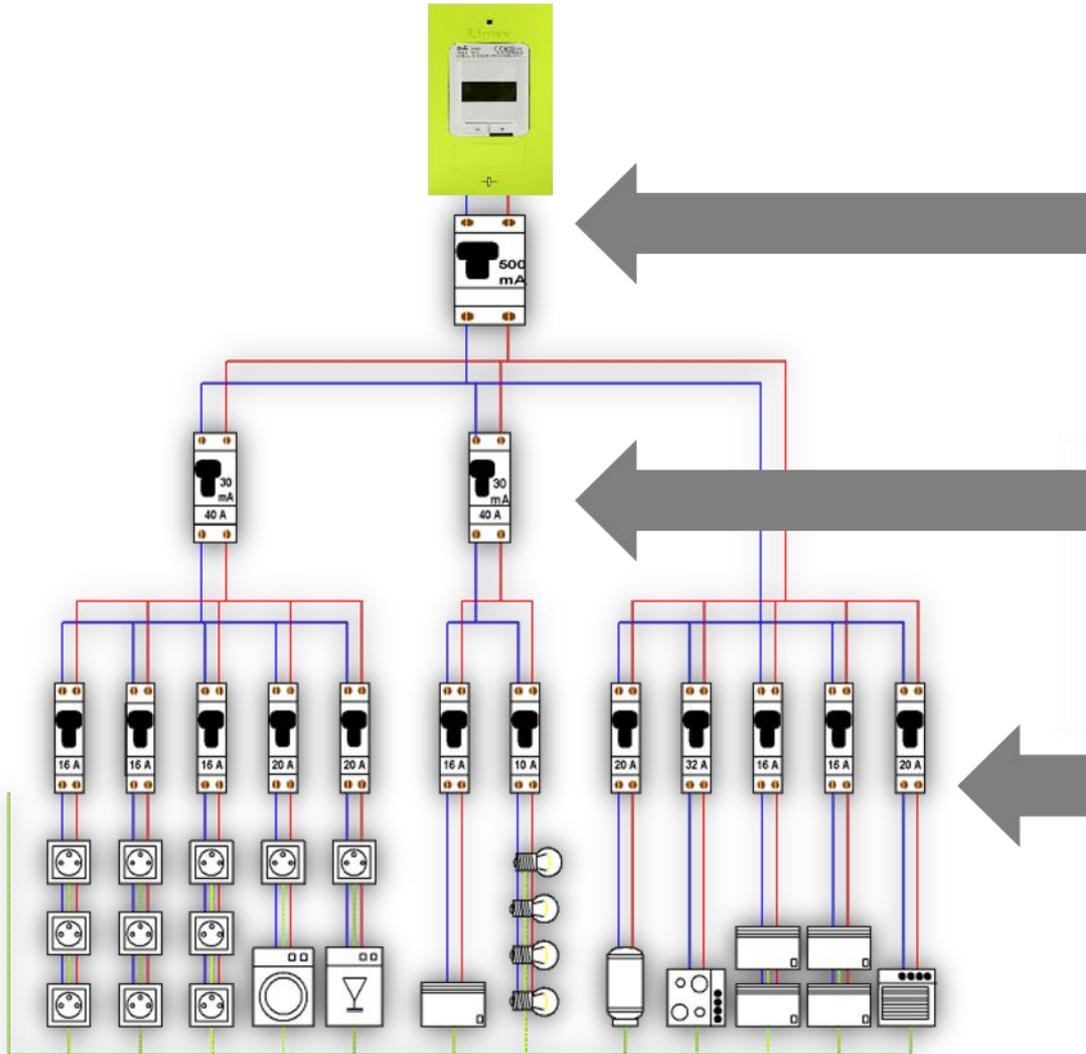
<http://entraidelec.com>

Disjoncteur différentiel



Le disjoncteur différentiel coupera le courant

Installation électrique domestique



Compteur général scellé et installé par Enedis. Exemple de Linky



Disjoncteur 40A et différentiel 30mA
(protection des biens et des personnes)



Disjoncteur 16A
(protection des biens)

Sur les lignes à haute tension

- Coupure du réseau, mise à la terre, respect des distances de sécurité
- Intervention au potentiel



Travail au potentiel. Exemple de robot Linescout de Hydro-québec en service (sous tension)



Coupure du réseau en amont et mise à la terre par sécurité (hors tension)



Distances de sécurité pour isolation durant la maintenance (sous tension)

[Intervention sur une ligne HT](#)

[Intervention sur une ligne HT](#)

Habilitation électrique

- Dans tout milieu professionnel, une personne intervenant sur des pièces nues sous tension (PNST) doivent être **habilités**

| | | Opération d'ordre électrique | | | | |
|--|----------|--|---|--|--|--|
| Opération d'ordre non électrique | | Exécutant | Chargé de travaux | Chargé de consignation | Chargé d'intervention | Chargé d'opérations |
|  | |  |  |  |  |  |
| Basse Tension | B0 | B1 - B1V | B2 - B2V B2V essais | BC | BS - BR | BE + attribut |
| Haute Tension | H0 - H0V | H1 - H1V | H2 - H2V H2V essais | HC | - | HE + attribut |

Habilitation électrique

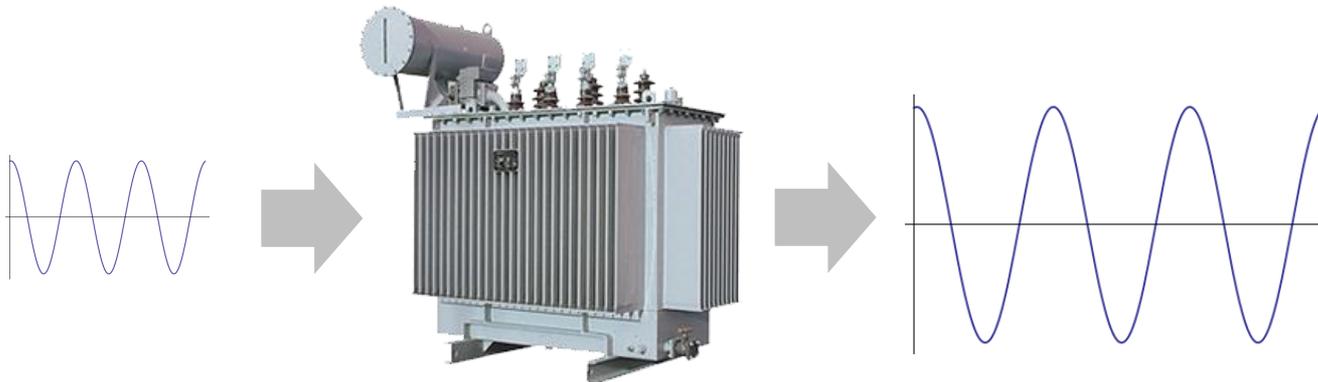
| Activité | Symbole |
|--|--|
| <p>Aucune opération d'ordre électrique n'est réalisée mais accès a des zones ou emplacements a risque spécifique électrique (accès réserve aux électriciens).</p> <p>Travailleurs : peintre, mâçon, serrurier, agent de nettoyage... ne réalisant pas de réarmement de disjoncteur, pas de remplacement de lampe, fusible...mais uniquement des travaux de peinture, maçonnerie...</p> | BOHO, HOV |
| <p>Intervention élémentaire sur des circuits terminaux (maxi 400 V et 32 A courant alternatif).Types d'opérations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - remplacement et raccordement de chauffe-eau, convecteurs, volets roulants..., - remplacement de fusibles BT, réarmement de protections,- remplacement à l'identique d'une lampe, d'un socle de prise de courant, d'un interrupteur,- raccordement (dominos...) en attente, - réarmement d'un dispositif de protection.Travailleurs : gardien d'immeuble, chauffagiste, plombier, peintre... | BS |
| <p>Manœuvre de matériel électrique pour réarmer un disjoncteur, relais thermique..., mettre hors ou sous tension un équipement, une installation.</p> <p>Travailleurs : informaticiens, gardien, personnel de production... réalisant uniquement ce type de manœuvre.</p> | BE manœuvre HE manœuvre |
| <p>Intervention générale d'entretien et de dépannage sur des circuits (maxi 1000 V et 63 A courant alternatif). Types d'opérations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - recherche de pannes, dysfonctionnements, - réalisation de mesures, essais, manœuvres, - remplacement de matériels défectueux (relais...), - mise en service partielle et temporaire d'une installation, - connexion et déconnexion en présence de tension (maxi 500 V en courant alternatif).Travailleurs : électricien confirme du service maintenance, dépanneur... | BR |
| <p>Travaux sur les ouvrages et installations électriques.Types d'opérations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - création, modification d'une installation, - remplacement d'un coffret, armoire, - balisage de la zone de travail et vérification de la bonne exécution des travaux (uniquement pour le charge de),- etc. | Exécutant B1, B1VH1, H1V Chargé de B2, B2VH2, H2V |
| <p>Consignation d'un ouvrage ou d'une installation électrique.</p> | BC, HC |
| <p>Autres opérations de type essais, vérifications, mesures, opérations sur installation photovoltaïque, batteries...</p> | Voir NC 18-510 |

Conversion de l'énergie électrique

TRANSFORMATEUR

Transformateur

- Une transformateur électrique
 - Réalise une **modification de l'amplitude** de la tension et du courant
 - Ne modifie pas la fréquence de ces grandeurs physiques
 - Est une opération de conversion **réversible**



| Tension primaire | NOMBRE DE TRANSFORMATEURS | PUISANCE NOMINALE (MVA) |
|------------------|---------------------------|-------------------------|
| 400 kV | 301 | 137 322 |
| 225 kV | 845 | 92 047 |
| 150 kV | 28 | 1 419 |
| 90 kV | 26 | 1 215 |
| 63 kV | 23 | 756 |
| TOTAL | 1 223 | 232 758 |

Transformateurs 400kV



Transformateur en assemblage
(noyau magnétique et enroulements)

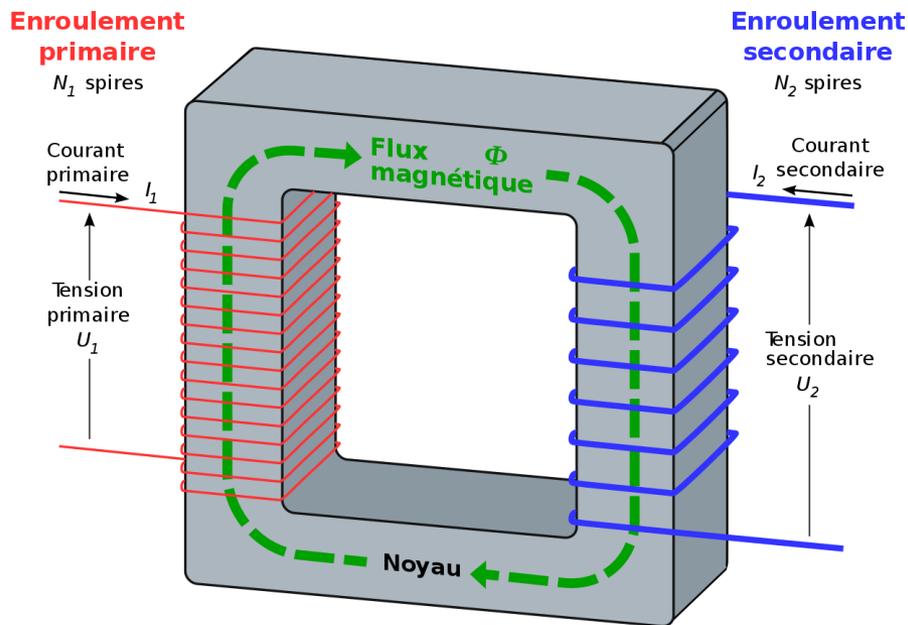


Transformateur en test



Transformateur en service

Principe de fonctionnement

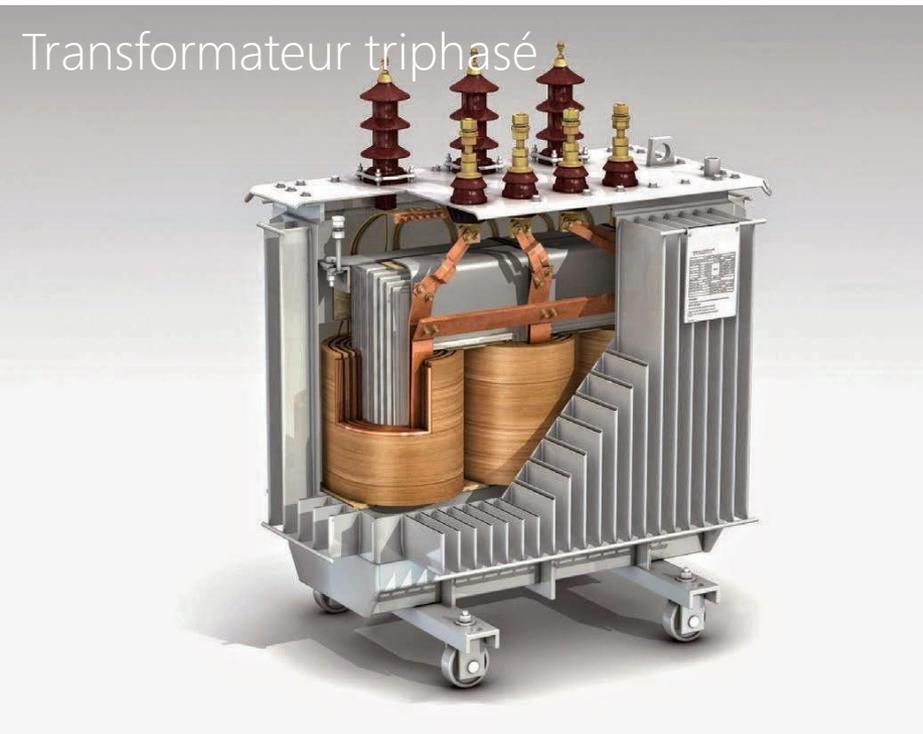


$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

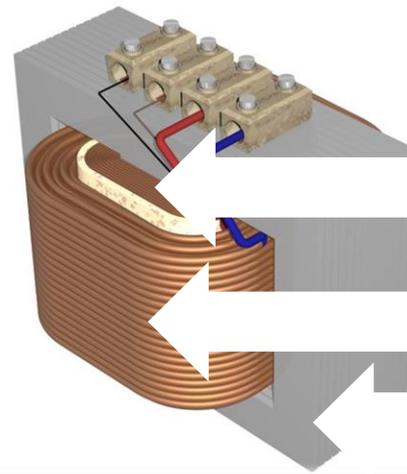
Transformateur monophasé idéal

Principe de fonctionnement

- Constituants d'un transformateur
 - **Noyau magnétique** (Fer-Silicium)
 - **2 enroulements** en cuivre par phase
 - Permet le transfert d'énergie **sans stockage**



Transformateur monophasé



Bornier

Bobine
basse tension

Bobine
haute tension

Noyau magnétique
(isolation Galvanique)

Conversion de l'énergie électrique

MACHINES ELECTRIQUES

Machines électriques

- Machine pouvant à la fois être utilisée comme
 - Alternateur/Générateur
 - Moteur
- Pour les technologies utilisées dans ce contexte, deux solutions se détachent
 - **Machines synchrones**
 - **Machines asynchrones**

Rotor

Stator



Machine synchrone



Machine asynchrone

Machines synchrones

- A aimants
 - Très présentes dans les solutions de production d'électricité où le poids est critique (transport)
- A rotor bobiné
 - Production électrique



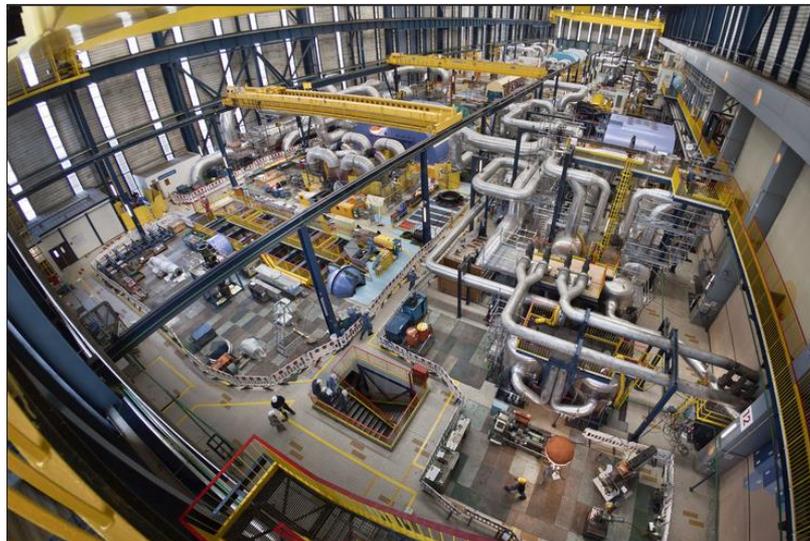
Machines synchrones

- **Alstom: leader mondial**
 - **Savoir faire dans la fabrication**
 - *Des trains à grande vitesse*
 - *Des trains pendulaires*
 - *Des trains de banlieue et trains régionaux*
 - *Tramways*



Machines asynchrones

- Pas de lien entre la vitesse de rotation du moteur et la vitesse de rotation du champs magnétique
- Très utilisés dans l'industrie
 - **Moins chers et moins volumineux** qu'un MS équivalente en puissance
 - Plus simples à entretenir
 - Utilisation très versatile
 - Variation de vitesse simple à mettre en œuvre



Machines électriques tournantes

- Dans la grande majorité des cas, ces machines sont utilisées en fonctionnement moteur



Machines électriques tournantes



Machines électriques tournantes

- Ces machines sont aussi génératrices d'électricité
 - En transport, on passe en génération d'électricité lors des moments de **freinage** et **de roue libre**
 - Problèmes de récupération de cette énergie → le **stockage est complexe** à réaliser et nécessité de lourdes infrastructures
 - Energie généralement dissipée

Machines électriques tournantes

- De nouveaux projets tendent à **lutter contre cette perte d'énergie**
 - Tramway T1 à Paris
 - Ligne Victoria à Londres
 - ...



Machines électriques tournantes

- Sur des solutions de transports comme la voiture, il est possible de **conserver une partie de l'énergie produite par le freinage**
 - Source d'énergie discontinue
 - Nécessité de stockage

MÉCANISME, DIAGRAMME CONCEPTUEL



Zoé Renault
MS aimants



Machines électriques tournantes

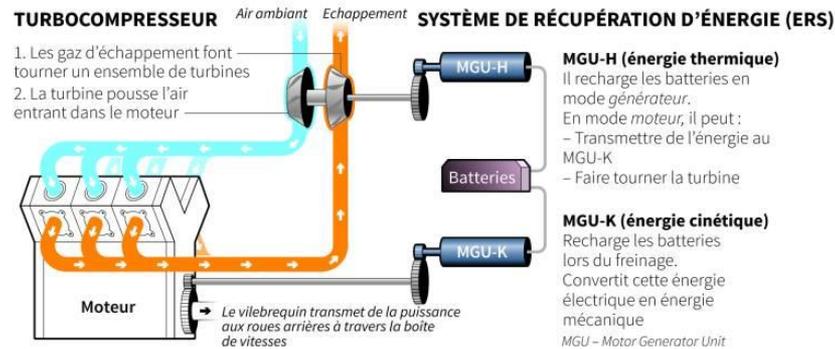
- En F1



Machines électriques tournantes

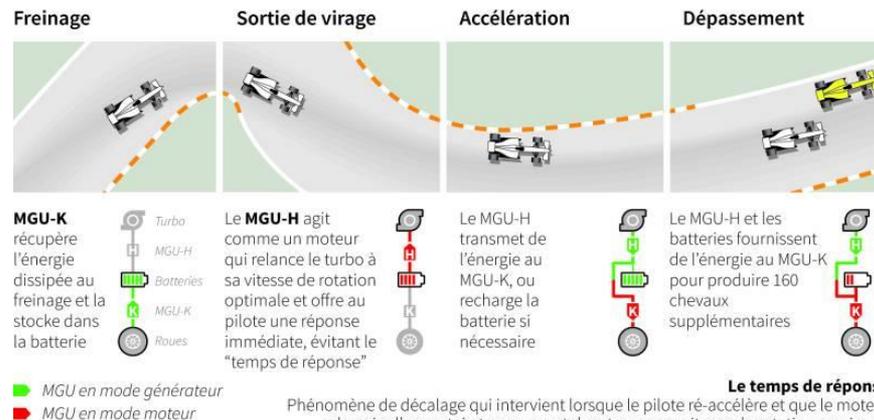
Les nouveaux systèmes de récupération d'énergie en F1

Le règlement technique impose cette année aux écuries de remplacer les traditionnels moteurs V8 2,4 litres par des V6 1,6 litre. Leur puissance sera comparable, avec la présence d'un turbocompresseur, et grâce à l'introduction du nouveau système de récupération d'énergie qui améliorera l'efficacité énergétique pendant les courses.



LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE

Un système sophistiqué de gestion de l'énergie qui équilibre carburant et consommation des batteries pendant une course.



Conversion de l'énergie électrique

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Electronique de puissance

- Domaine récent de l'ingénierie (~1950)
 - Apparition avec **le transistor** (Bardeen, Shockley, Brattain – Prix Nobel 1956)
 - Transistor = interrupteur statique (non mécanique)
- Eléments d'électronique de puissance
 - **Transistor**: interrupteur électronique commandé à l'ouverture et fermeture mais non réversible en courant
 - **Diode**: interrupteur électronique non commandé et non réversible en courant
 - **Thyristor**: interrupteur électronique non réversible en courant commandé à l'ouverture seulement

Electronique de puissance

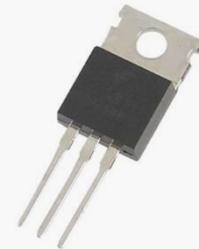
Technologies



Thyristor GTO
4500V - 3000A - ~1KHz

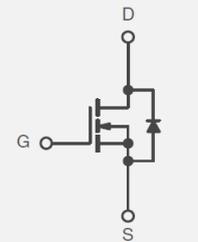
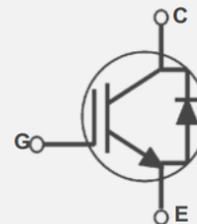
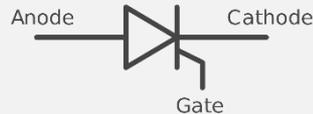


Transistor IGBT
600V - 150A - 25KHz



Transistor MOSFET
100V - 10A - 1MHz

Symboles

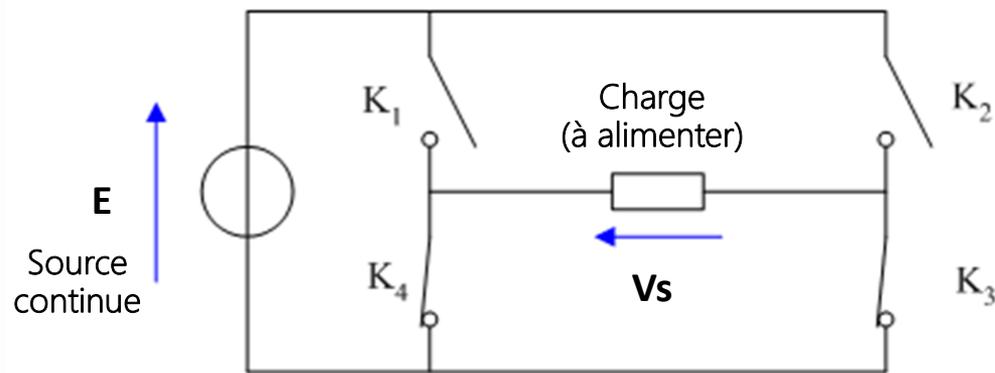


N-Channel MOSFET

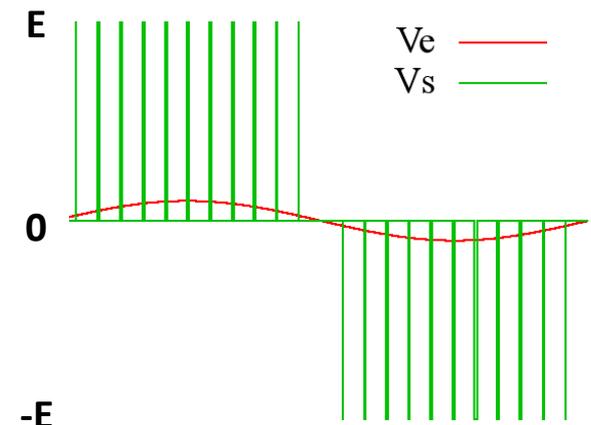
Diode pour
réversibilité en
courant

Application

- Hacheur 4 quadrants ou pont en H

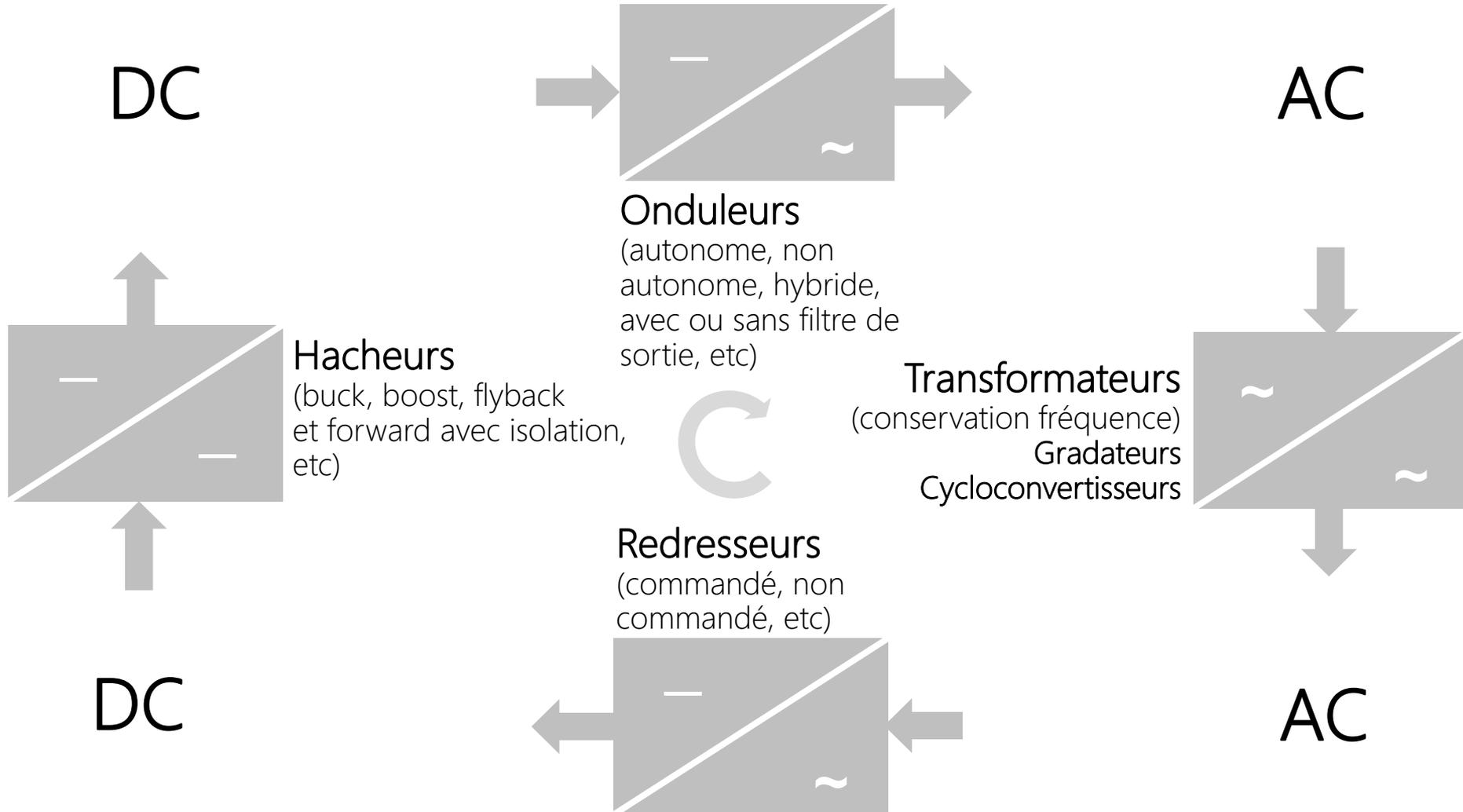


K_1 , K_2 , K_3 et K_4 sont les interrupteurs statiques ou cellules de commutation



Application onduleur
(V_e - après filtrage analogique L/C des harmoniques hautes fréquences)

Application



Conversion

- Dans la très grande majorité des cas, les appareillages électroniques nécessitera **une étape de conversion** en courant continu basse tension (<12V)



Stockage de l'énergie électrique

Enjeux

- Le stockage de l'énergie a de fortes probabilités d'être **un enjeu technologique majeur** pour les prochaines années
 - Ressources fossiles se raréfient
 - Emergence des énergies non renouvelables
 - Nécessité de garantir la stabilité et la continuité de la distribution électrique

- Différentes technologies de stockage

- **Energie mécanique**

- STEP: station de transfert d'énergie par pompage
- Volant inertiel
- CAES: Compressed Air Energy Storage

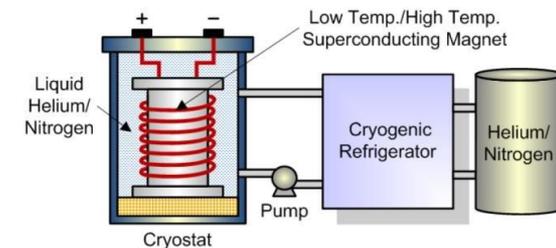
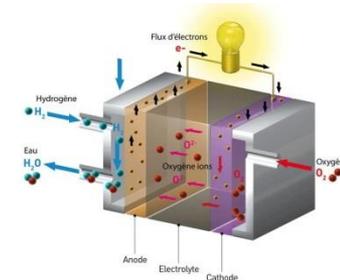
- **Energie électrochimique et électrostatique**

- Batterie
- Supercondensateur

- **Energie chimique**

- Pile à combustible
- P2G: Power to Gas

- **Supraconductivité:** Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)



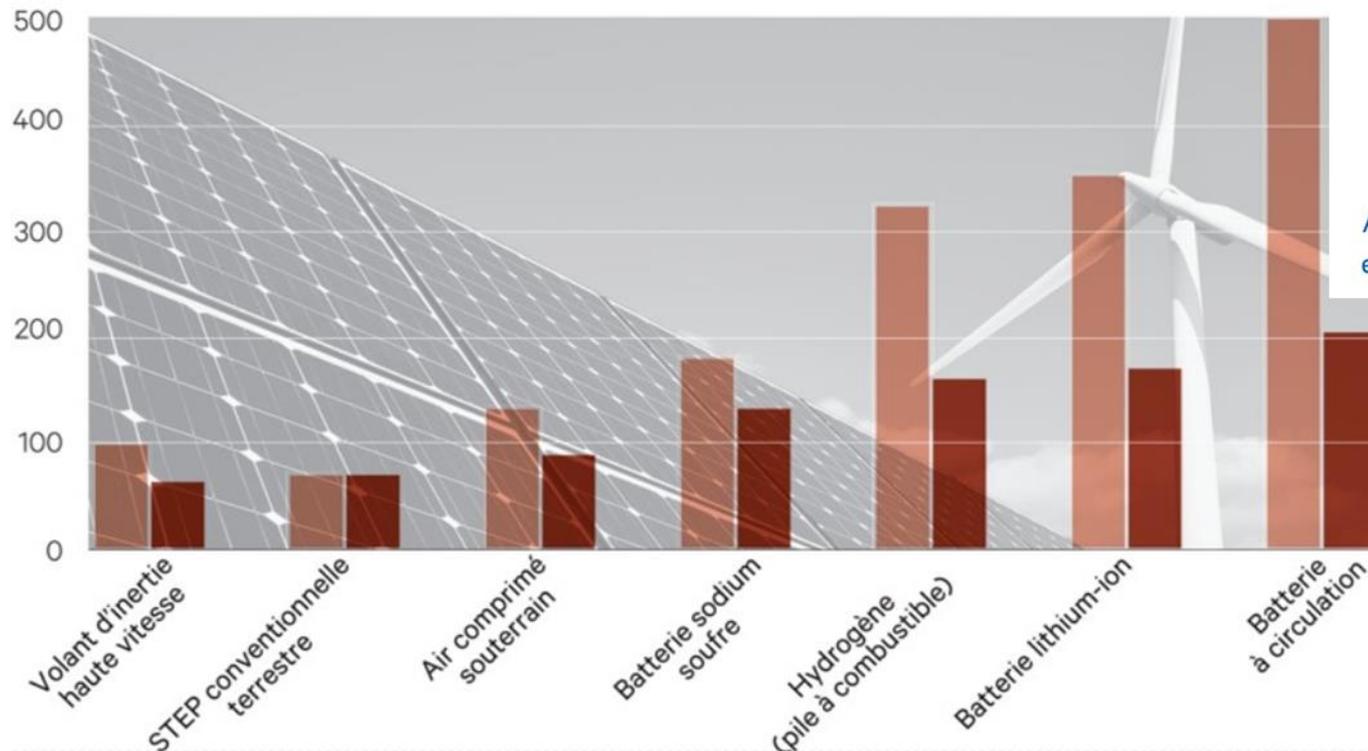
Coûts

Le coût des technologies de stockage d'électricité

En euros par MWh

2013

2030



ADEME

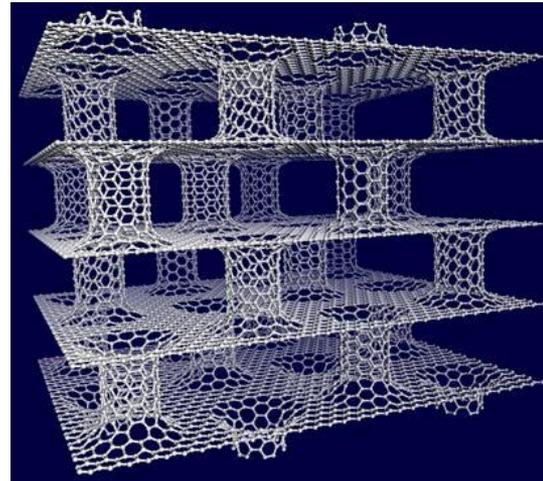
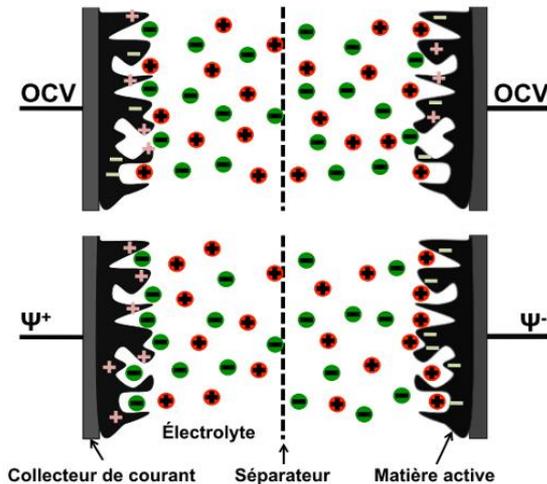


Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie

- Actuellement, il est moins coûteux de produire que de stocker

Supercondensateurs

- Technologie offrant de **bonnes performances** en terme de disponibilité d'énergie avec un temps de charge rapide et une bonne durabilité

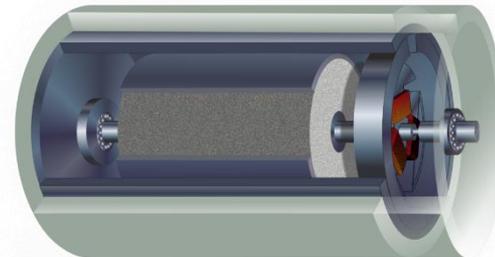


Volant inertiel

- Stockage d'énergie sous forme **d'énergie cinétique en rotation**
 - Stockage: machine tournante en fonctionnement moteur convertit **l'énergie électrique en énergie cinétique**
 - Stationnaire: vitesse de rotation constante et **faible consommation électrique**
 - Restitution: la machine tournante devient génératrice et transforme **l'énergie cinétique en électricité**
- Applications actuelles: panneaux photovoltaïques



 **energiestro**

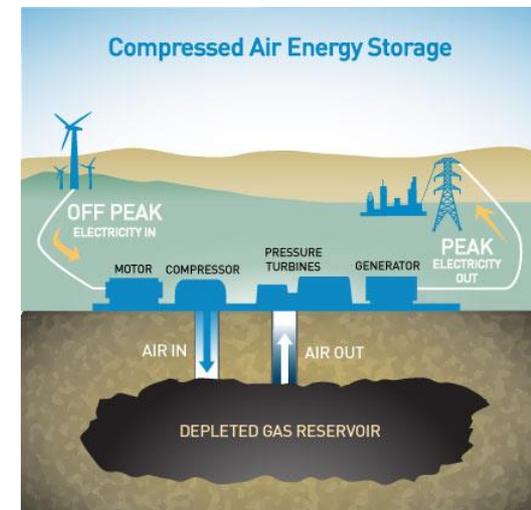


Compressed Air Energy Storage

- **Principe: l'énergie à emmagasiner est stockée par compression de l'air**
 - Stockage: on comprime de l'air dans des cavités souterraines
 - Restitution: détente de l'air faisant tourner un turbo-alternateur

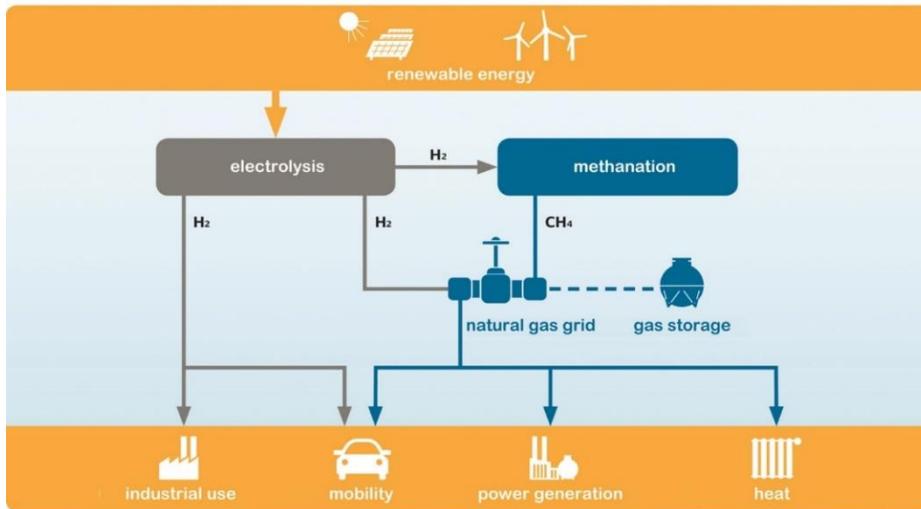
Huntorf

2 cavités de 150 000m³
650-800m profondeur
45-70 bar
290MW (durant 2-3h)
Rendement 40-50%



Power to Gas

- Principe: **transformer de l'électricité en hydrogène** par électrolyse de l'eau



Audi, Allemagne
6MW

Utilisation de l'énergie électrique

Sources de consommation

