



## ENSICAEN

3<sup>ième</sup> année (BAC+5)

MAJEURE GENIE NUCLEAIRE ET ENERGETIQUE  
MAJEURE ENERGIE MATERIAUX STRUCTURAUX



## SciencesPo Rennes Antenne de Caen

5<sup>ième</sup> année (BAC+5)

CONCERTATION ET TERRITOIRES EN TRANSITIONS



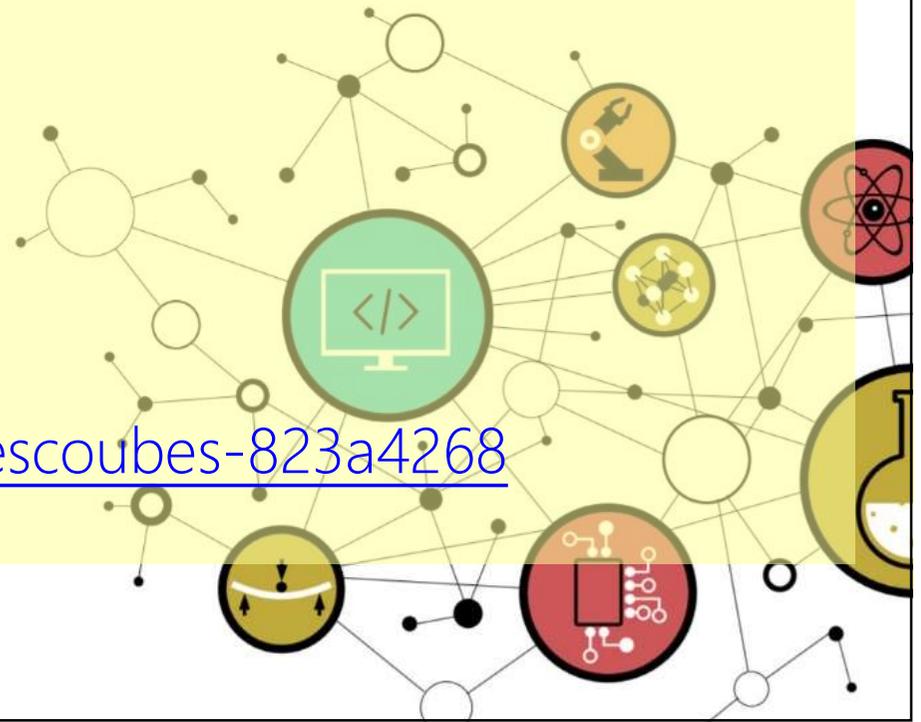
hugo descoubes

Professeur agrégé de classe Normale  
Responsable des enseignements  
de Systèmes Embarqués à l' ENSICAEN  
[hugo.descoubes@ensicaen.fr](mailto:hugo.descoubes@ensicaen.fr)

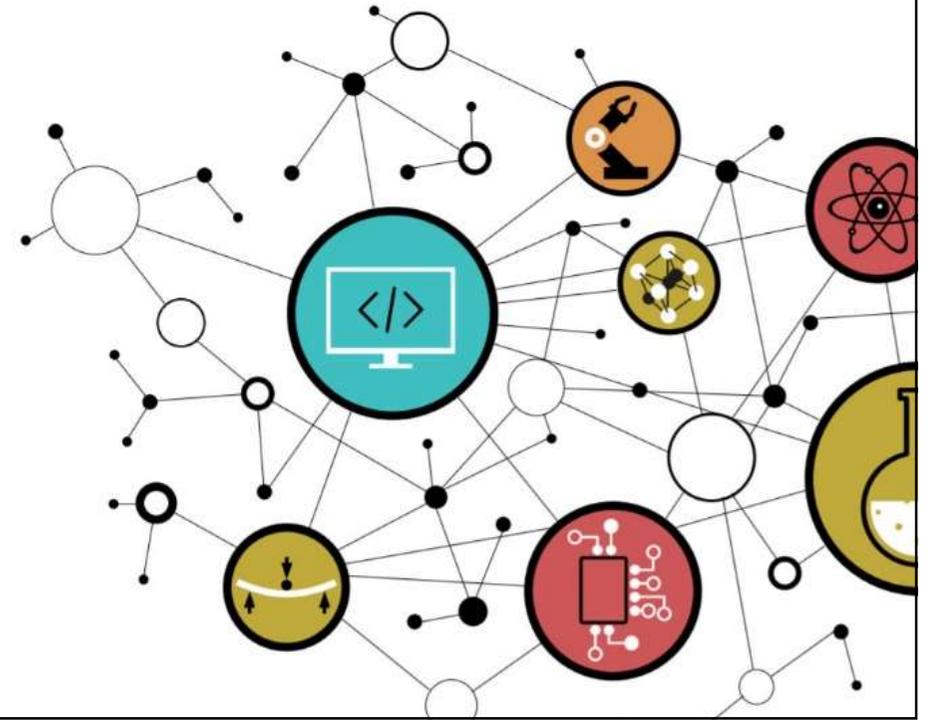
+33(0)2 31 45 27 61



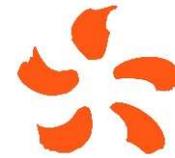
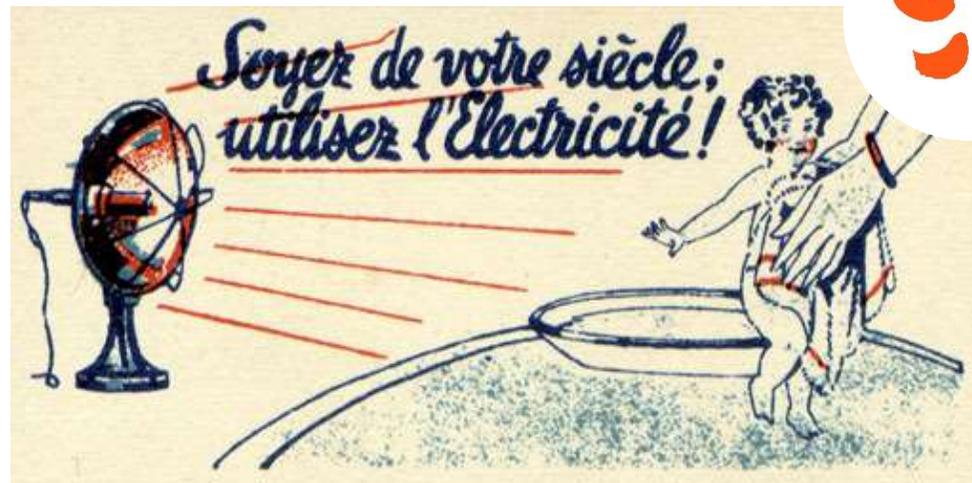
<https://fr.linkedin.com/in/hugo-descoubes-823a4268>



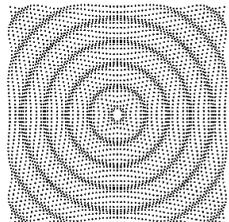
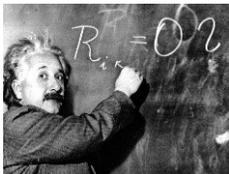
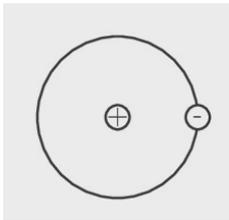
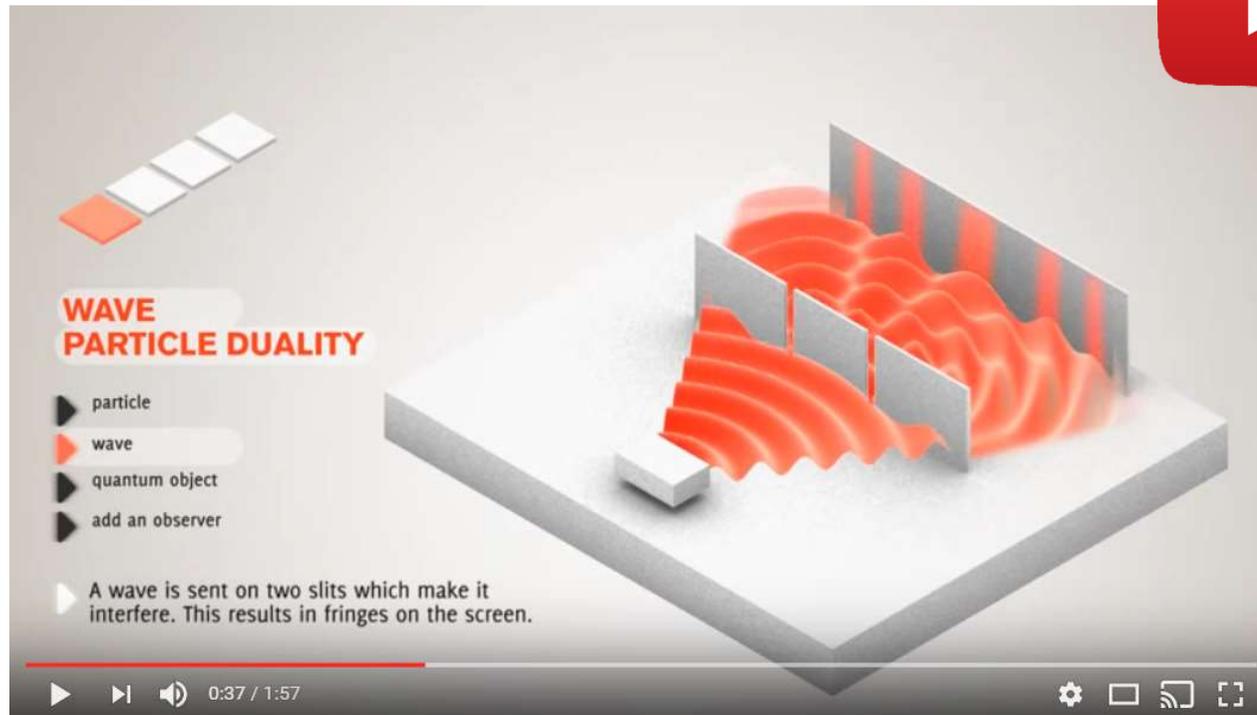
# INTRODUCTION



Les domestications par l'homme du feu puis de l'eau remontent maintenant à des temps lointains, de ce que l'on en sait de nos jours, ~400 000 ans pour le feu et ~14000 ans pour l'eau avec l'agriculture. Le mot électricité n'apparaît qu'en 1600 en occident. L'électron quant à lui n'a été découvert qu'en 1897 par Joseph John Thomson



## L'électron, mise en avant de la dualité onde-particule ou onde-corpusculaire

**WAVE PARTICLE DUALITY**

- ▶ particle
- ▶ wave
- ▶ quantum object
- ▶ add an observer

▶ A wave is sent on two slits which make it interfere. This results in fringes on the screen.

0:37 / 1:57





Tension ?

Courant ?

Energie ?

Puissance ?

Résistance ?

L'objectif de cet enseignement introductif est de comprendre le cheminement de l'énergie électrique, de la production à l'utilisation. Cet enseignement à une vocation opérationnelle et doit permettre à l'étudiant de comprendre les problématiques de futurs partenaires du domaine dans un cadre professionnel

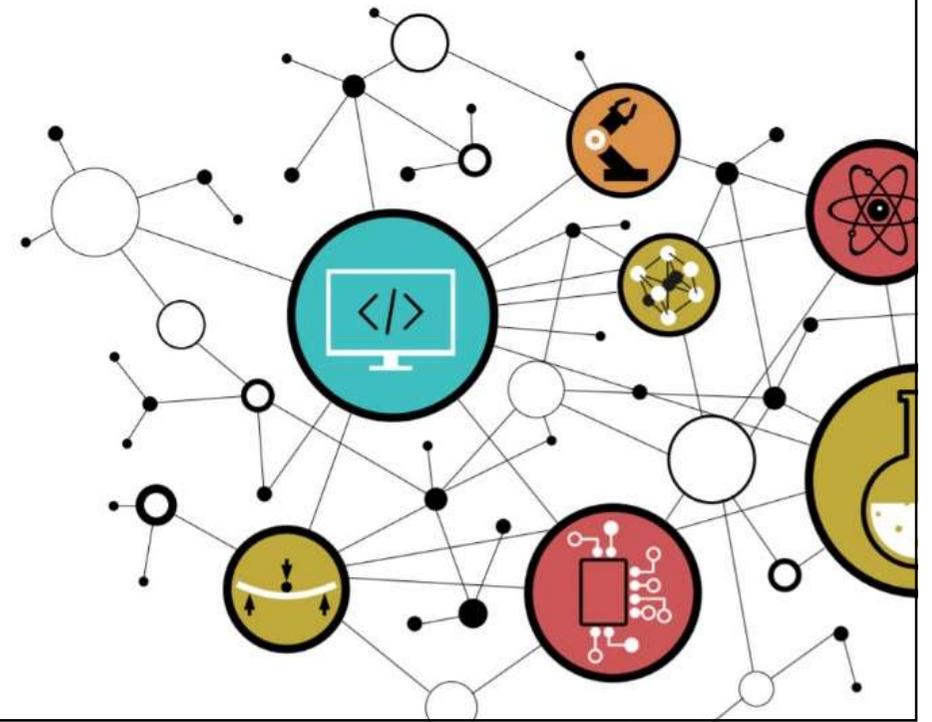
*Production* ➔ *Transport* ➔ *Protection* ➔ *Conversion* ➔ *Stockage* ➔ *Utilisation*

Nous nous efforcerons d'assimiler au mieux les architectures et rôles des principales infrastructures présentes sur le réseau et souvent visibles de tous. De même, nous nous intéresserons aux rôles des principaux acteurs du domaine, notamment Français

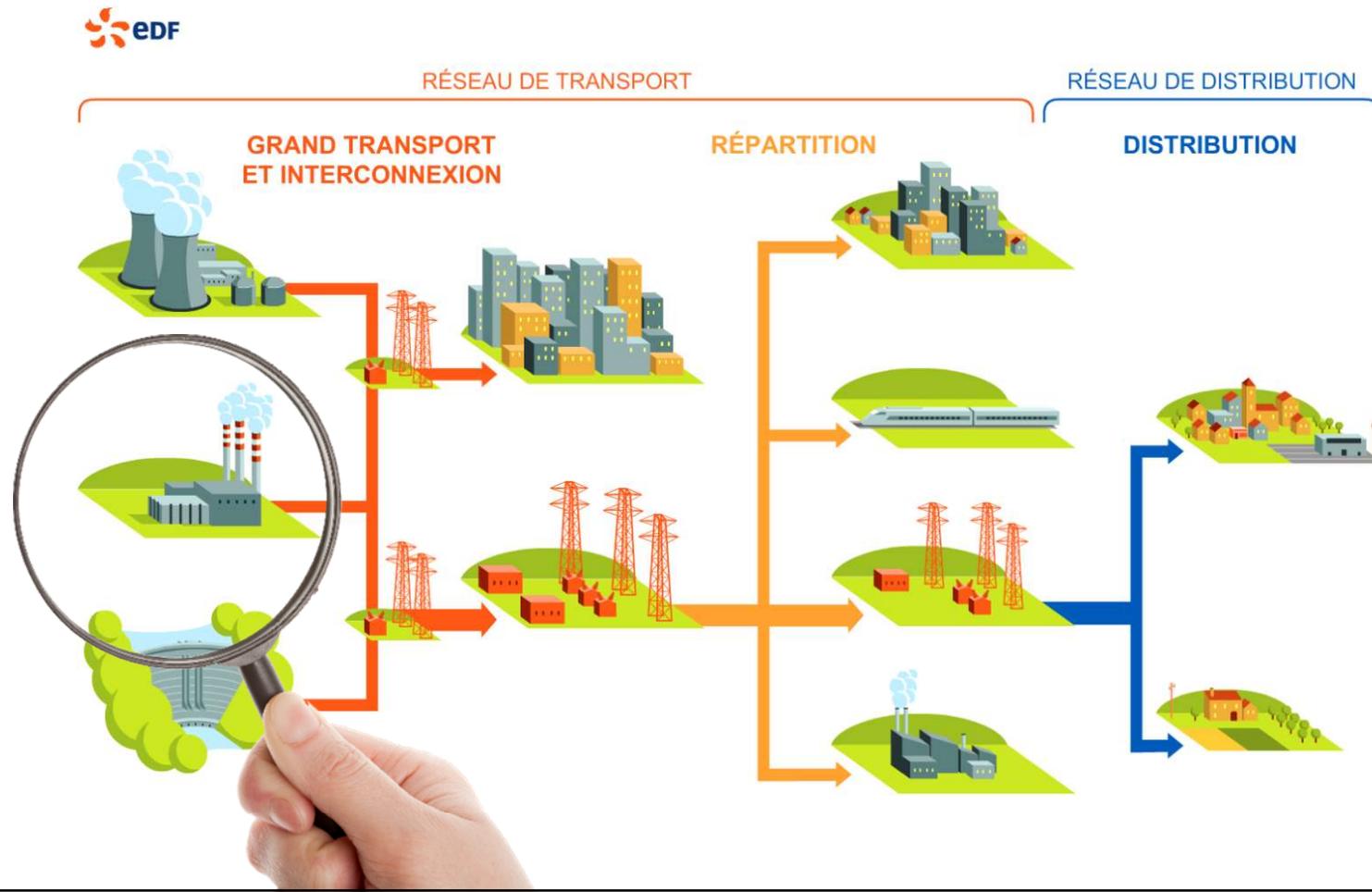
L'Electrotechnique ou génie électrique rassemble les grands domaines traitant l'électricité en tant qu'énergie. A titre indicatif, l'Electronique quant à elle, traite la mise en forme et la gestion des signaux électriques en tant qu'information



# PRODUCTION



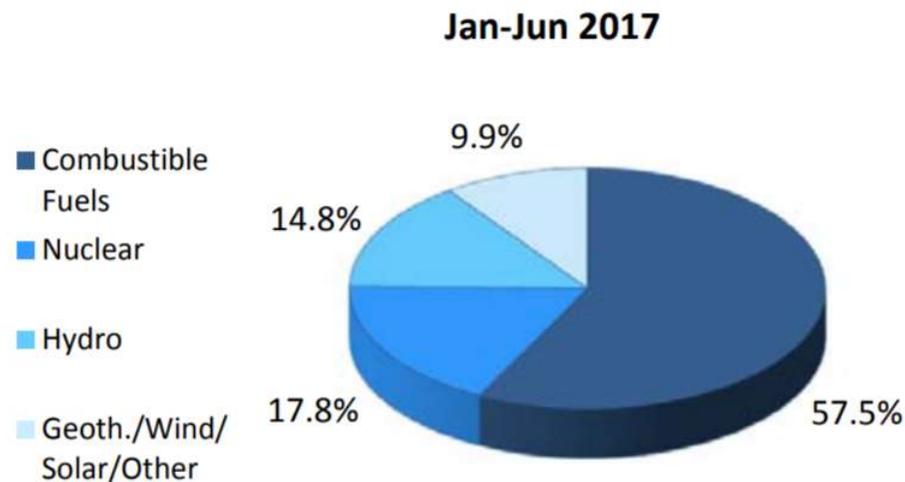
La production électrique est un secteur industriel visant à assurer un service d'approvisionnement d'énergie électrique le plus régulier, stable et sécurisé possible



Observons les principaux observatoires de l'énergie électrique en France et à l'international. Les observatoires de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont le plus souvent des observatoires régionaux. Des organismes sont ensuite chargés de collecter, centraliser puis diffuser ces informations (bilans, indicateurs, tendances, etc). Emergence dans les années 80 et élargissement depuis le 3<sup>ième</sup> sommet de la Terre à Rio en 1992

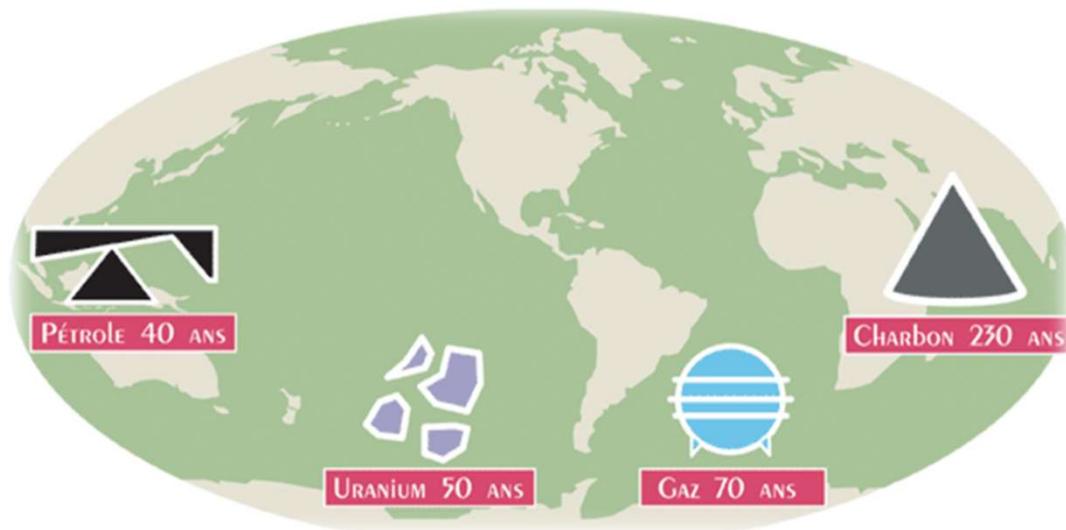


En 2017, la production Electrique mondiale répartie par combustible était la suivante. A titre indicatif, elle représente près de 10000TWh par année. Hormis la France (politique pro-nucléaire), ce découpage représente approximativement les grandes sources primaires utilisées pour la production électrique dans la majorité des pays du monde (source OECD/IEA)

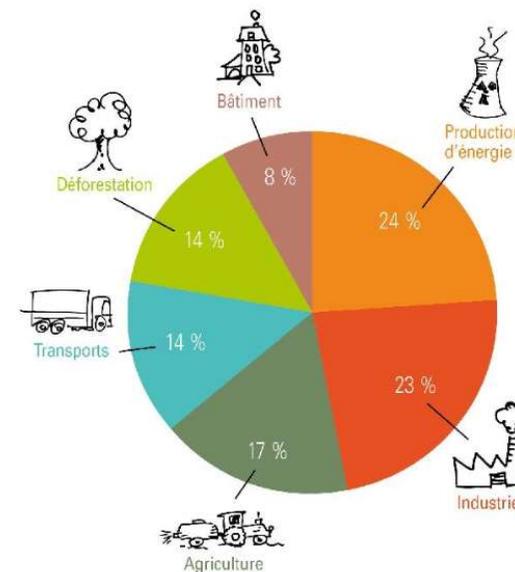


Total = 5 171.7 TWh

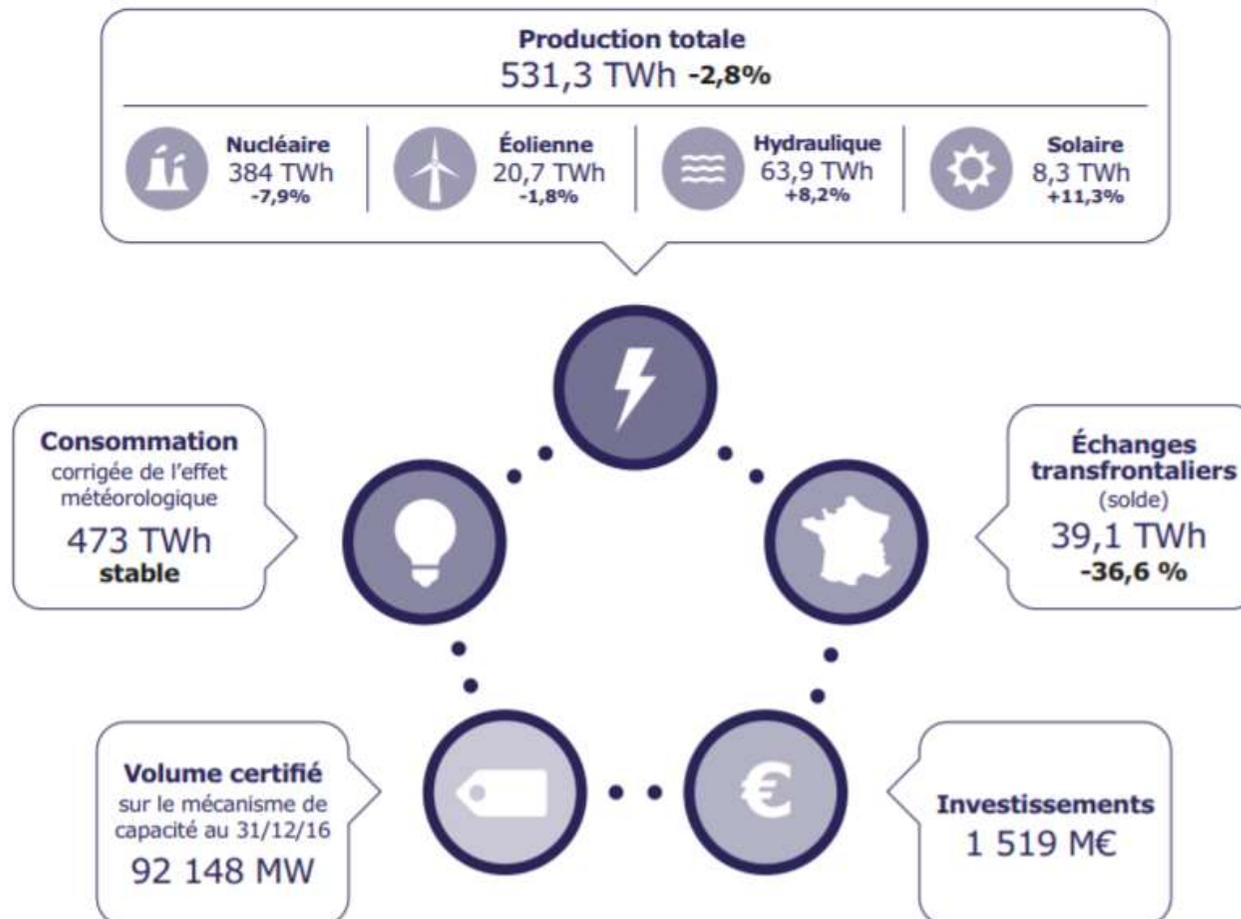
La production d'énergie électrique est basée sur l'exploitation de ressources *non-renouvelables* et *renouvelables* (inépuisables à l'échelle du temps humain), dont certaines sont nommées énergies propres ou vertes (appellation subjective). Actuellement, la plus grande partie de la production mondiale est basée sur l'exploitation de ressources non-renouvelables et donc l'appauvrissement jusqu'à épuisement des ressources primaires de la planète



ÉMISSIONS DES GES PAR SECTEUR AU NIVEAU MONDIAL.



La France à elle seule produit environ 530TWh en 2016 pour une consommation métropolitaine d'environ 473TWh. Différence essentiellement liée aux échanges commerciaux (source RTE)



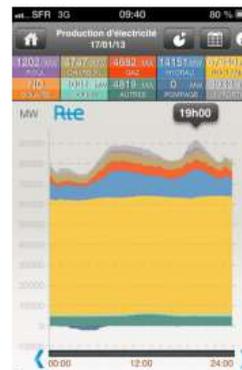
Détaillons les précédents chiffres

$$530TWh = 8760h \text{ (par année)} \times 60,5GW \text{ (puissance instantanée)}$$

Pour information, RTE (Réseau de Transport d'Electricité) propose une application mobile et PC permettant d'observer la production et la consommation en temps réel d'énergie électrique en France



CONSOMMATION  
(PRÉVISION  
ET RÉALISATION)



PRODUCTION  
PAR FILIÈRE



ACCESSIBLE  
SUR INTERNET ET  
SUR SMARTPHONES

En 2017, EDF (Electricité De France) est le premier électricien en France et dans le monde (Actionnaire principal, Etat Français ~85%). Malgré les très nombreuses polémiques autour du nucléaire (néanmoins justifiées), 95% de la production d'électricité Française ne génère aucune émission de gaz à effet de serre. En France, la fourniture d'énergie électrique relève des services publiques, cela implique de garantir continuité, sécurité, adaptabilité et égalité des traitements

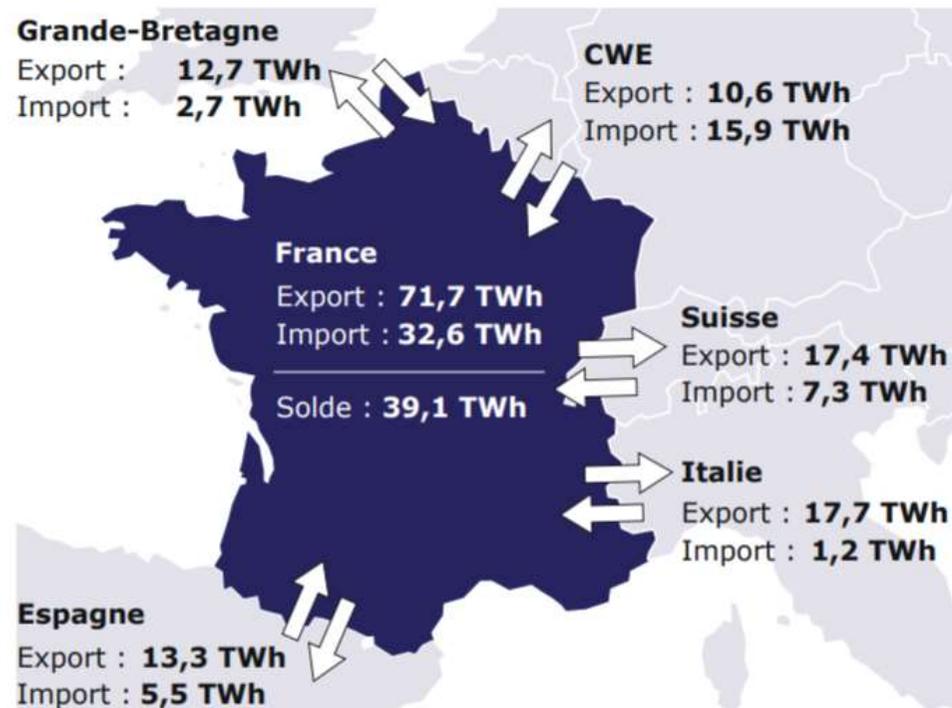


En 2016, la France est plus largement exportatrice qu'importatrice d'énergie électrique. Principalement Angleterre, Belgique, Suisse, Italie et Espagne. Ce n'était pas le cas il y a 40 ans. En France, près de 75-80% de l'énergie produite vient du nucléaire (source RTE)



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

### Bilan des échanges contractuels en 2016



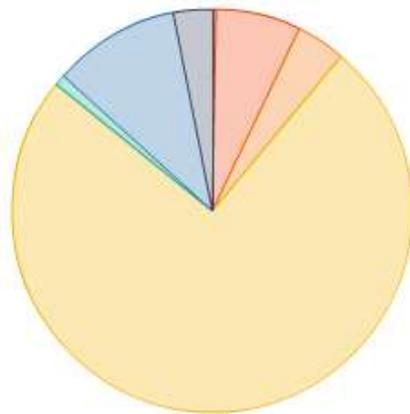
Observons le parc Français d'EDF en 2016

- 19 centrales nucléaires (58 tranches nucléaires)
- 29 centrales thermiques à flamme (pétrole, charbon, fioul)
- 10 centrales au gaz naturel
- 570 centrales hydrauliques

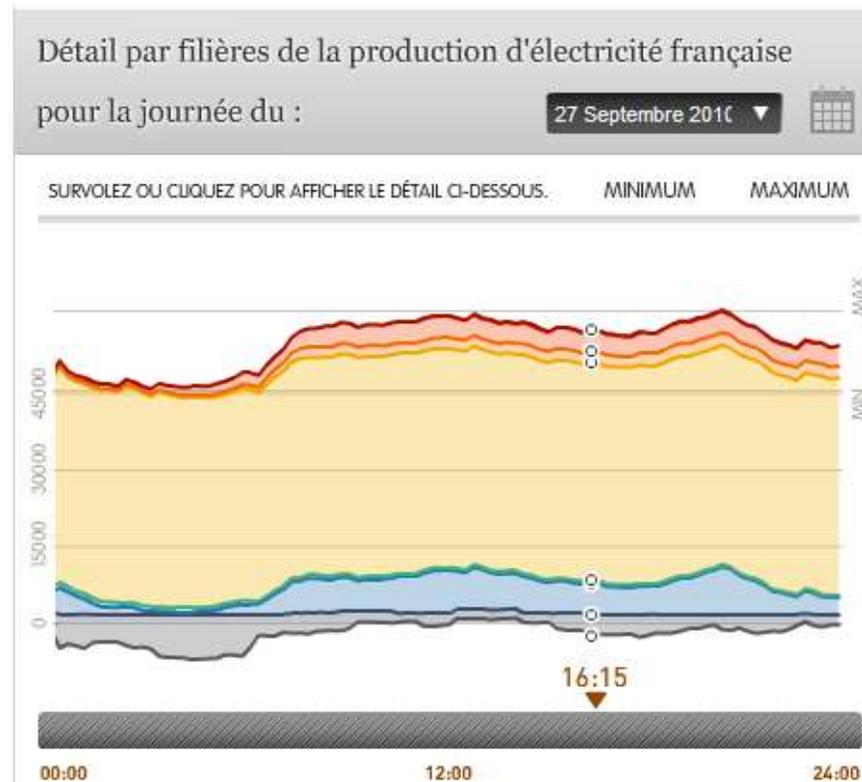
**Répartition des capacités certifiées  
par filière au 31/12/16t**

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

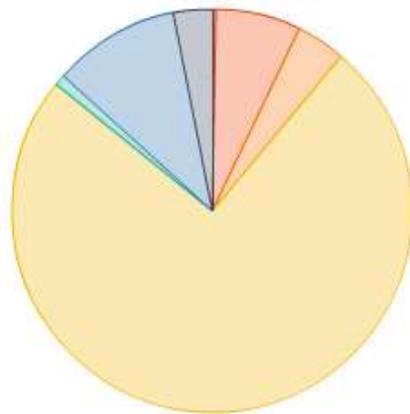
Les chiffres précédemment avancés sont des moyennes et ne reflètent pas forcément la répartition de la production instantanée d'électricité, soirée, saison, etc (source RTE)



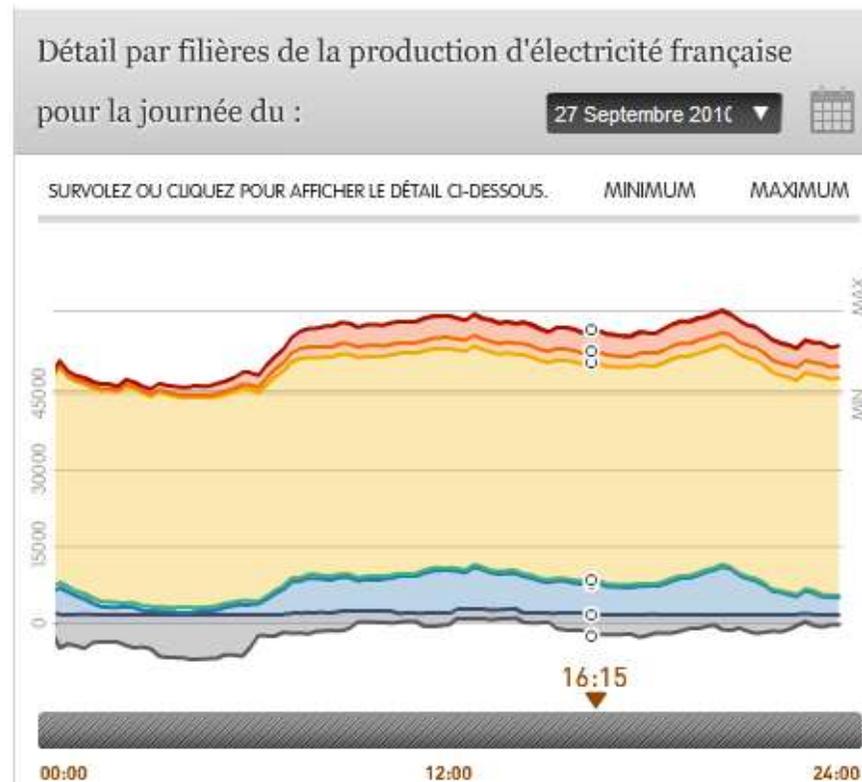
Surveillez les légendes pour obtenir plus de détails.



Cette problématique exige une hétérogénéité des sources primaires pour la production au regard notamment de la réactivité et de la disponibilité des centres de production (thermique, hydraulique, charbon, STEP, etc)

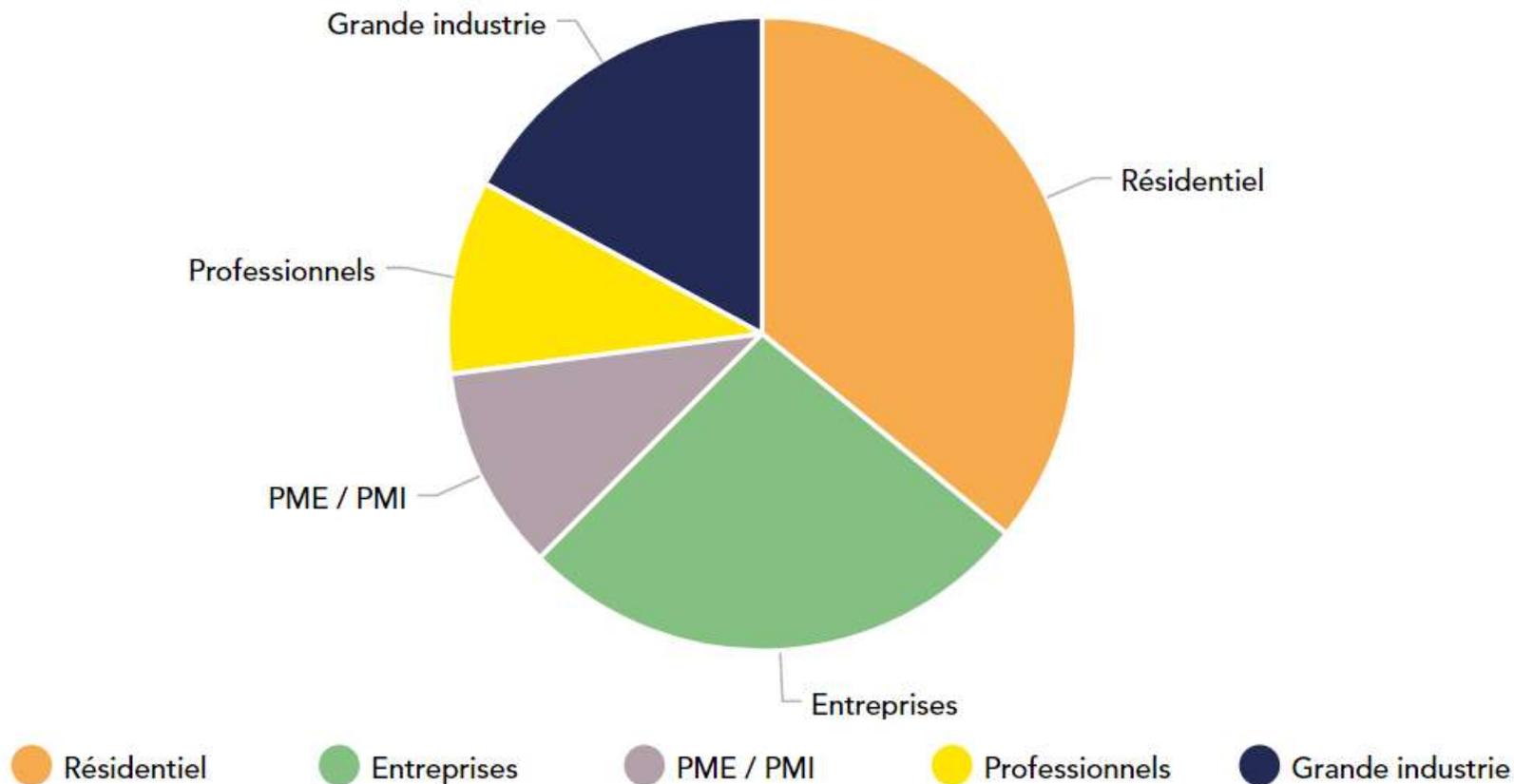


Survolez les légendes pour obtenir plus de détails.

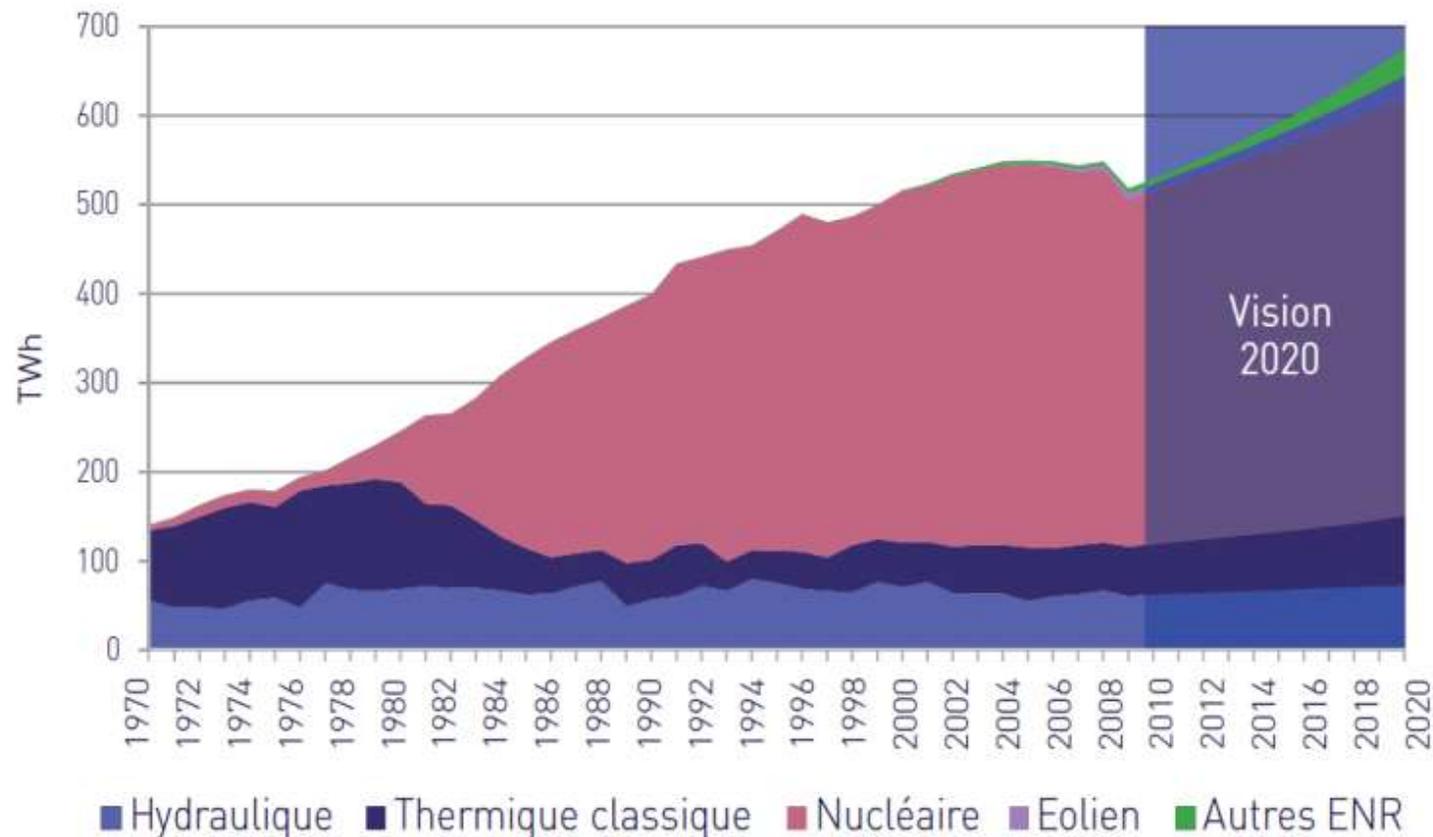


Observons en 2016 la consommation électrique Française classée par grands secteurs d'activités (source RTE)

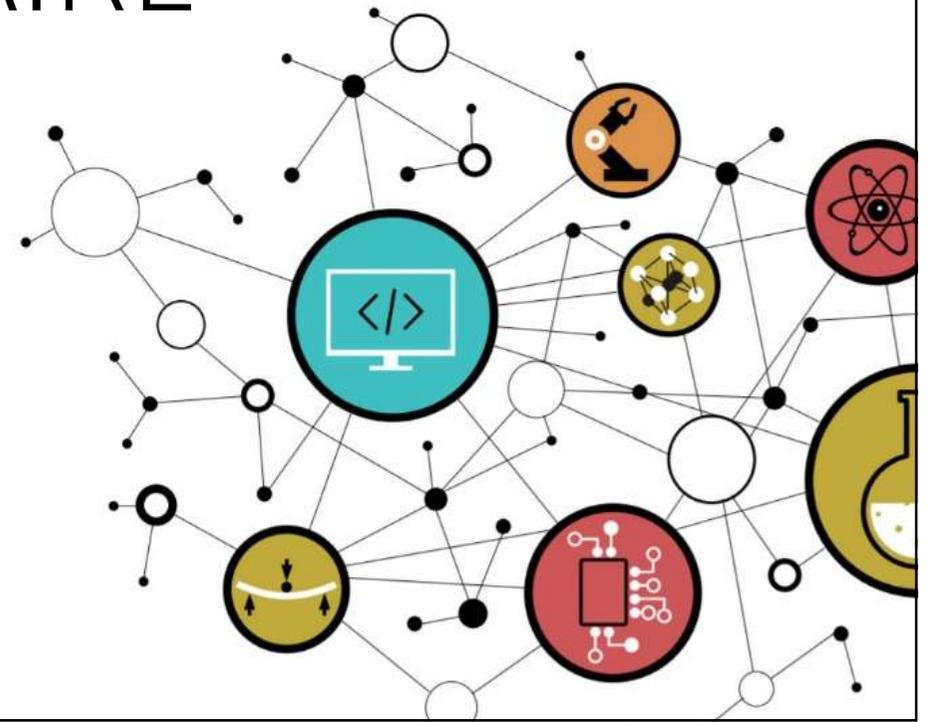
Consommation finale par secteur



Observons l'évolution du potentiel de production d'électricité par source en France depuis 1970 ainsi que l'émergence de la politique tournée vers le nucléaire (source OIE)



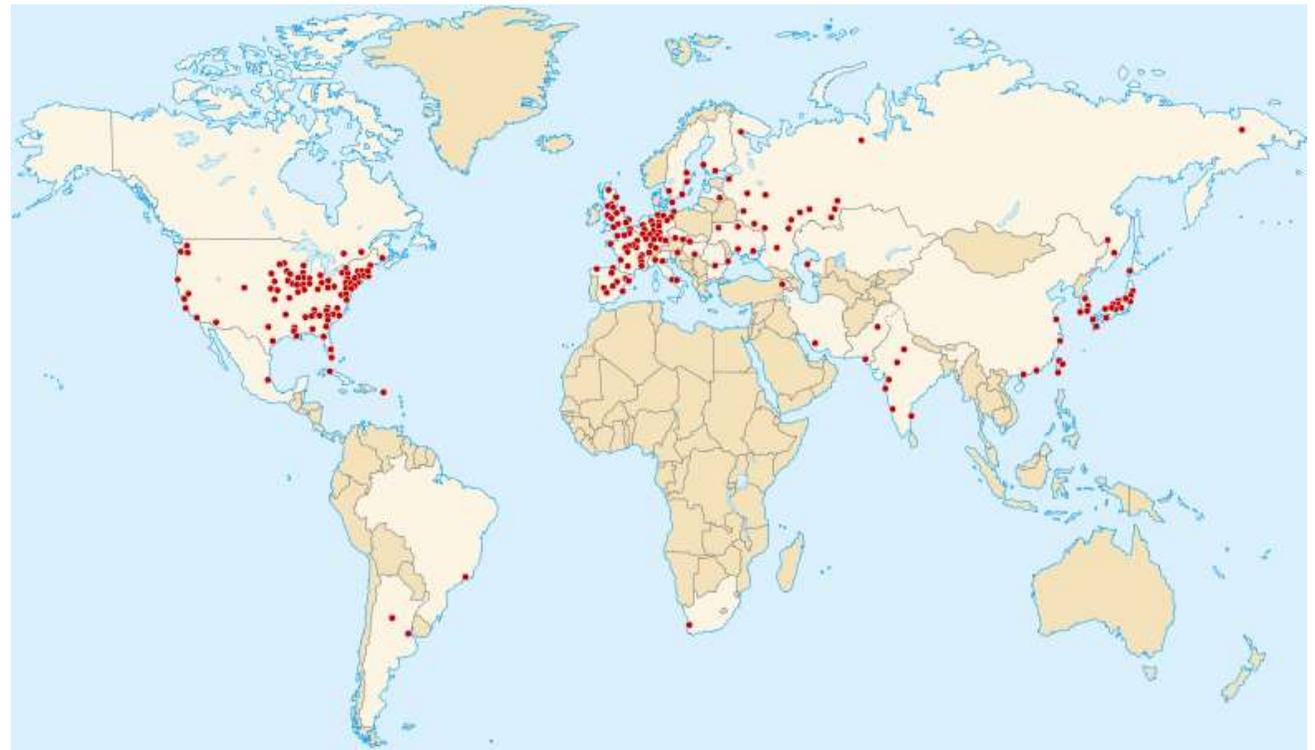
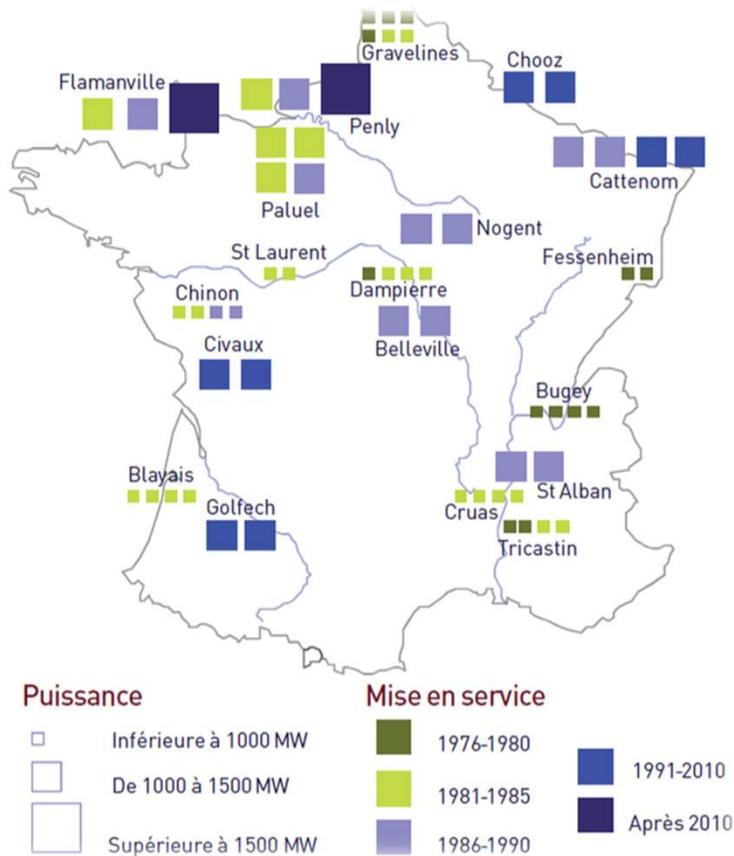
# PRODUCTION NUCLEAIRE



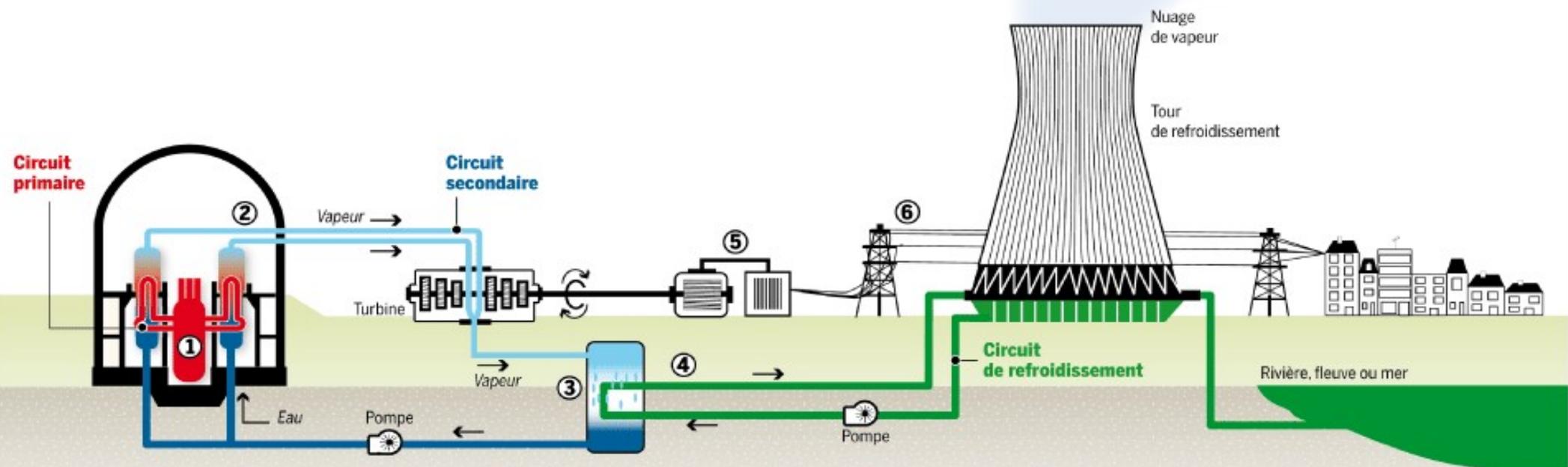
La France est au deuxième rang mondial dans le domaine de la production d'énergie électrique à partir du nucléaire

- *n°1* : USA (798,7 TWh en 2009 soit ~20% de l'énergie totale produite par le pays)
- *n°2* : France (384 TWh en 2016 soit ~72% de l'énergie totale produite par le pays)
- *n°3* : Japon (263,1 TWh en 2009 soit ~29% de l'énergie totale produite par le pays)

En 2015, la France compte 58 tranches nucléaires contre 436 de part le monde en 2012 (61 en construction). Chacune de ces tranches peut produire en moyenne 1GW (1,65GW pour l'EPR)



La production d'énergie électrique est assurée par un turbo-alternateur (ensemble turbine à vapeur et alternateur). Dans le cadre de cet enseignement nous nous intéresserons plus particulièrement à l'alternateur synchrone, le transport, la répartition puis la distribution de l'énergie électrique



① Réacteur : le combustible (uranium, plutonium) produit une intense chaleur véhiculée dans le circuit primaire d'eau

② Vapeur : au contact des tuyaux du circuit primaire, l'eau du circuit secondaire est transformée en vapeur qui va faire tourner la turbine

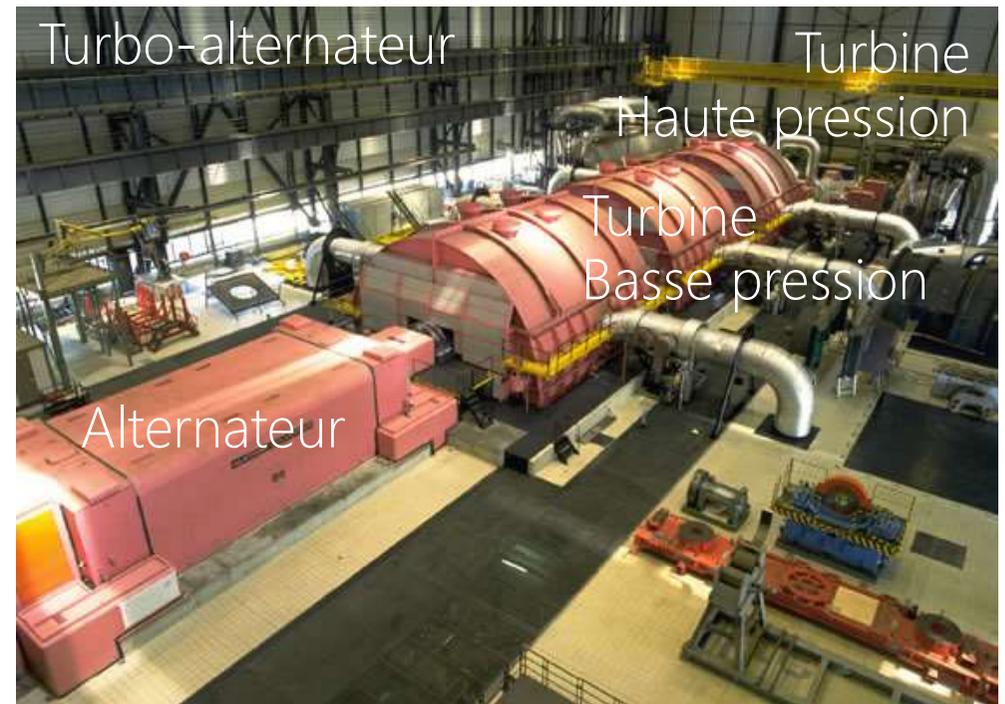
③ Cuve de refroidissement : la vapeur est retransformée en eau, qui repart vers l'enceinte de confinement

④ Eau : le circuit tertiaire refroidit la vapeur puis se refroidit lui-même dans la tour de refroidissement qui émet un nuage de vapeur

⑤ Alternateur : la turbine à vapeur fait tourner un générateur électrique qui va alimenter en électricité les lignes à haute tension

⑥ Réseau électrique : l'électricité alimente le circuit d'EDF par des lignes à très haute tension (jusqu'à 400 000 volts)

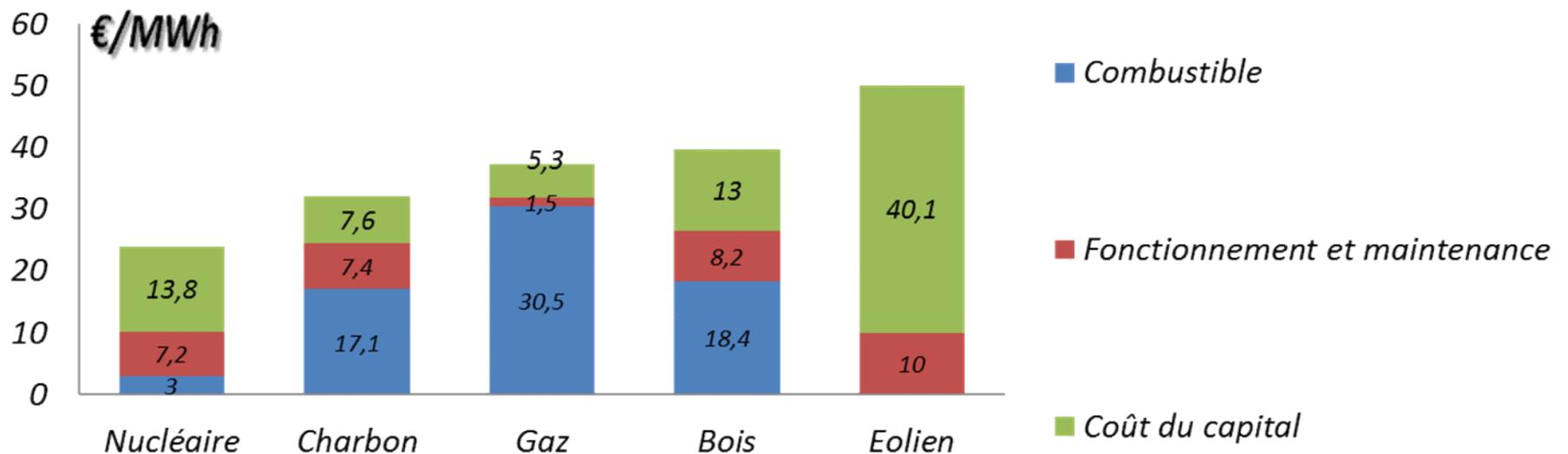
Observons à droite l'une des salles des machines de la centrale de Flamanville (turbo-alternateur). Sur l'image de droite, nous pouvons observer l'EPR (Réacteur Pressurisé Européen) en cours de fabrication. Malgré une forte controverse, la mise en service est prévue pour fin 2018





- *Dépendance et épuisement de la ressource (uranium, plutonium ...)*
- *Risque d'accident et d'exposition aux radiations*
- *Retraitement, stockage des déchets et démantèlement*
- Rendement relativement faible (~33%). EDF garantit un rendement proche de 35% avec son prochain réacteur EPR
- Puissance unitaire de production élevée. Stockage de la source relativement simple
- Peu sensible au prix de la matière première

- Coût de construction et d'exploitation faible mais démantèlement coûteux sur un processus long. Seuls les coût internes sont retenus (CEA) :



(hors subventions et avantages fiscaux)

- Coûts externes faibles car peu de rejet de CO<sub>2</sub>

En 2018, ORANO (anciennement AREVA) est l'un des leaders mondiaux du nucléaire, notamment au niveau de l'extraction minière. Le groupe propose aux électriciens une offre qui couvre toutes les étapes du cycle du combustible, de la conception à la construction de réacteurs nucléaires en passant par des services durant l'exploitation



**orano**

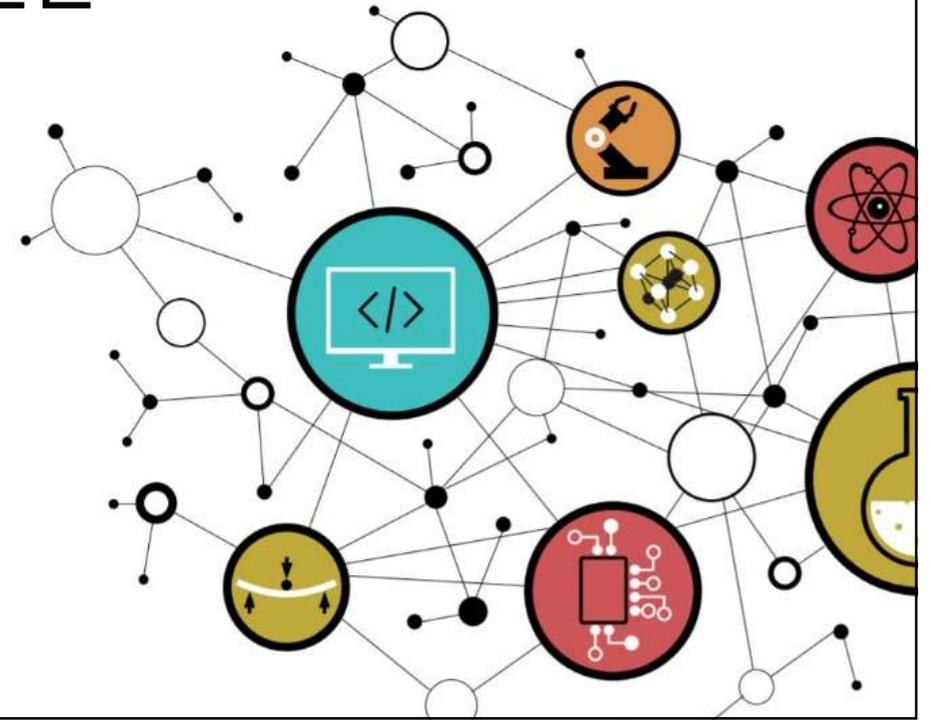
# ALSTOM

En 2015, la branche *Alstom Power* du groupe *Alstom* (90% du CA à l'étranger) était notamment leader mondial dans les domaines de l'énergie cités ci-dessous. 2015 signe également le rachat d'Alstom par la société Américaine *General Electric Power*. 2016 voit la suppression de 6500 emplois en Europe et prise en main par un groupe Américain de la maintenance d'appareillages de centrales nucléaires Françaises

- *Centrales électriques* clés en mains
- *Turbines* et *alternateurs* en hydroélectricité. Une partie des générateurs électriques du barrage des trois gorges ont été installés par Alstom

# PRODUCTION

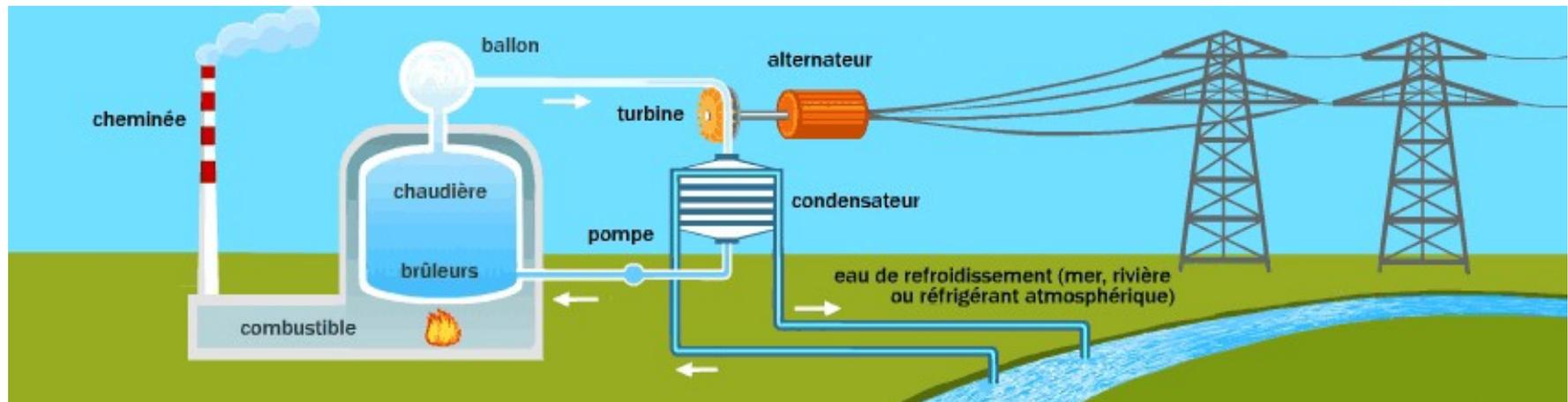
## FOSSILE



Avec près de 60% de la production mondiale d'électricité, les combustibles fossiles sont actuellement les plus utilisés pour la production d'électricité de part le monde

- Le *charbon*, de loin la ressource primaire la plus disponible sur terre, mais la plus polluante !
- Le *gaz* naturel
- Le *pétrole*
- Le *Fioul* (dérivé du pétrole)
- la *biomasse* (matières organiques), les déchets municipaux ...

Hors charbon, les centrales les plus répandues sont les centrales thermiques à flammes et à turbine à gaz. Comme pour les centrales nucléaires, ces centrales utilisent des turbo-alternateurs pour la génération d'énergie électrique





En 2015, Engie (anciennement GDF Suez) est le 3<sup>ième</sup> plus gros groupe mondial en matière d'énergie hors pétrole (actionnaire principale, état Français ~33%)

- 1<sup>er</sup> Européen dans le transport, la distribution et le stockage du gaz naturel.
- 1<sup>er</sup> producteur mondial indépendant d'électricité et possédant l'un des parcs les plus diversifiés au monde (nucléaire, charbon, géothermie ...)

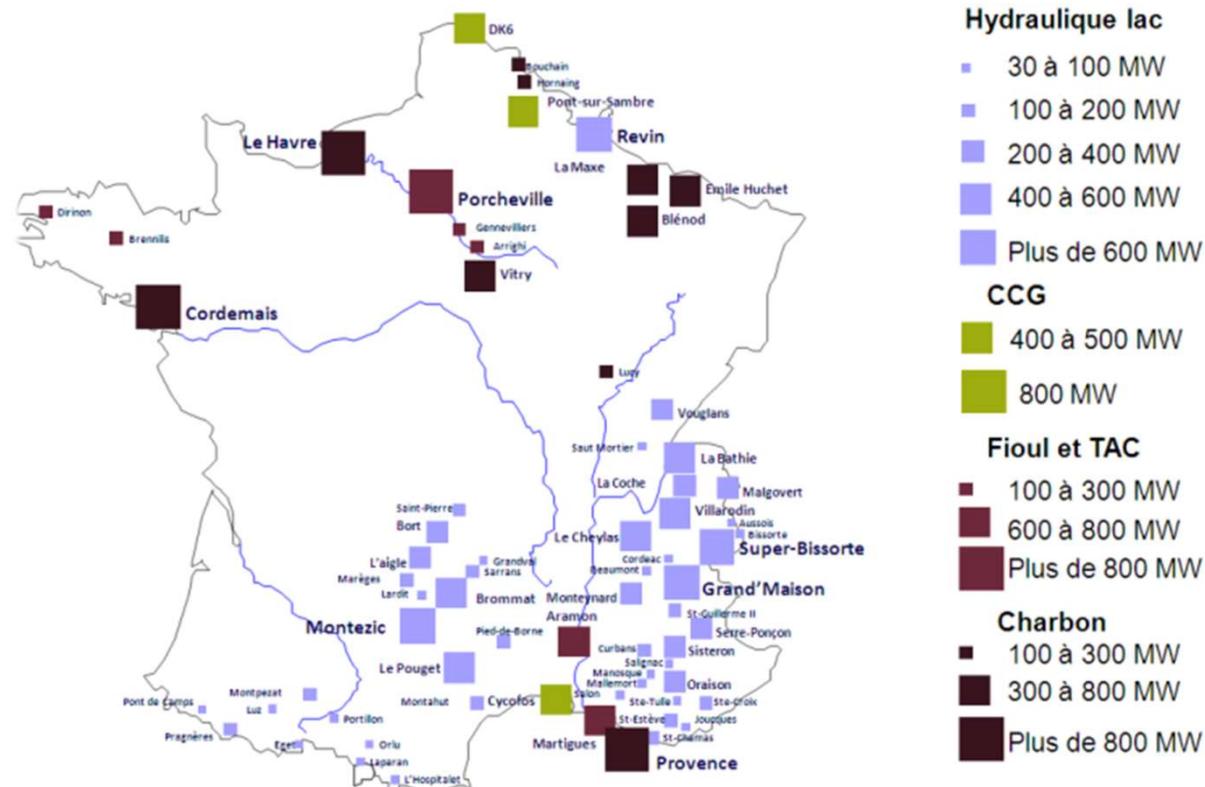
En 2017, Total SA, première entreprise Française au CAC40, fait parti des supermajors (6 plus grandes compagnies pétrolières mondiales). Ses activités couvrent l'ensemble de la chaîne de l'extraction à l'exploitation en passant par le raffinage.



Ces types de centrales ont notamment pour avantage d'être beaucoup plus réactives qu'une centrale nucléaire. Avec ses 4 générateurs de 600MW, la centrale à fioul de Porcheville avait pour rôle de faire face aux pointes de consommation du pays afin d'assurer la sécurité du réseau de la région parisienne. Néanmoins, suite au constat de surcapacité de production en France (coût fonctionnement), la centrale a été mise à l'arrêt en mai 2017.



Observons la répartition des infrastructures pour la production électrique de pointe en France. En effet, les énergies fossiles et hydroélectriques servent le plus souvent d'appoint au nucléaire, d'où la répartition géographique des sites afin d'assurer continuité du service et stabilité du réseau





- *Pollution à l'exploitation*

- *Dépendance et épuisement de la ressource (charbon, gaz, pétrole ...)*

- Démarrage rapide

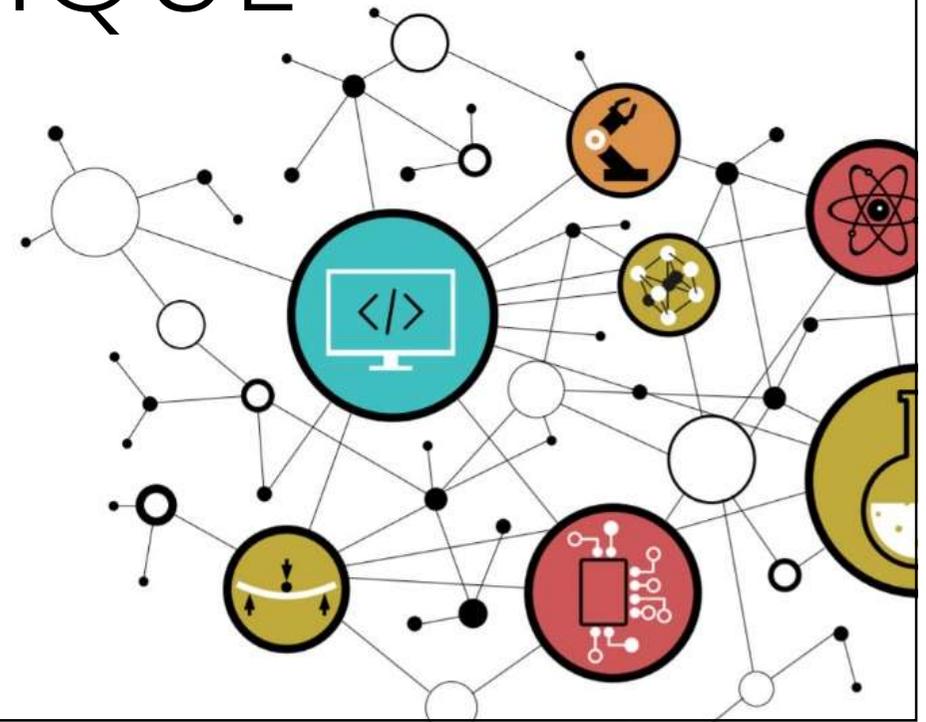
- Rendement relativement bon pour les centrales à chaudière récentes (> 45%)

- Puissance unitaire élevée et cogénération possible

- Stockage de la ressource relativement simple et coût de fabrication de la centrale peu élevé

# PRODUCTION

## HYDRAULIQUE

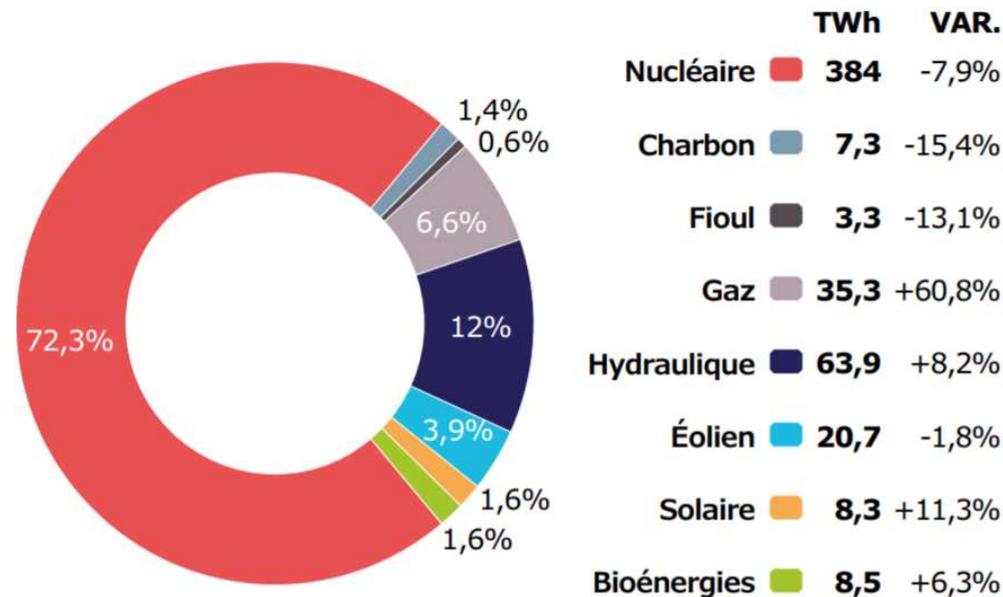


En 2017, l'énergie hydraulique (~15%) est une source de production d'électricité renouvelable qui fait quasiment part égale avec le nucléaire (~18%) à l'échelle mondiale. Observons l'hydroélectricité en France en quelques chiffres

- *EDF* est le premier producteur hydraulicien de l'union Européenne en 2017. Le leader mondial étant chinois.
- *70%* du potentiel hydroélectrique Français est déjà exploité
- *570* centrales hydroélectrique pour le parc Français

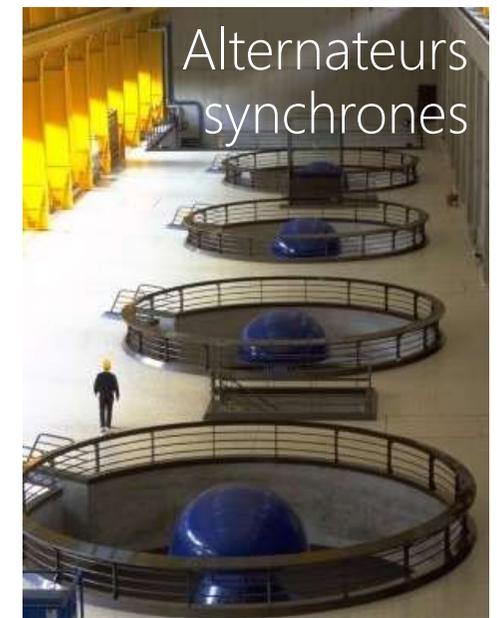
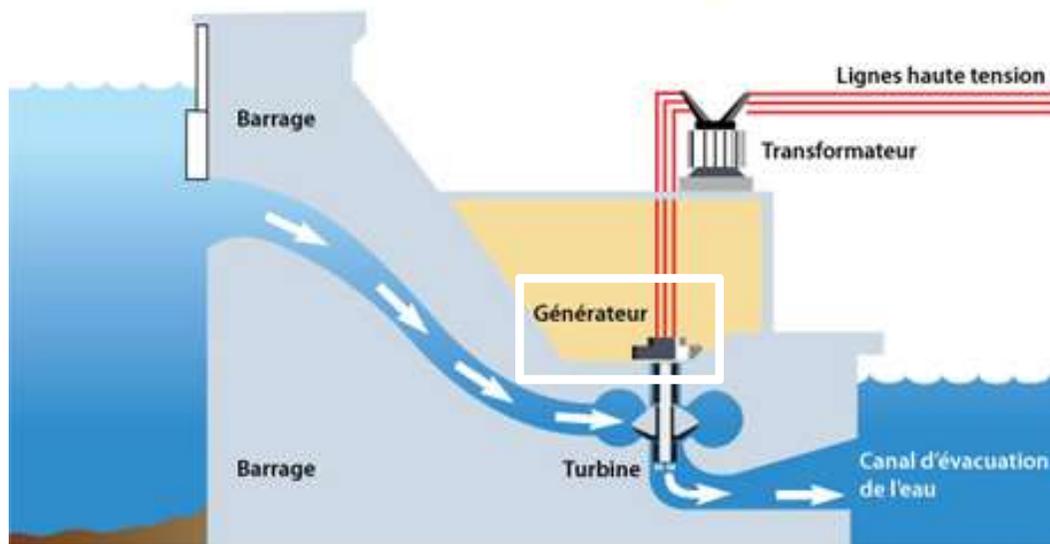
En 2016, observons en France la part de l'hydraulique dans la production d'électricité. Attention, énergie renouvelable ne signifie pas forcément énergie propre ou verte (barrages, canaux artificiels). Néanmoins, des solutions au fil de l'eau sans stockage faiblement impactantes pour l'environnement sont également en service

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

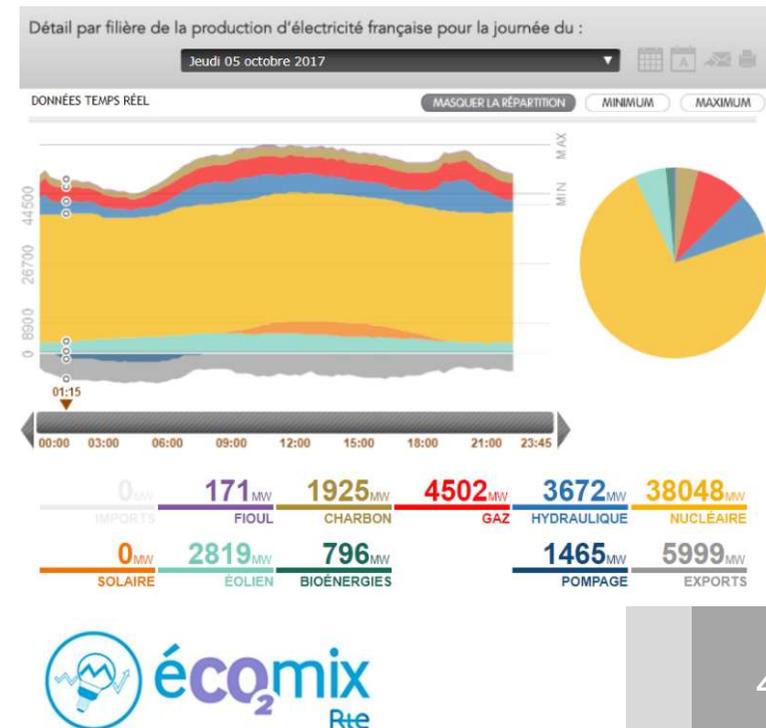
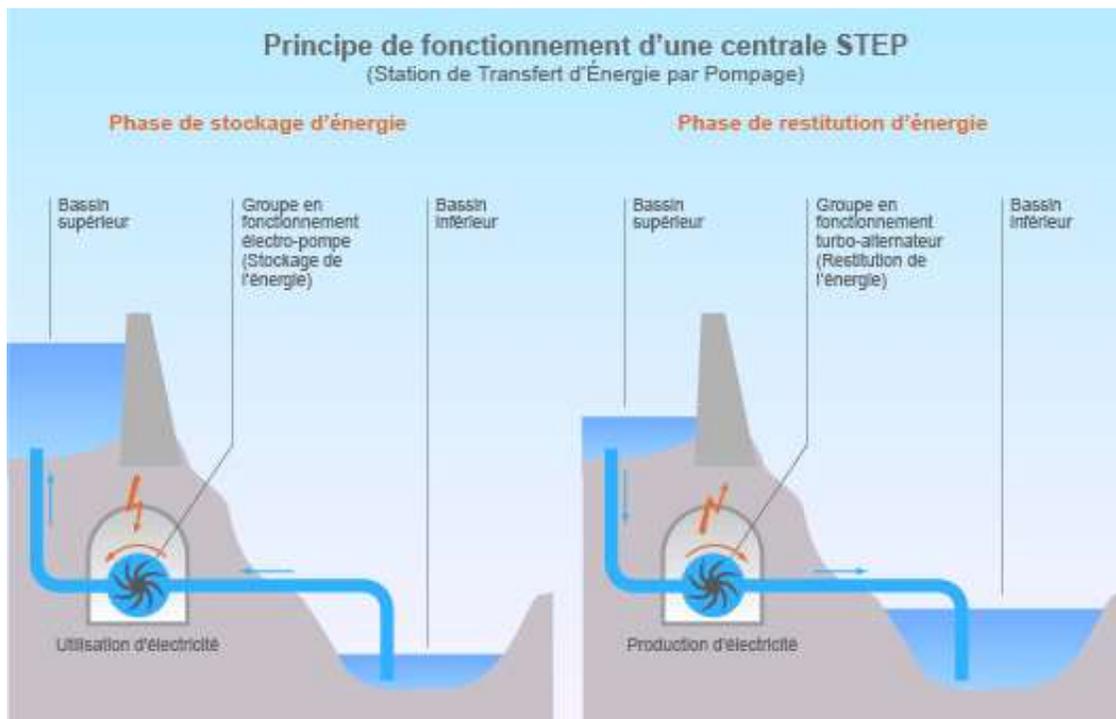


Les centrales hydroélectriques (barrage, lac, chute, canaux, marémotrice, etc) utilisent des turbines à eau et des machines électriques pouvant être réversibles. La plus grande installation Française peut fournir 1,8GW en deux minutes. Il s'agit de la centrale de type STEP de grand maison en Isère (cf. ci-dessous à droite)

Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique



Les centrales hydroélectriques de type STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) peuvent assurer un stockage indirect d'énergie pouvant servir d'appoint durant les pics de consommation (phase de stockage et phase de production). Le rendement est important, entre 70% et 85% (rapport énergie produite sur énergie consommée) . Exemple de Grand Maison



Energie renouvelable ne veut pas forcément signifier énergie propre ou énergie verte. Exemple de la centrale de St Chamas. L'apport considérable d'eau douce et de limons a eu de graves conséquences hydrologiques et écologiques pour l'étang de Berre, la Durance, la Camargue et les nappes phréatiques associées



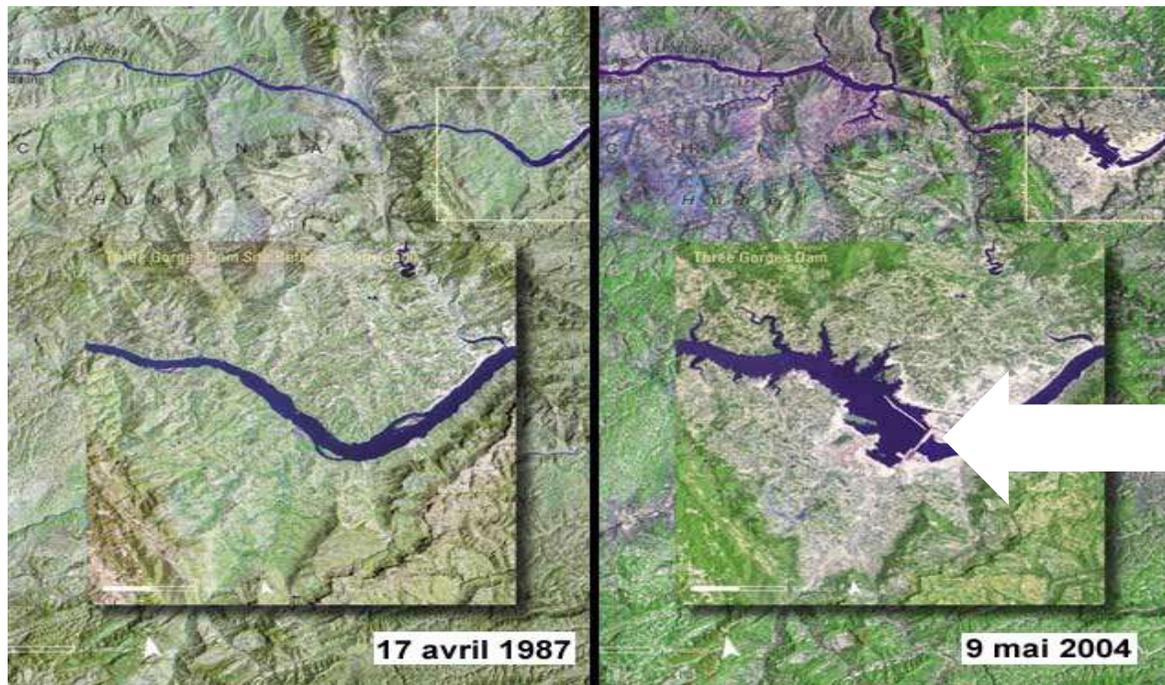
Centrale EDF de St Chamas sur l' étang de Berre en Provence



Etang d' eau salée en  
Provence

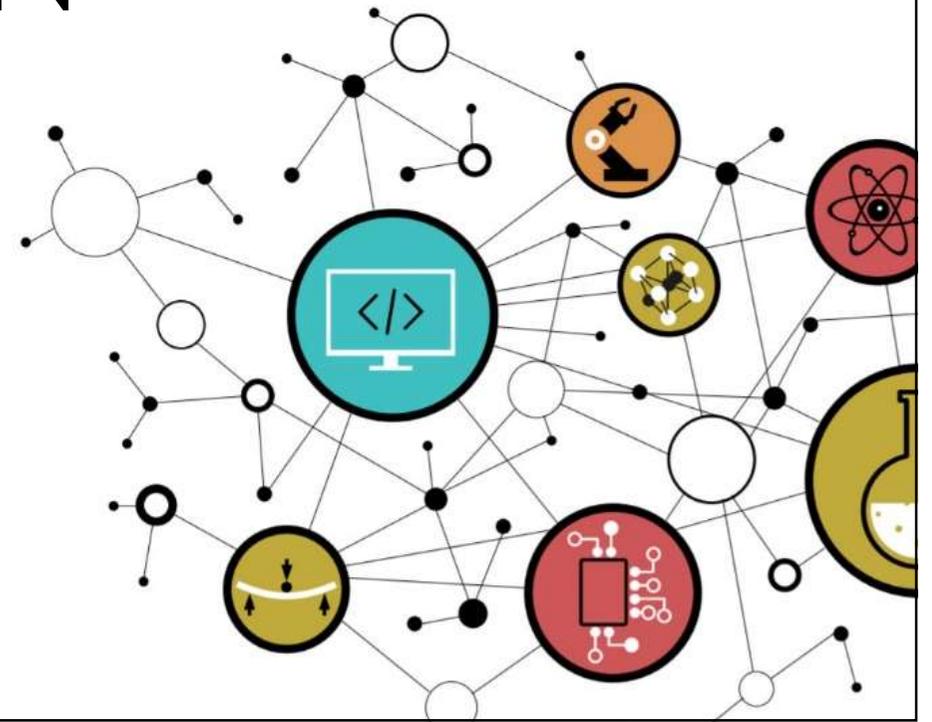
Canal d' eau douce,  
détournement Durance

Le plus grand générateur d'électricité au monde est une centrale hydroélectrique et se situe en Chine. Il s'agit du barrage des trois gorges qui a été mise en production par étapes de 2006 à 2009. Les 26 générateurs assurent une production instantanée de 18,2 GW, soit plus de 12 tranches de centrales nucléaires



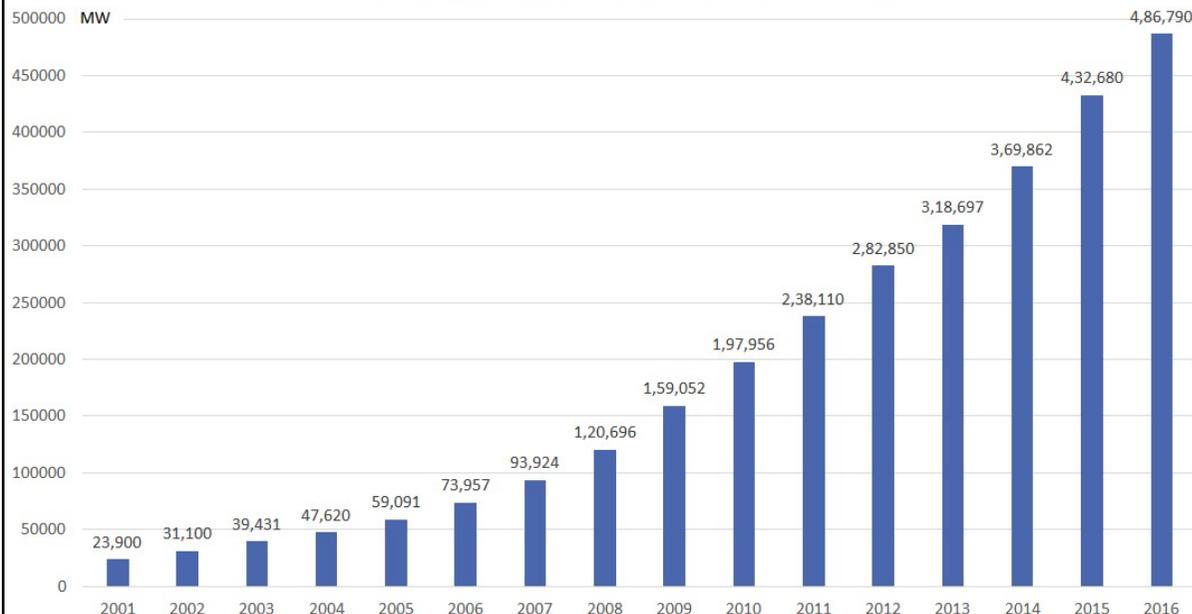
# PRODUCTION

## EOLIEN

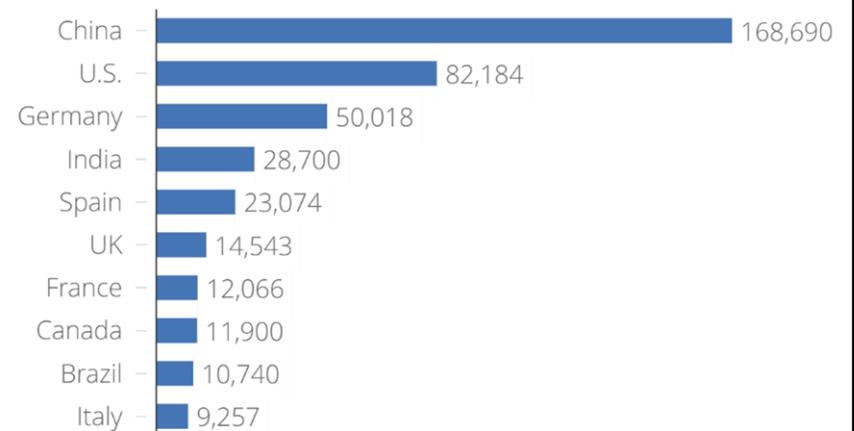


Les éoliennes utilisent la force motrice du vent afin de générer de l'électricité. Il s'agit d'une source de production d'énergie électrique renouvelable dite propre ou verte, hors énergie grise lié à l'ACV (Analyse du Cycle de Vie). Observons le parc mondial en puissance installée (différent du potentiel réel de production)

Global cumulative installed wind capacity 2001-2016



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



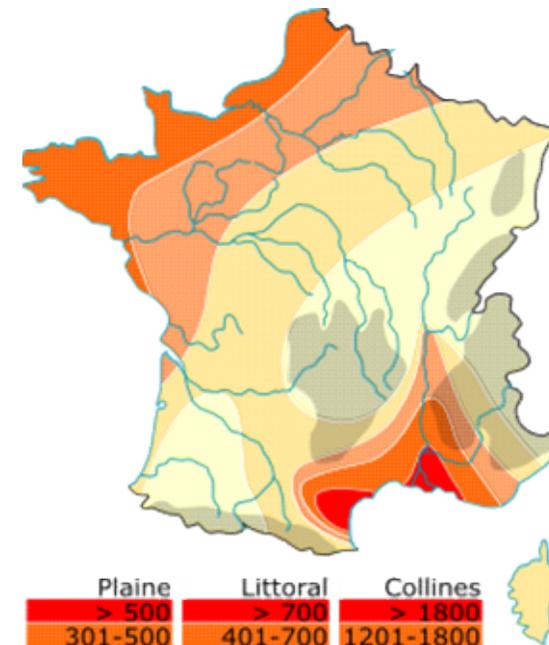
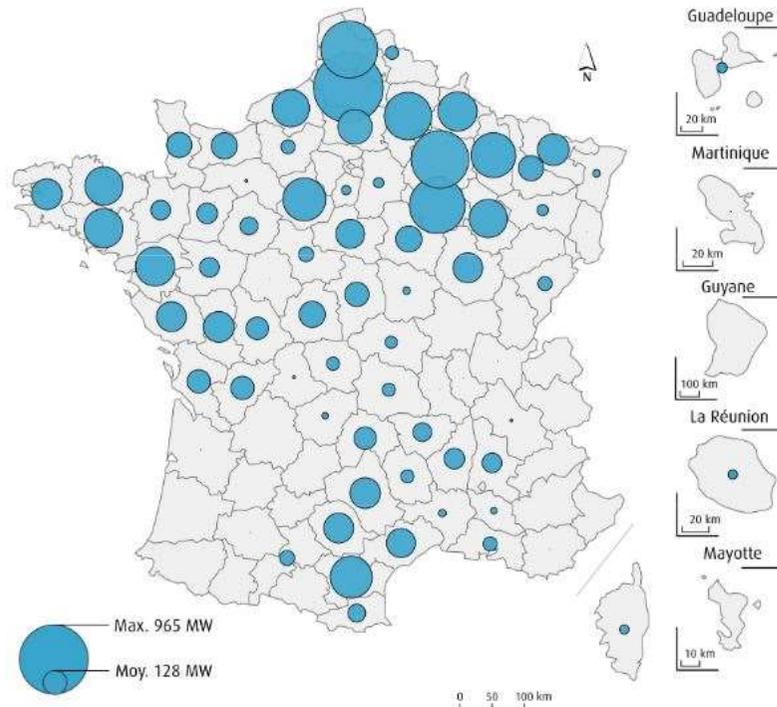
Made by BRINK Asia

Data: GWEC

En 2016, la France compte une puissance installée proche de 12GW. Observons la répartition du parc éolien ainsi que le potentiel éolien Français (en W/m<sup>2</sup> à 50m du sol)

### Puissance éolienne totale raccordée par département au 31 mars 2016

En MW

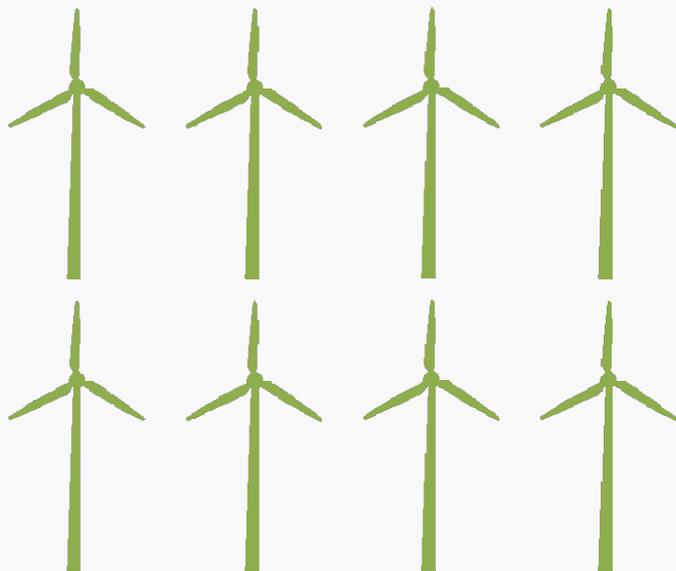


Champ : métropole et DOM.

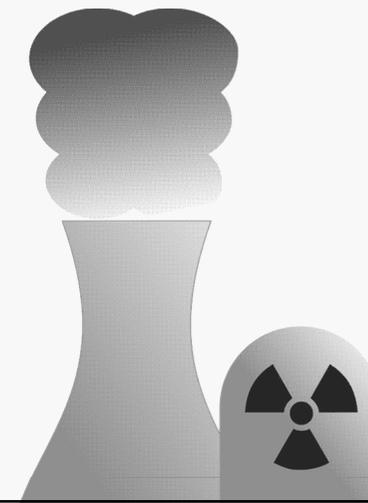
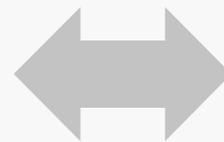
Source : SOeS d'après ERDF, RTE, EDF-SEI, CRE et les principales ELD

Etre prudent quant aux chiffres avancés. Une éolienne idéalement positionnée en on-shore ne fonctionne en moyenne que 2000h par an, une année comptant 8760 heures. *Une éolienne on-shore de 2MW ne produira environ que 600KW lissé en moyenne sur une année.* De plus, un réseau électrique basé uniquement sur l'éolien serait sujet à une forte instabilité et donc des discontinuités

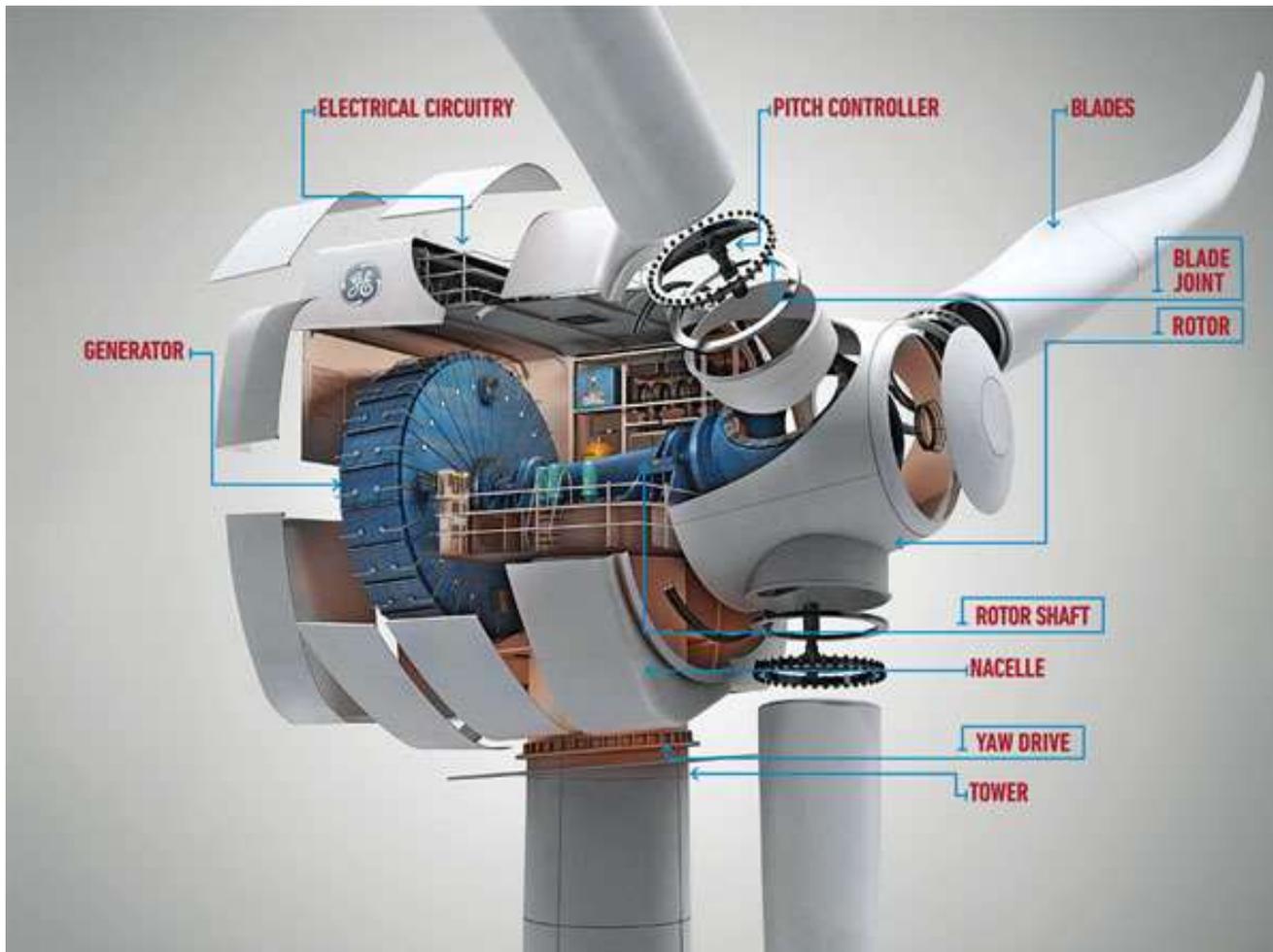
~ 1500 éoliennes



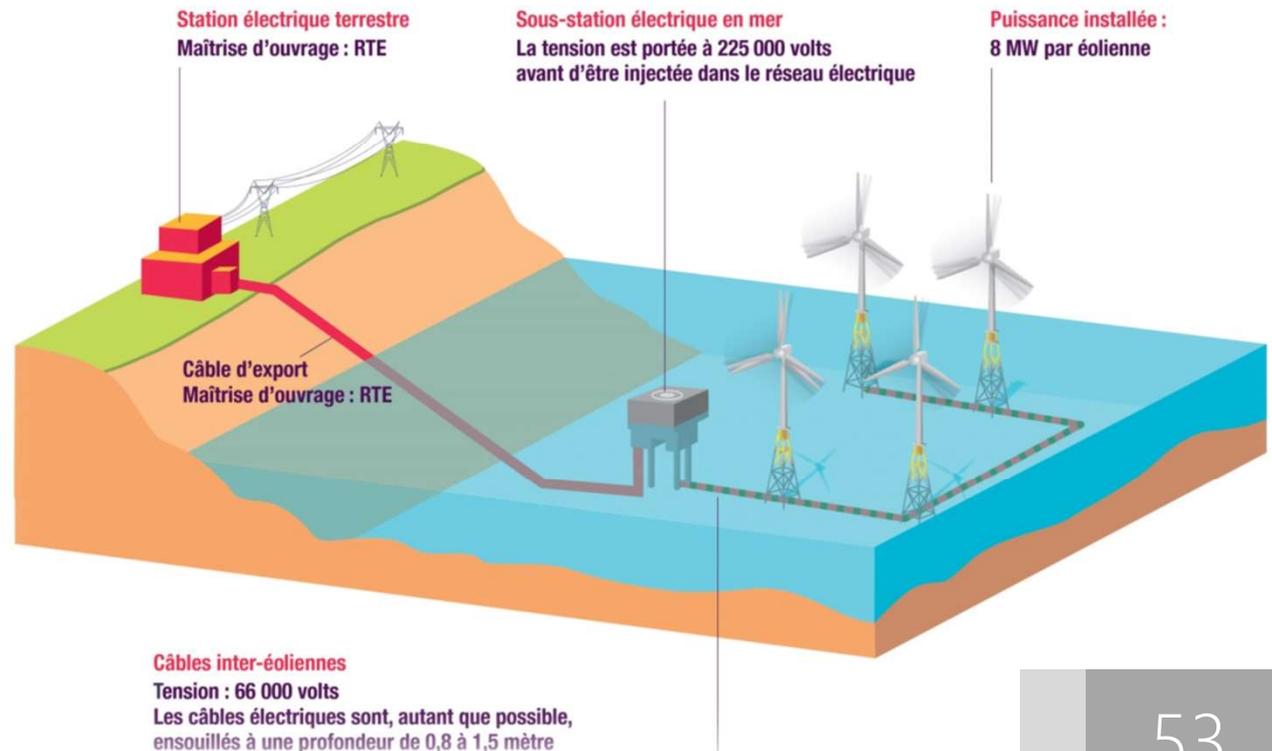
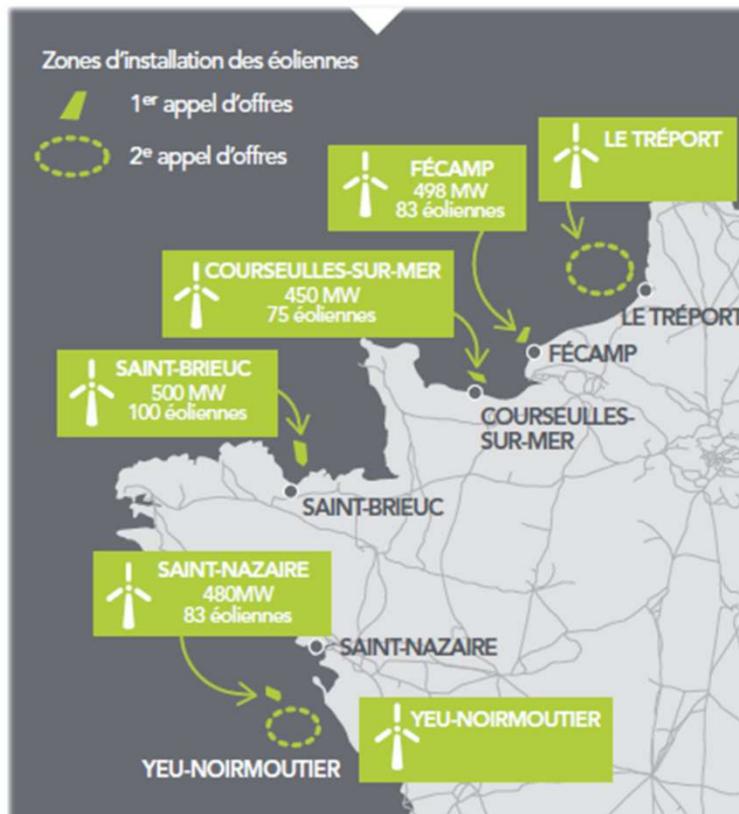
1 tranche de centrale nucléaire



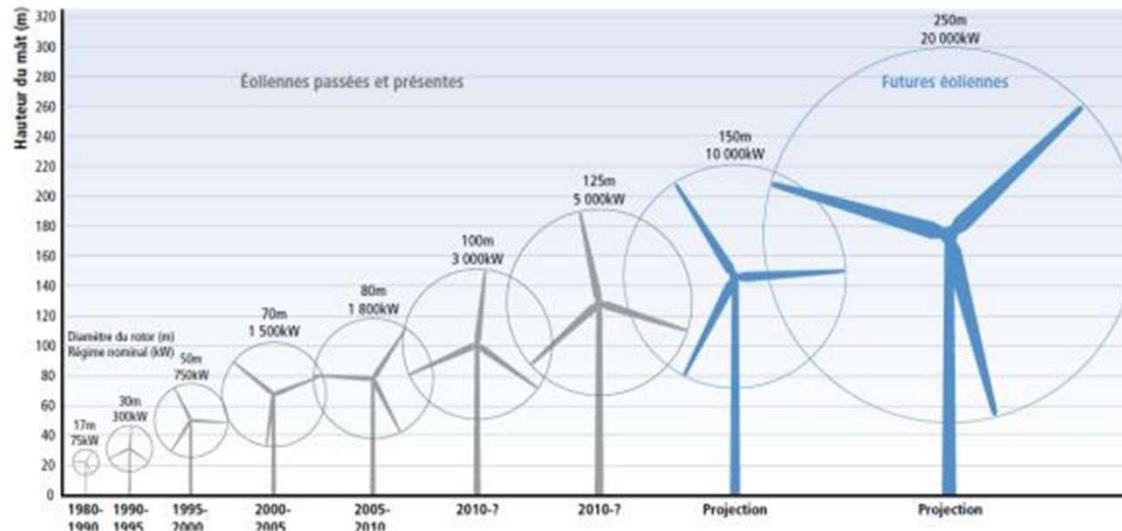
Observons les principaux éléments constitutifs d'une éolienne. Exemples d'éoliennes Vergnet et Alstom wind (GE wind)



Raccordement au réseau électrique d'éoliennes offshore.  
Observons les projets en cours pour la France en 2015



En 2016, les plus grandes éoliennes actuellement en services possèdent un diamètre de 164m pour une puissance développée de 8MW (éolienne offshore Vestas, Danemark). La filiale *Areva Wind* du groupe du même nom développe actuellement des éoliennes offshore de 8MW



Relation diamètre/puissance

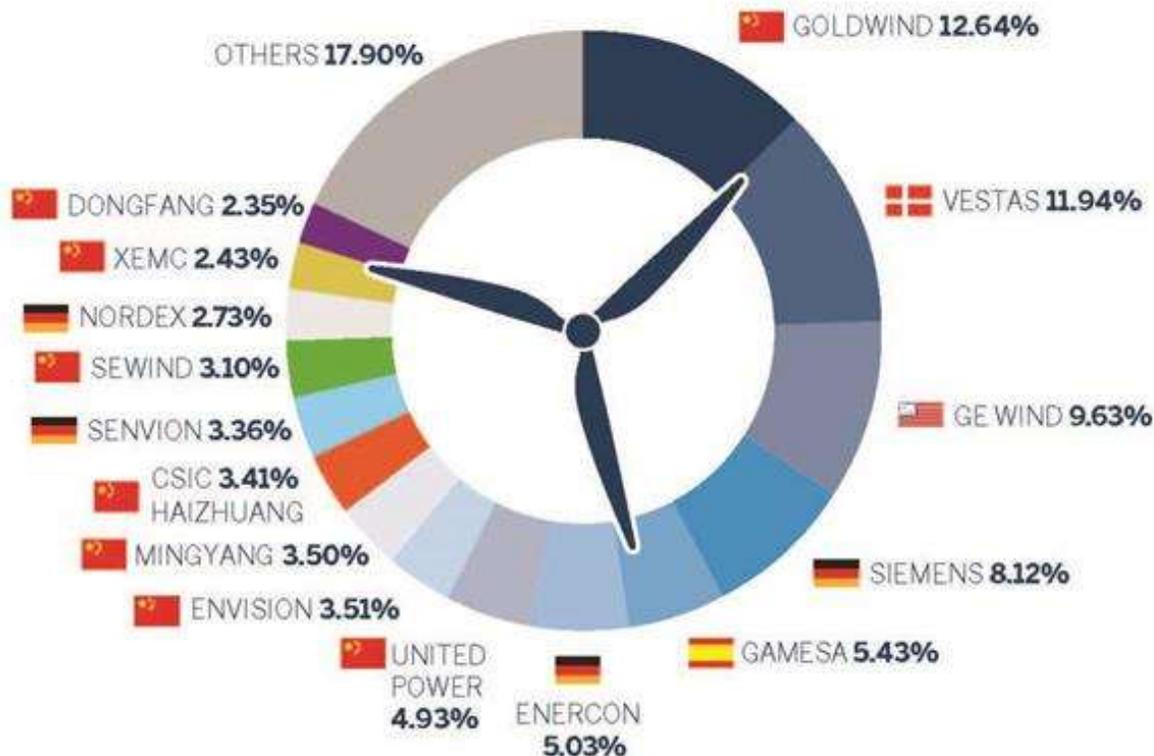


En 2017, observons les principaux acteurs français :

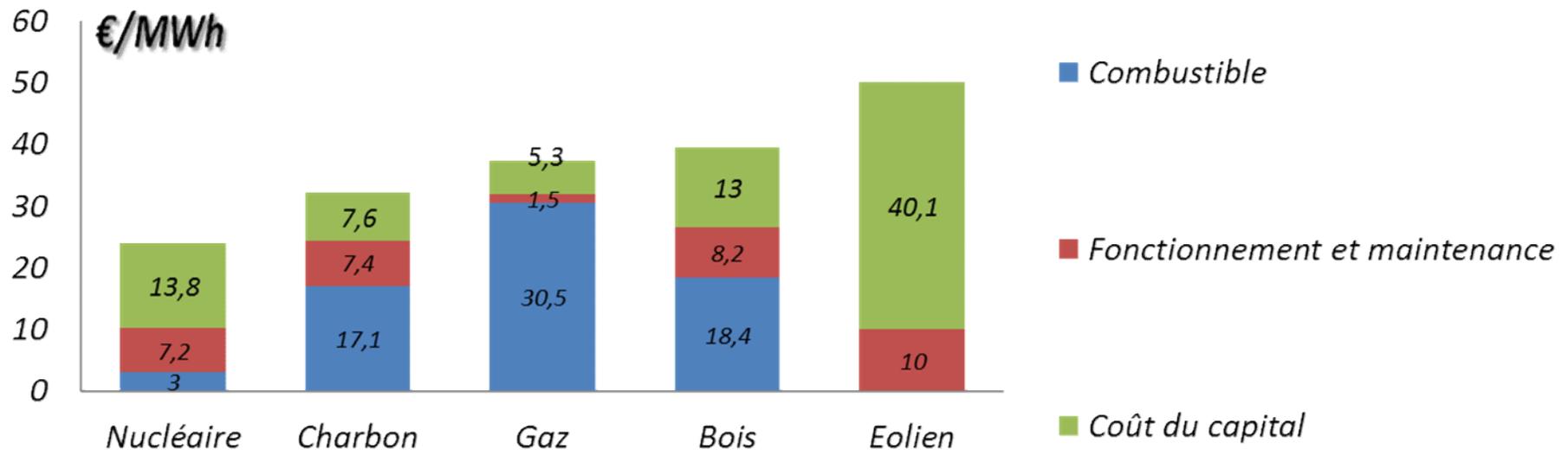
- *Areva Wind* : création en 2007 suite au rachat de la société Allemande Multibrid. 360 employés
- *Vergnet* : éoliennes de petites et moyennes puissances (dépôt de bilan et en cours de redressement judiciaire en fin 2017). 166 employés
- *Francéole* : création en 2013 et spécialisation dans la création de mâts terrestres. (en cours de redressement judiciaire en fin 2017). 160 employés
- *Alstom Wind (GE wind depuis 2015)*

En 2015, observons la répartition du marché mondial des principaux fabricants d'éoliennes

**Top 15 wind turbine suppliers in annual global market 2015**



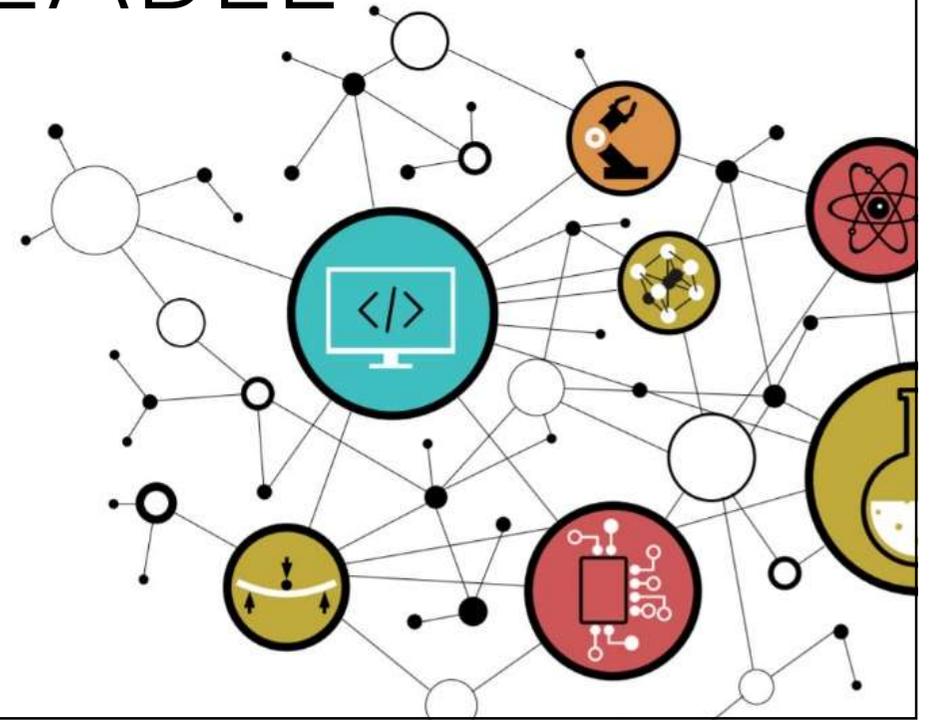
De même, sans subvention, le coût de fabrication, de fonctionnement, d'entretien et de démantèlement d'une éolienne rapporté au MWh reste relativement élevé (ACV) :



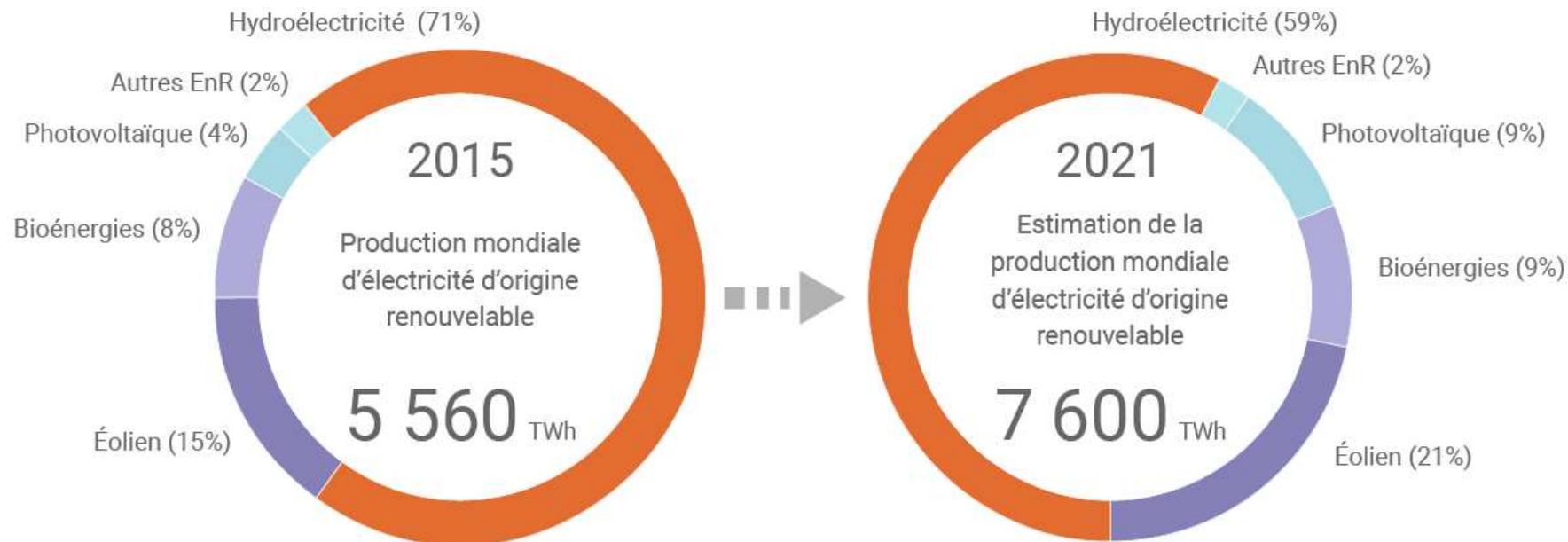
(hors subventions et avantages fiscaux)

# PRODUCTION

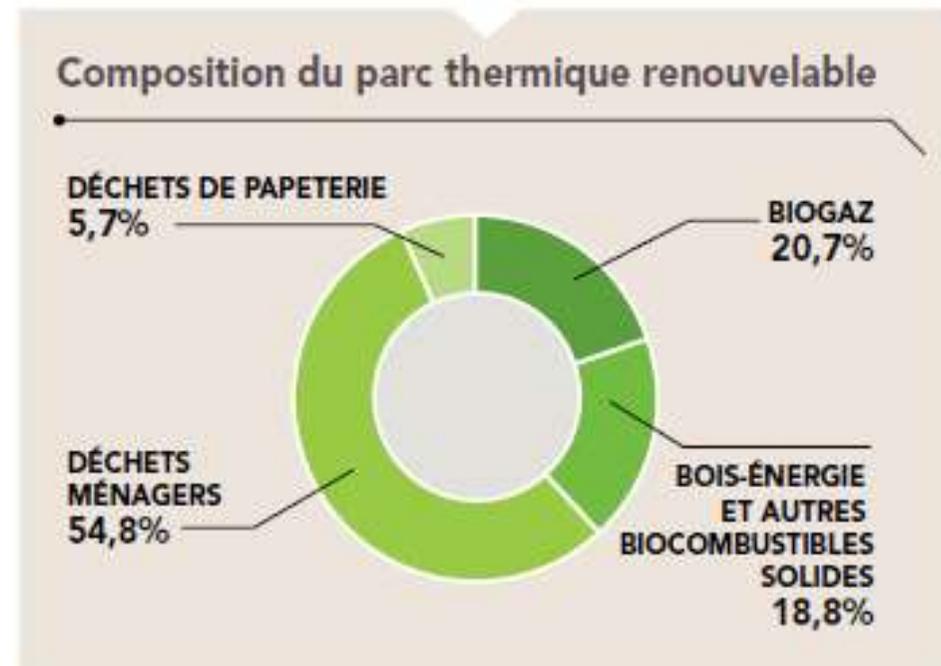
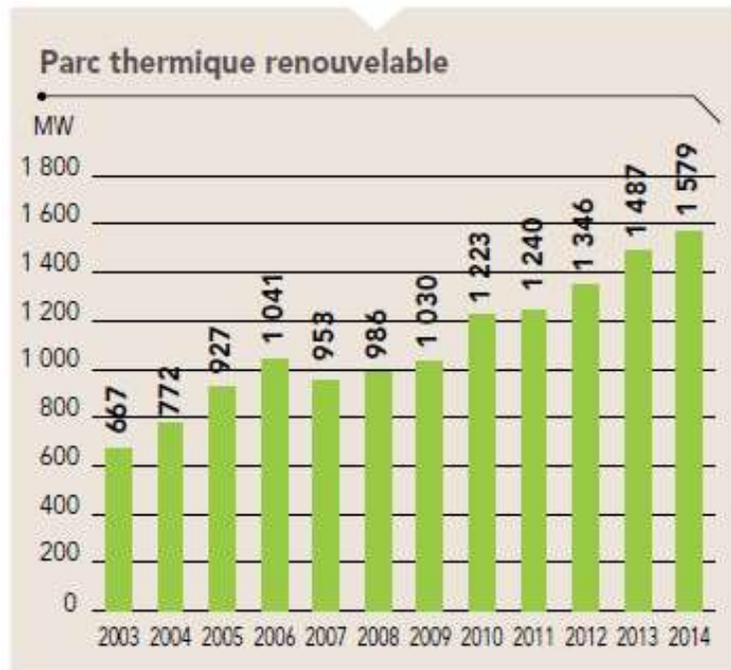
## RENOUVELABLE



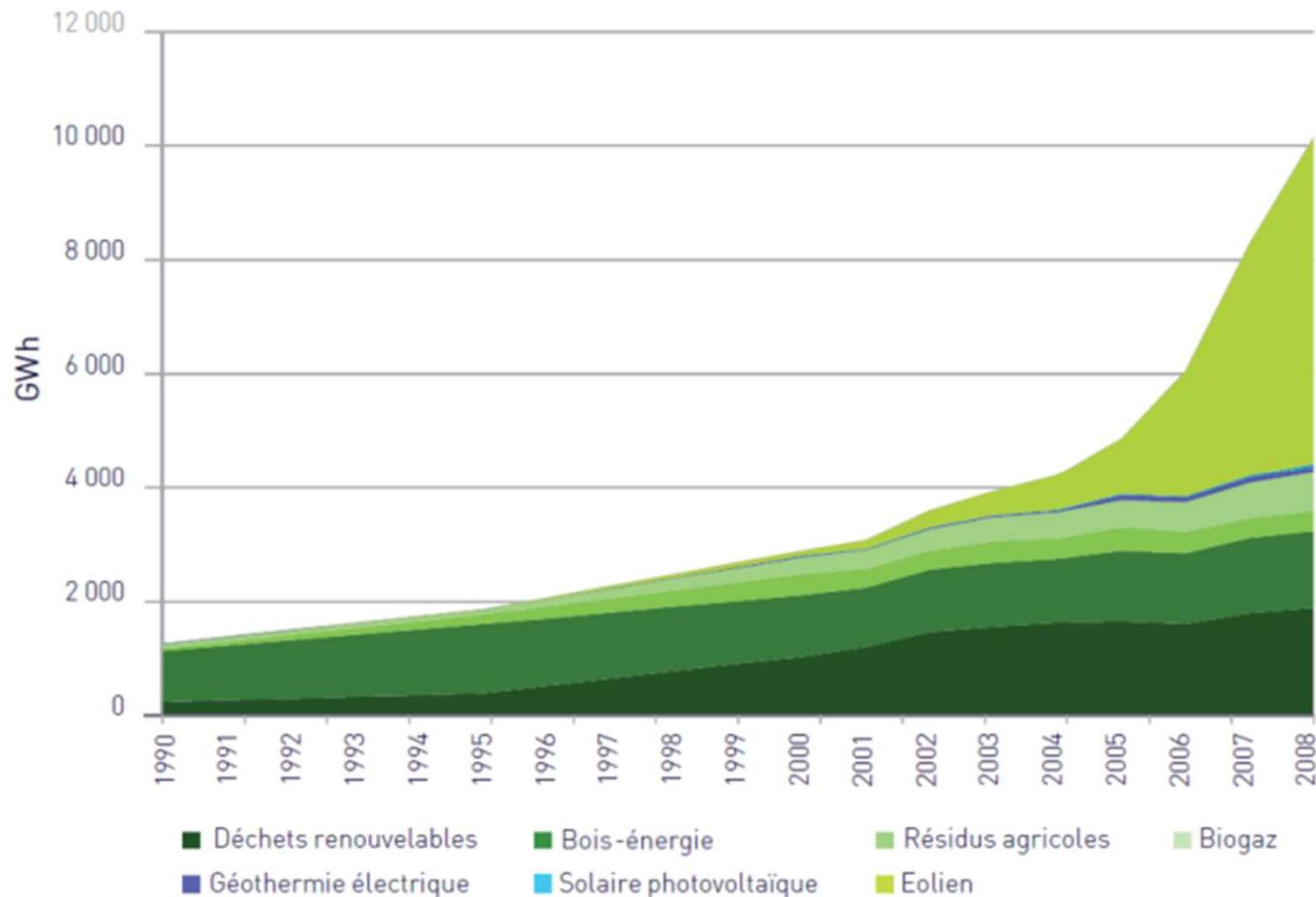
Dans les sources primaires renouvelables pour la production d'énergie électrique (hors éolien et hydroélectricité) ou EnR, l'utilisation de *biomasses* (matières organiques – bois, biogaz, biocarburants, etc) et de *déchets renouvelables* restent les solutions les plus utilisées. Observons la production mondiale issue du renouvelable en 2015, soit moins de 20% de la production totale (source IEA)



Attention, rappelons que renouvelable ne signifie pas forcément énergie non polluante. Observons le parc thermique renouvelable Français (source RTE). A titre illustratif, en Suède, région du globe fortement boisée, la biomasse est majoritairement utilisée pour le chauffage urbain



Observons jusqu'en 2008 l'évolution de la production d'électricité en France à partir de sources d'énergies renouvelables (hors hydroélectricité)

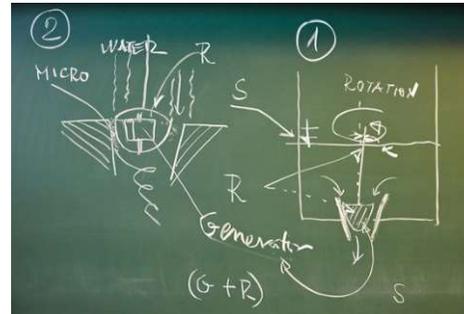
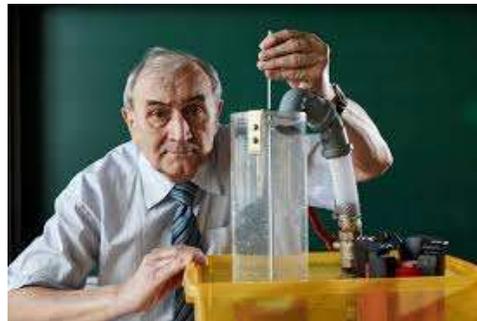


Il existe d'autres solutions de production électrique renouvelables. Ces techniques de production ne représentent qu'une faible part de la production électrique mondiale mais néanmoins des solutions délocalisées intéressantes

- *Solaire* : ~73GW installé pour le solaire de part le monde à la fin 2016, dont le photovoltaïque. En forte croissance
- *Géothermie* : ~13GW de part le monde en 2015
- *Force des vagues*
- *Hydrolienne* : La France possède le deuxième potentiel Européen après le Royaume-Uni

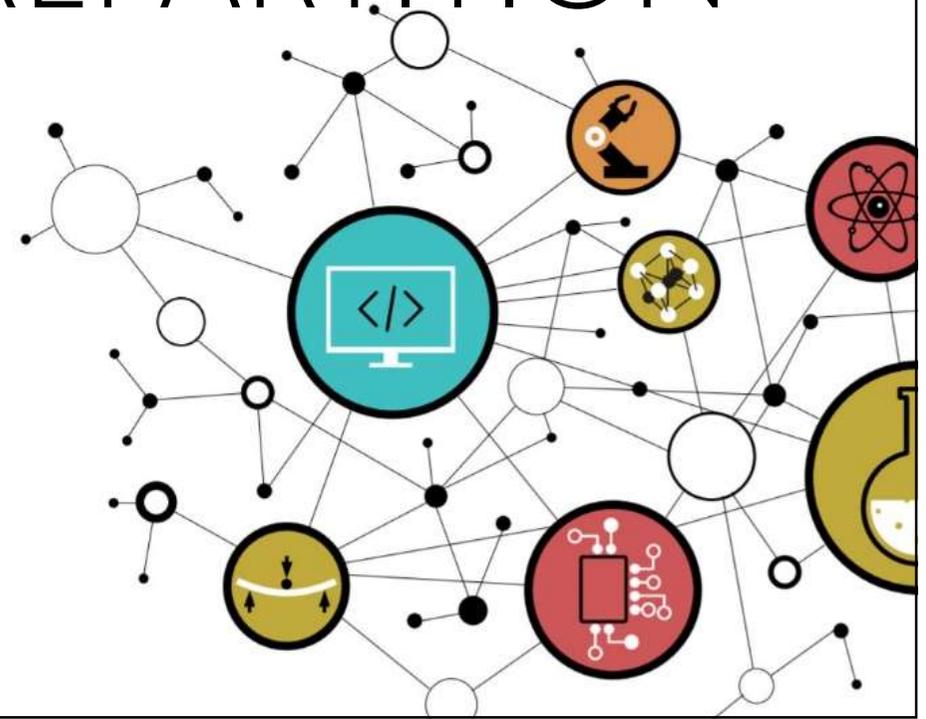


Prenons un exemple de solution innovante, renouvelable et propre pour la production d'énergie électrique (Miroslav Sedlacek, société Vortex Hydrokinetics). Cette solution non invasive (faune et flore) peut travailler sur de très faibles débits d'eau (rivière, ruisseau, etc) sans détériorer le courant et donc le milieu. Il existe deux solutions à la vente, 500W (turbine 320mm) et 5KW (turbine 680mm).



# TRANSPORT

## TRANSPORT ET REPARTITION



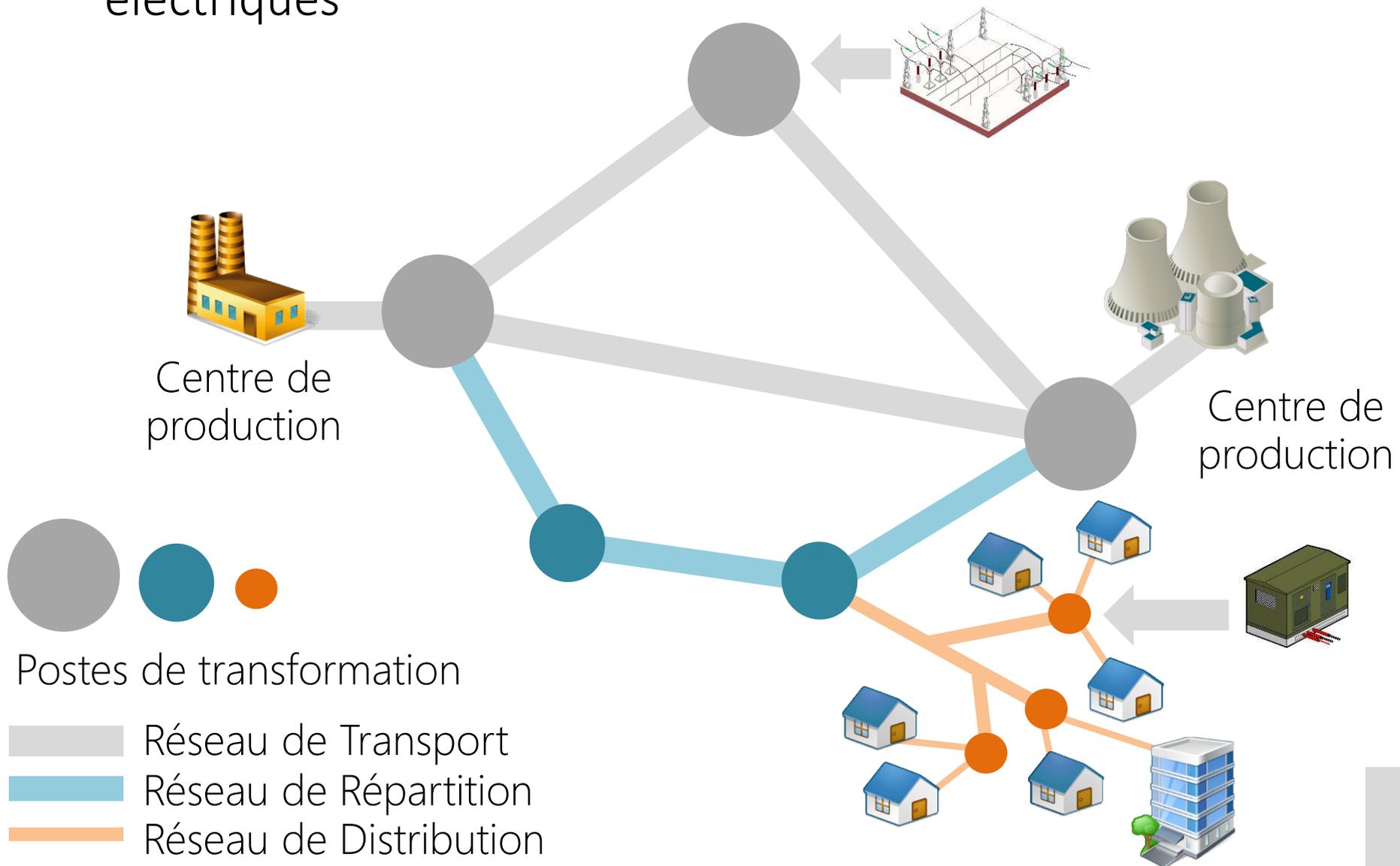
Le réseau électrique représente l'ensemble des infrastructures (transport, distribution, protection, etc) visant à acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs en assurant stabilité et continuité du service



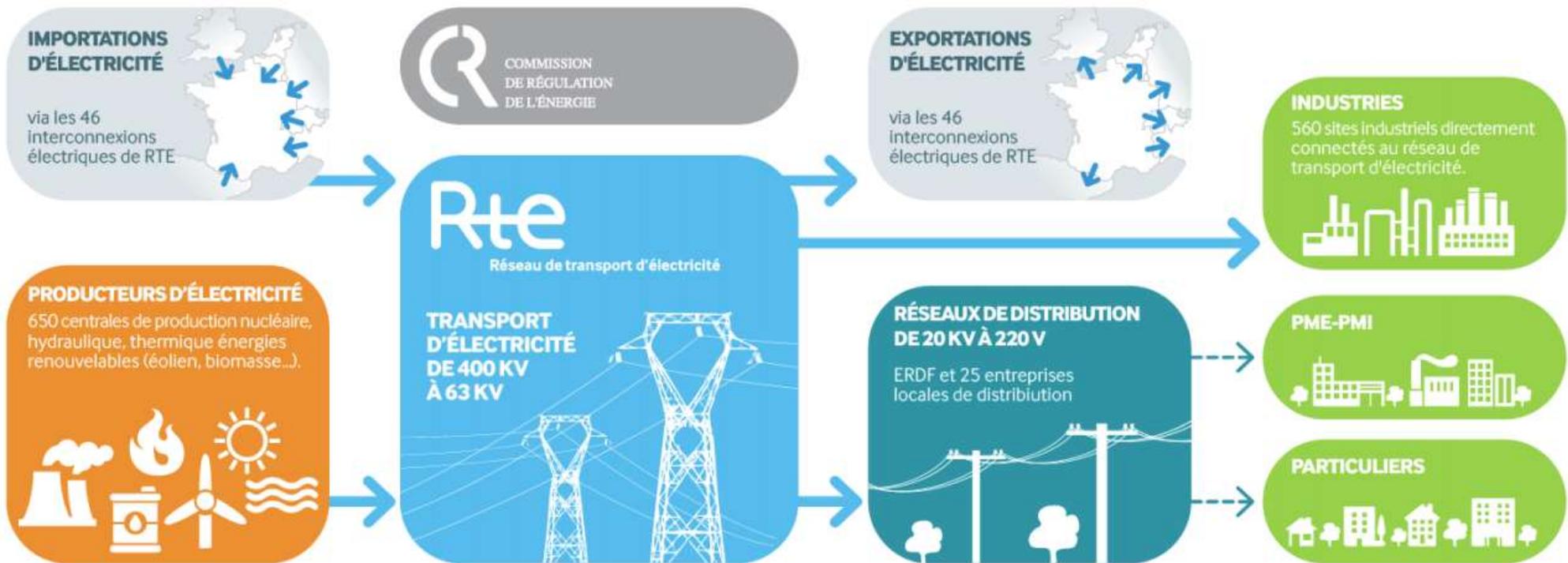
En France, les réseaux électriques peuvent-être divisés en trois sous réseaux

- *Réseaux de transport* : réseaux HTB (topologie maillée) de transport des gros centres de production vers les régions consommatrices (400KV et 225KV en France)
- *Réseaux de répartition* : réseaux HTB (topologie bouclée) assurant la desserte à l'échelle régionale (90KV et 63KV en France).
- *Réseaux de distribution* : réseaux HTA et BT inférieurs à 50KW (topologie en arbre), assurant l'alimentation de la clientèle (hors gros clients)

Prenons un exemple de topologie simplifiée des réseaux électriques



Les réseaux de Transport et de répartition sont gérés par RTE (filiale de EDF et opérateur leader Européen en 2017). Observons où se positionne RTE entre les centres de production et les utilisateurs



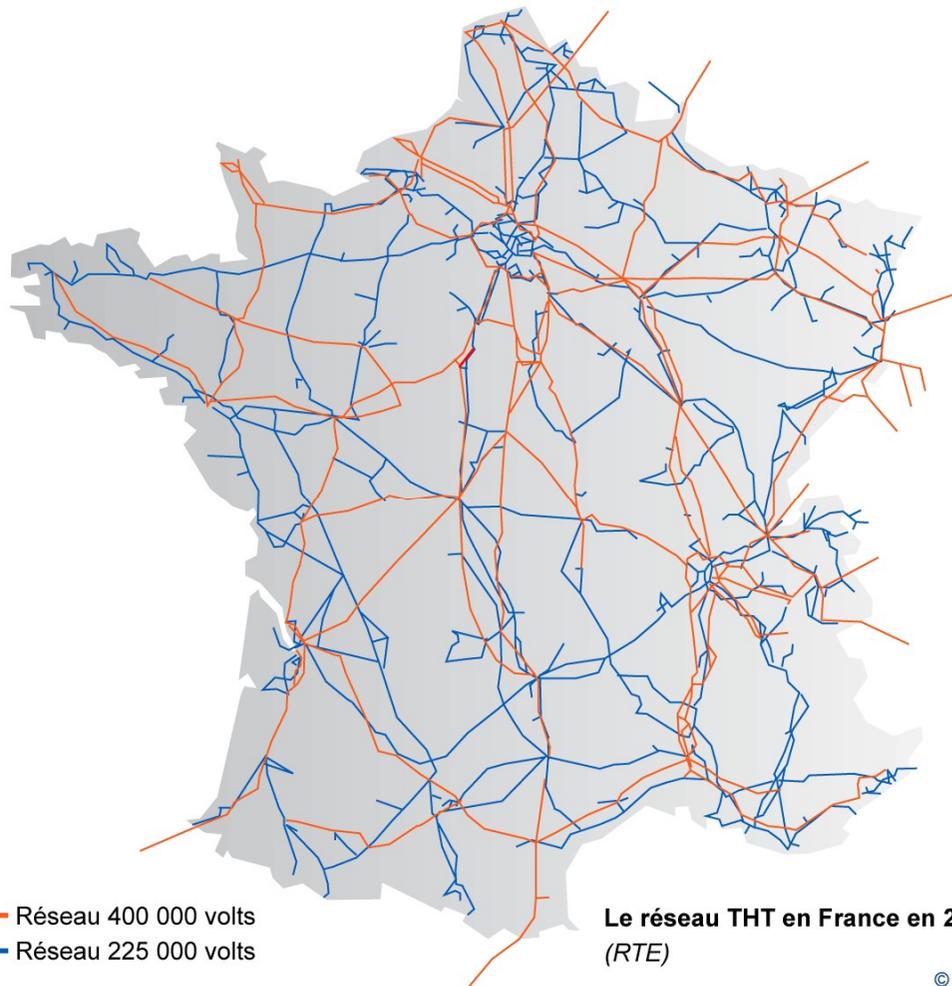
Ces différents réseaux et installations sont repérés par les niveaux de tension normalisés. Observons les standards français

Niveaux de tension normalisés en vigueur en France (UTE C18-510)							
HTB	HTA	BTB	BTA	TBT			
$U_n > 50KV$	$1KV < U_n \leq 50KV$	$500V < U_n \leq 1KV$	$50V < U_n \leq 500V$	$U_n \leq 50V$			
Anciennes appellations encore couramment rencontrées !							
THT	HT	MT	BT				
$U_n > 200KV$	$35KV < U_n \leq 200KV$	$1KV < U_n \leq 35KV$	$U_n < 1KV$				
Niveaux les rencontrés en France							
400KV	225KV	90KV	63KV	20KV	15KV	400V	230V

Réseaux de transport  
et de répartition

Réseaux de distribution

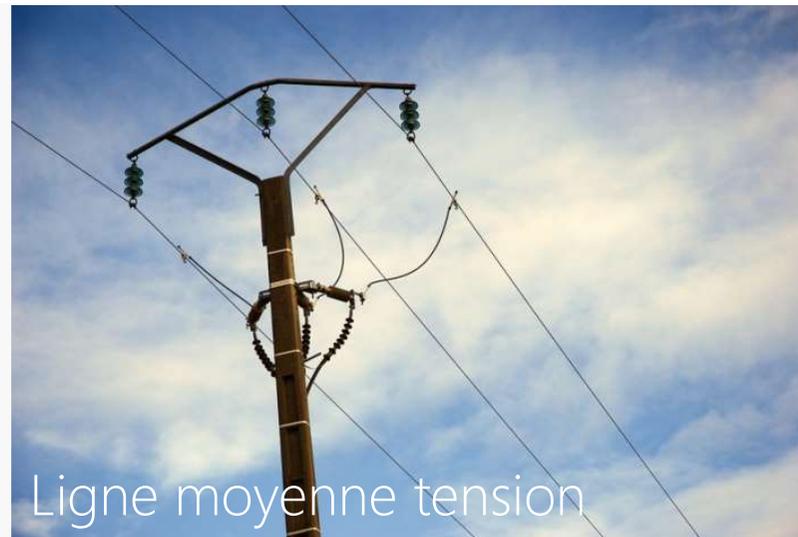
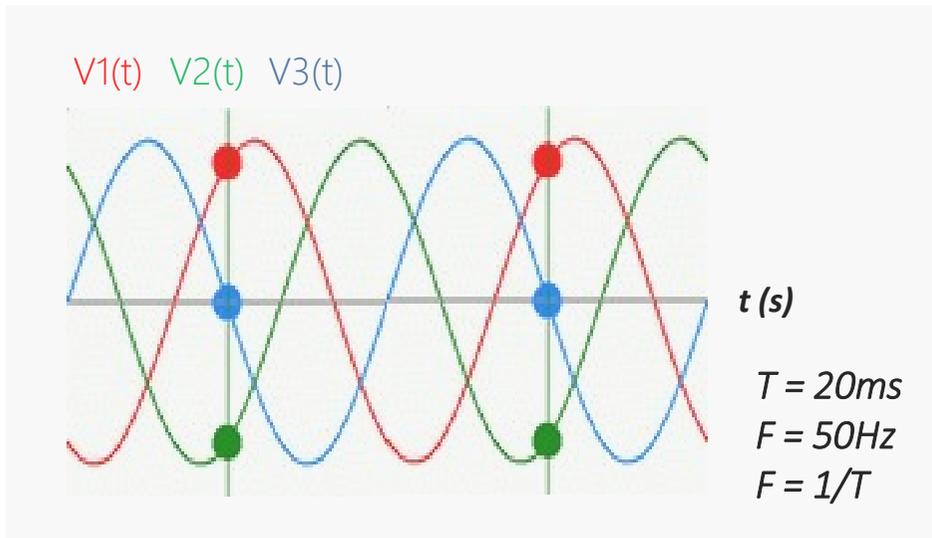
Observons le réseau de transport d'électricité Français. Le transport d'énergie électrique en très haute tension se fait en triphasé alternatif (HVAC)



— Réseau 400 000 volts  
— Réseau 225 000 volts

**Le réseau THT en France en 2013**  
(RTE)

Pour des raisons historiques et technologiques (alternateur synchrone, protection, conversion et transport), le transport de l'énergie électrique se fait le plus souvent en alternatif triphasé (monophasé proche de l'utilisateur). Les tensions imposées sur les réseaux Français sont triphasées sinusoïdales. En France, quel que soit le réseau électrique, toutes les grandeurs travaillent à 50Hz



Les tensions de production sont différentes des tensions de transport. Sur des distances supérieures à quelques kilomètres, il y a nécessité d'élever les niveaux de tension avant de transporter l'énergie électrique

- *Limitation des pertes* par effet Joule (échauffement des lignes)
- *Réduction des chutes de tension en ligne*
- *Amélioration de la stabilité* des réseaux (plus faible sensibilité aux perturbations)

Les pertes par effet Joule liées au transport (échauffement des conducteurs) représentent chaque année près de ~2,5% de la consommation globale du pays, soit ~15TWh perdus. De façon générale, 7% de l'énergie produite s'échappe en pertes chaque année en France (source UFE)

A puissance utile transportée ( $P$ ) correspondant à un besoin à un instant donné, en élevant la tension ( $U$ ) nous limitons les pertes par effet Joule ( $P_J$ ). Exemple pour un système triphasé équilibré de courants.  $R$  représente la résistance des matériaux utilisés pour le transport

$$P_J = R \cdot I^2 = R \cdot \left( \frac{P^2}{3 \cdot U^2} \right)$$

Un second point de travail pour la diminution des pertes en ligne est de jouer sur les matériaux utilisés. Utilisation d'alliage d'aluminium pour le transport aérien (ratio poids/résistivité) voire de cuivre pour le transport souterrain (proche de l'utilisateur). Utilisation de faisceaux de conducteurs multibrins pour palier à l'effet de peau inhérent à l'utilisation de grandeurs alternatives 50Hz

$$R = \rho \cdot \left( \frac{l}{S} \right)$$



Faisceau souterrain



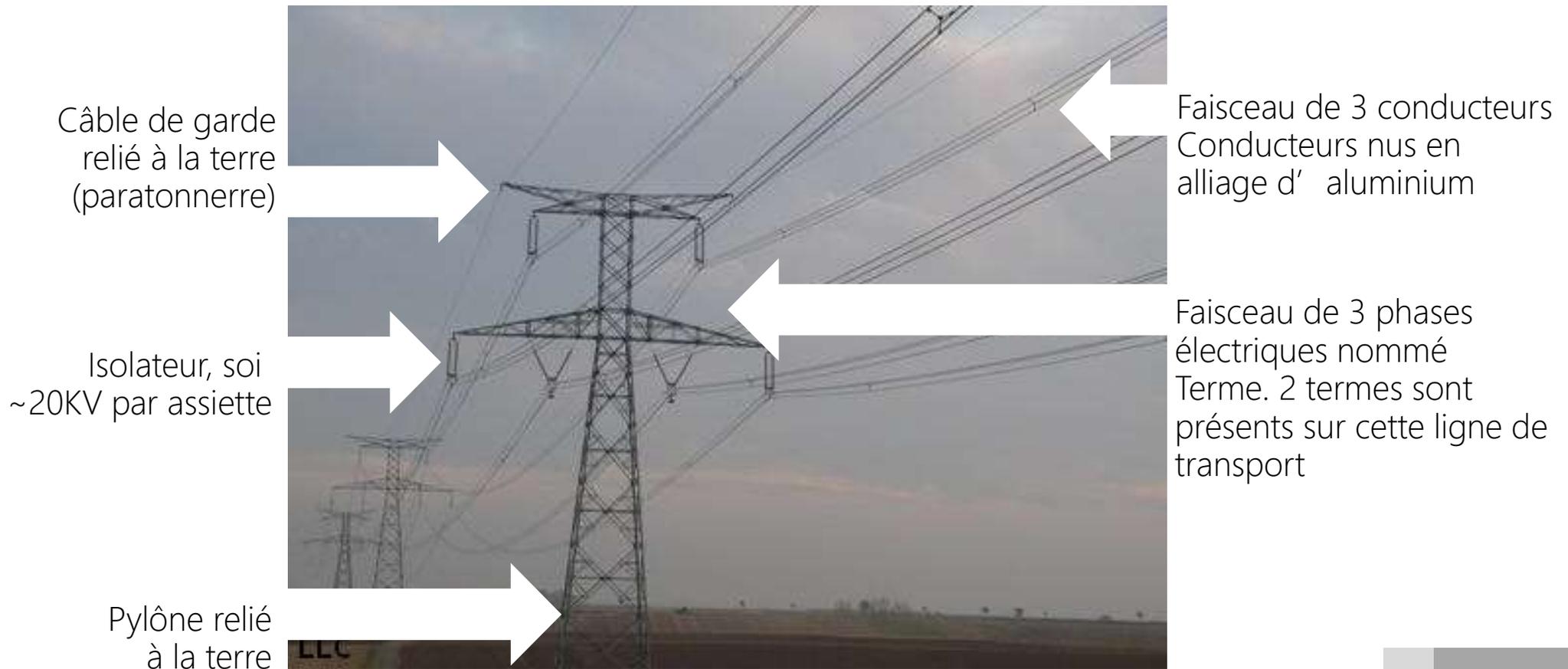
 Nexans

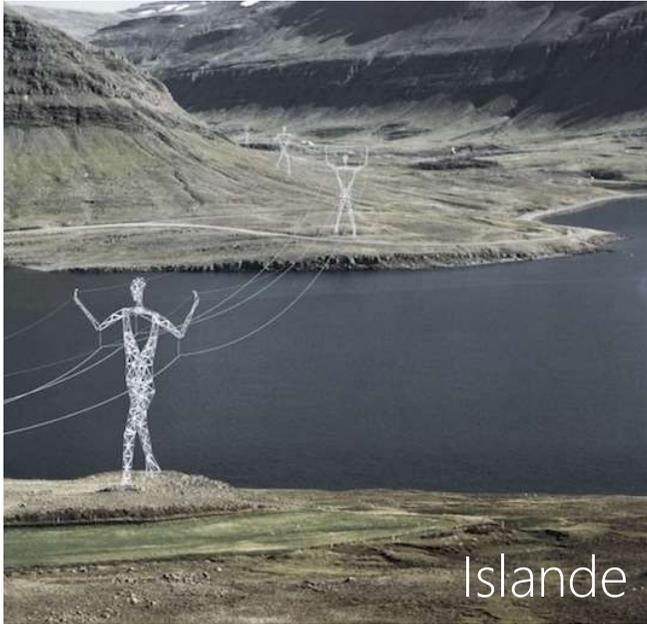
Nexans, un des leader mondiaux du câble



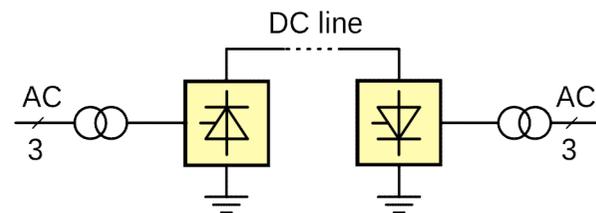
Câble aérien

Observons une ligne 400KV sur le réseau RTE. Par exemple celle présente au sud de Caen et arrivant de Flamanville





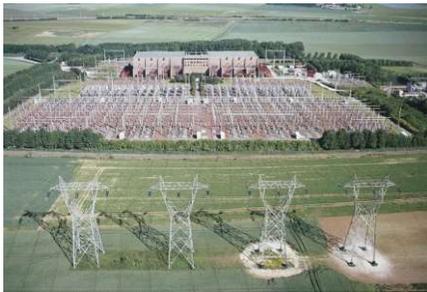
Certaines solutions actuelles de transport se font en courant continu via électronique de puissance (HVDC). En transport sous-marin ou au delà d'une certaine distance en aérien, il devient moins coûteux et plus efficace de transporter l'électricité en continu (~500-1000km en aérien)



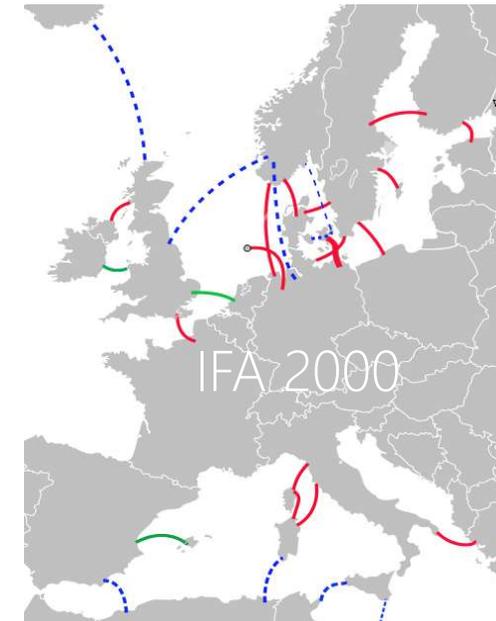
- Diminution du nombre de conducteur. 1 faisceau HVDC peut remplacer 3 faisceaux HVAC avec sections de câbles plus faibles
- Interconnexion entre pays LLC (adaptions fréquences et tensions différentes), éolien off-shore (VSC), etc
- Pas de compensation de puissance réactive liée au caractère capacitif des lignes en haute tension

### Exemples de transport d'électricité par HVDC

- Liaison France-Angleterre, IFA 2000 (Interconnexion France Angleterre 2000 MW).



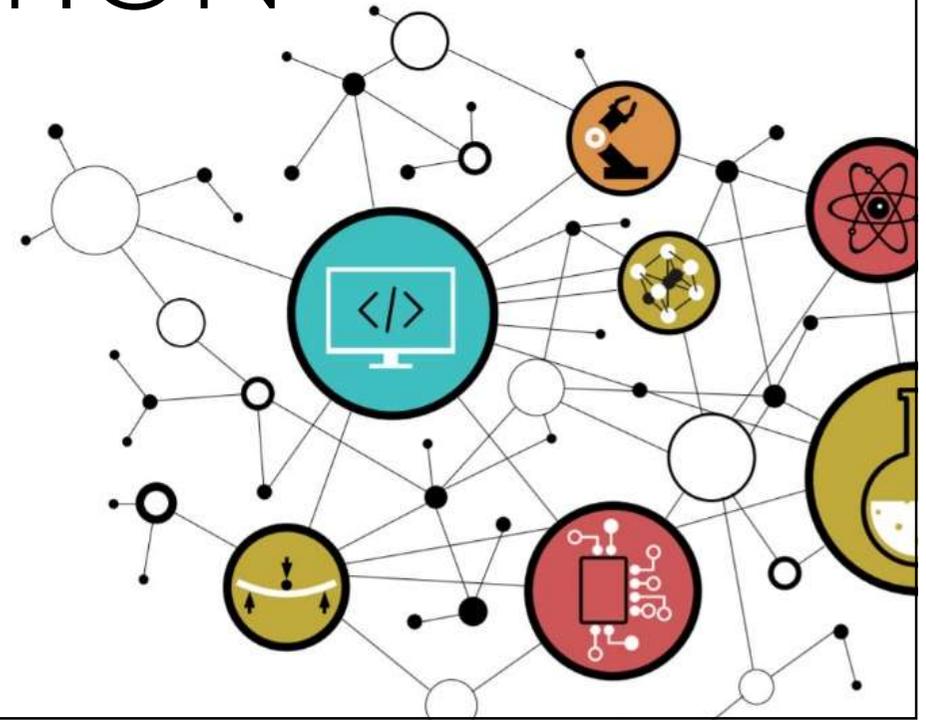
Convertisseur à Thyristors  
IFA 2000



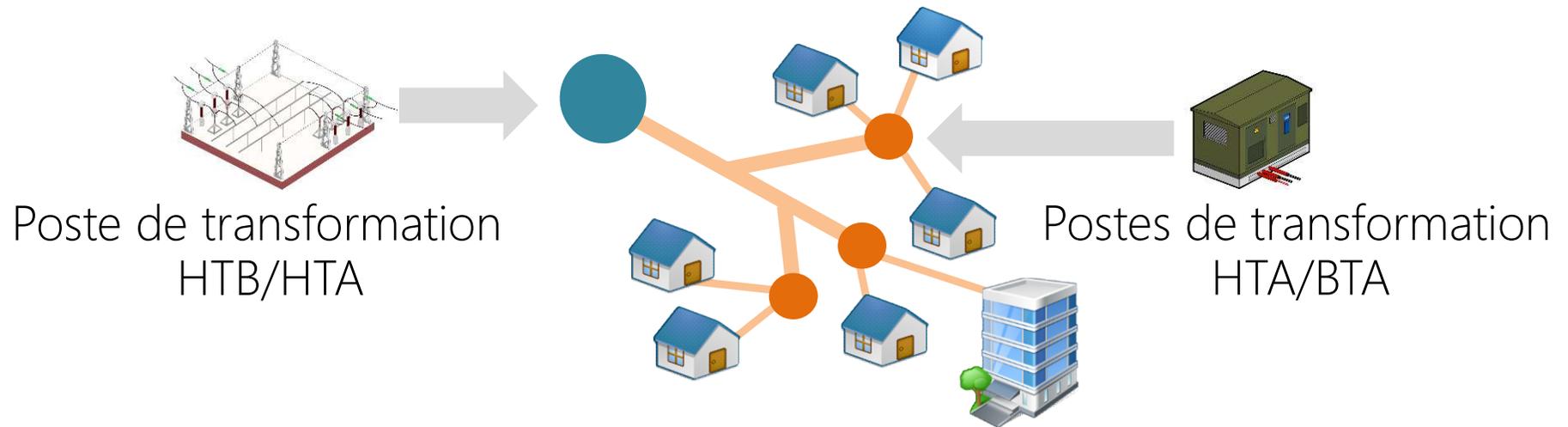
- Barrage des Trois-Gorges, Ligne de 1400km construite par Siemens pour une capacité de 5GW. 2 pylônes DC remplacent 5 pylônes AC

# TRANSPORT

# DISTRIBUTION

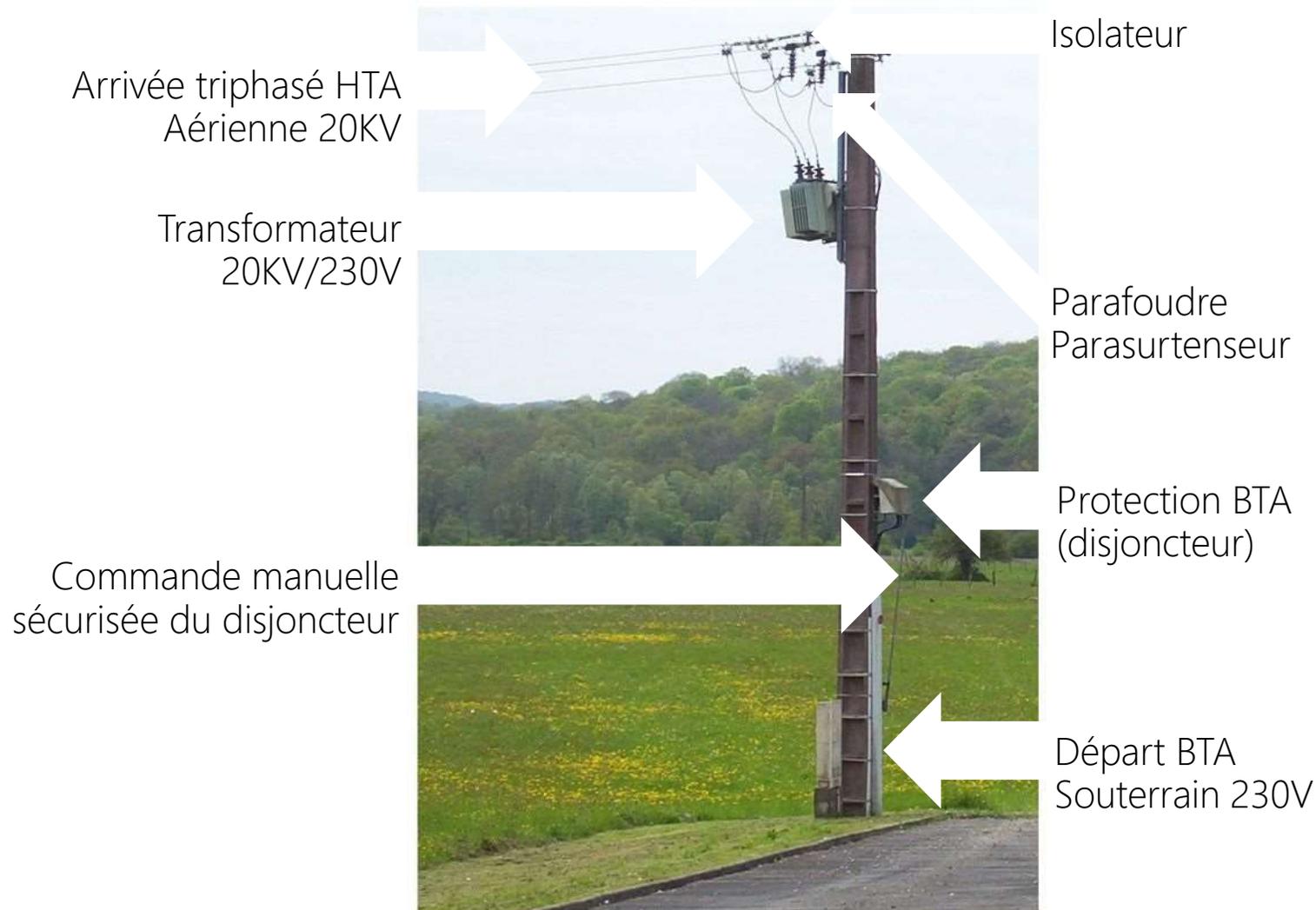


Les réseaux de distribution sont basés sur une topologie en arborescence. Rappelons les 4 niveaux de tension rencontrés en France (20KV, 15KV, 400V et 230V)



- *Topologie moins coûteuse* et adaptée à la distribution du service
- *Topologie moins robuste*. Un défaut sur une ligne moyenne tension, entraînera la coupure du service pour les clients en aval

Observons un poste de transformation 20KV/230V sur poteau présent en milieu rural (HTA/BTA)

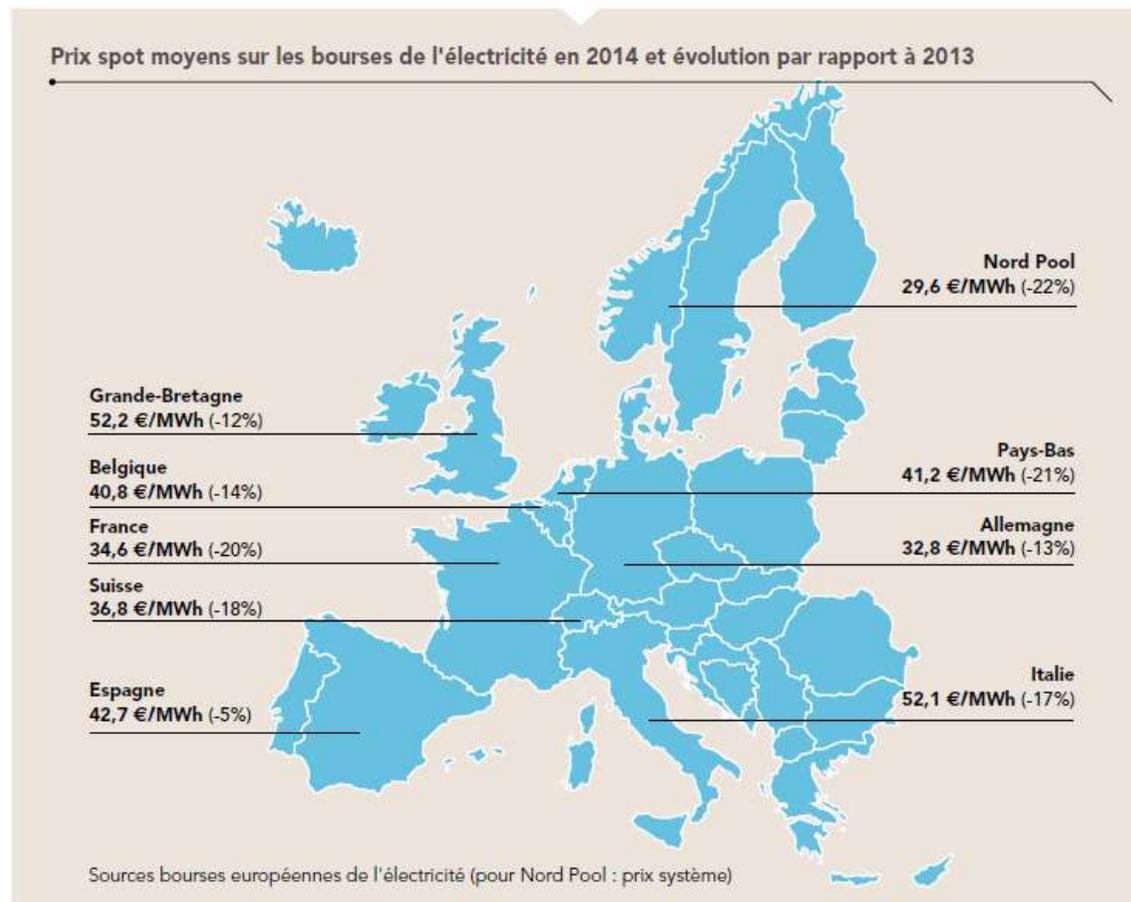


Avec 95% des réseaux publiques de distribution, le principal gestionnaire des réseaux de distribution en France est *Enedis*, anciennement *ERDF* (premier distributeur d'électricité en Europe en 2017, filiale de EDF). Ses principaux concurrents Français en 2015 sont *Direct Energie* et *Engie*

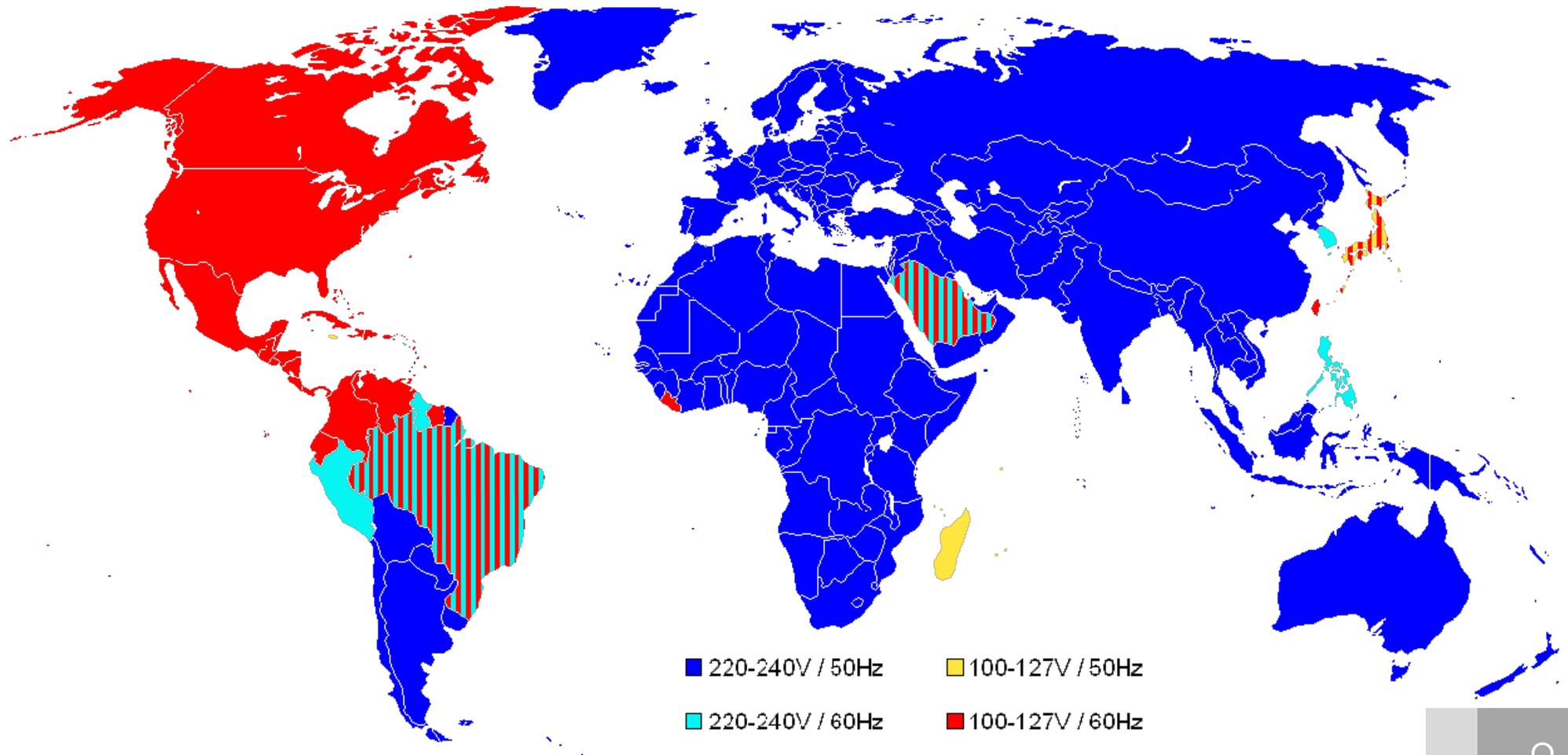
The logo for Enedis, featuring the word "ENEDIS" in a stylized blue font with a green accent on the "e". Below it, the tagline "L'ELECTRICITE EN RESEAU" is written in a smaller blue font.

**ENEDIS**  
L'ELECTRICITE EN RESEAU

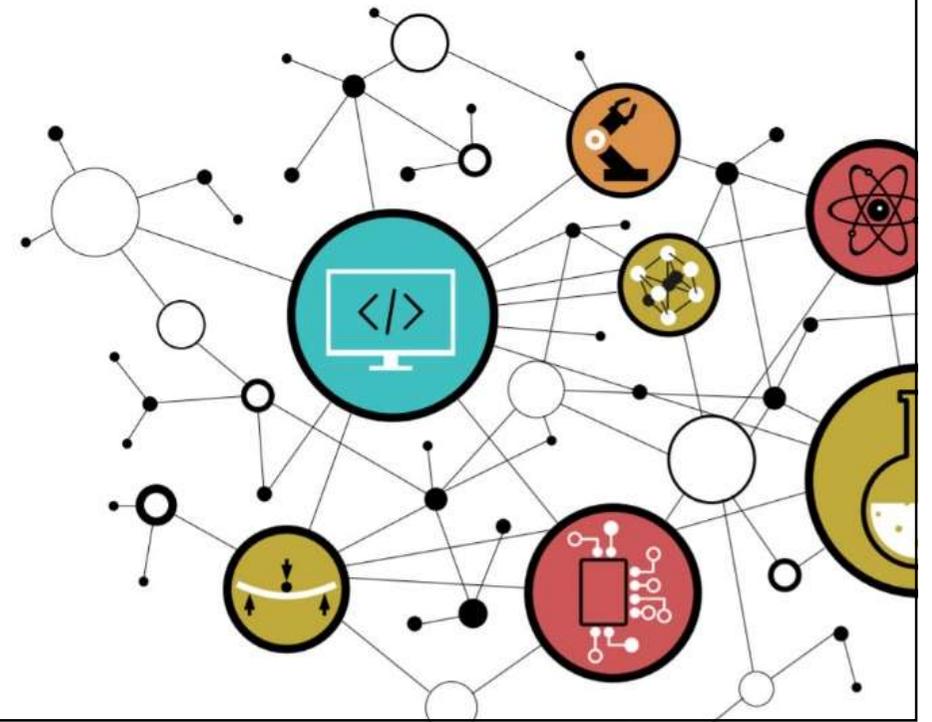
Pour information, la France étant l'un des principal acteur mondial autour de l'énergie, le coût de l'énergie électrique reste notamment relativement faible en France par rapport au reste de l'Europe



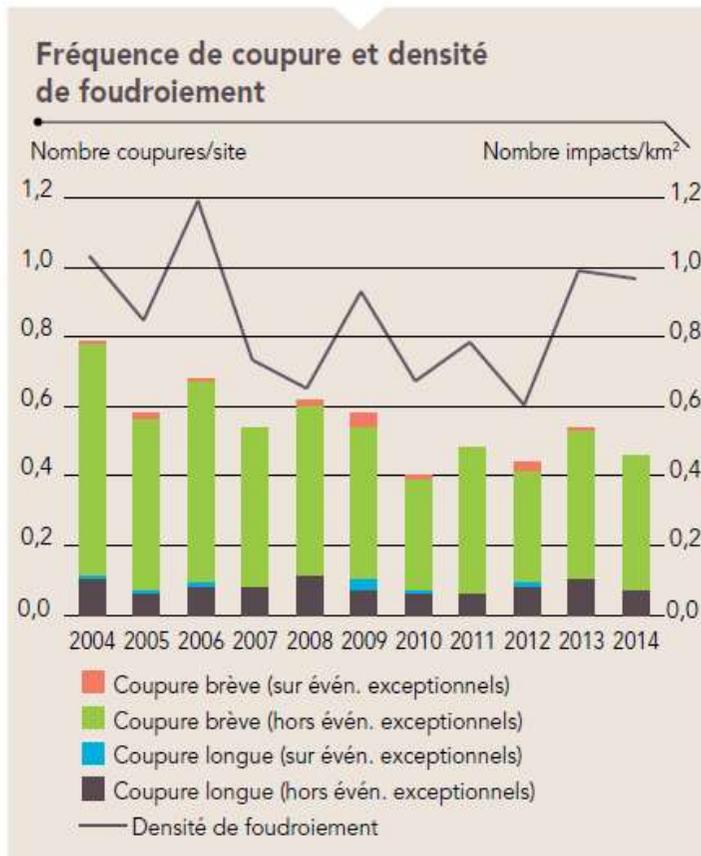
Observons les gammes de fréquences et de tensions en services en basse tension de part le monde



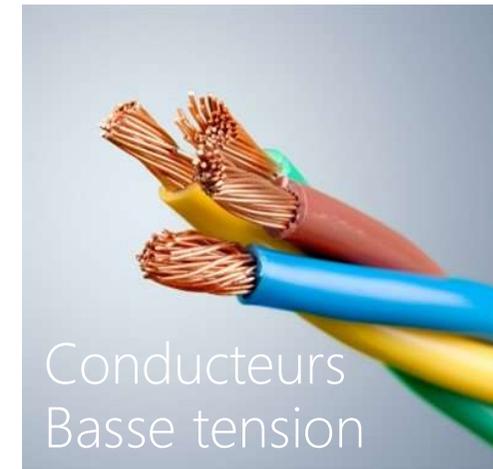
# PROTECTION



Intéressons-nous à la protection électrique des *biens* (lignes, transformateurs, appareillages domestiques, etc) et des *personnes*.  
A titre indicatif, chaque année le réseau 400KV subi en moyenne 2,5 défauts pour 100Km de ligne et près de 150 sous 20KV (source RTE)



La *protection des biens* connectés aux réseaux (appareils domestiques, systèmes électroniques, etc) ou présents sur les réseaux (transformateurs, alternateurs, etc), passe notamment par l'ajout de matériel de protection non-intrusifs. L'objectif étant d'assurer une protection aux appareillages ainsi que la sécurité, la stabilité et la continuité du réseau



La *protection des personnes* s'intéresse à la sécurité des personnes entrant en contact avec le réseau. A notre époque, les installations électriques tuent toujours. En 2015 l'électricité serait responsable d'environ 60 électrocutions (décès), 3000 électrisations (incident sans décès) et d'un quart des 200 000 incendies provenant en moyenne chaque année dans les 35 millions de logements (source ONSE - Observatoire National de la Sécurité Electrique)

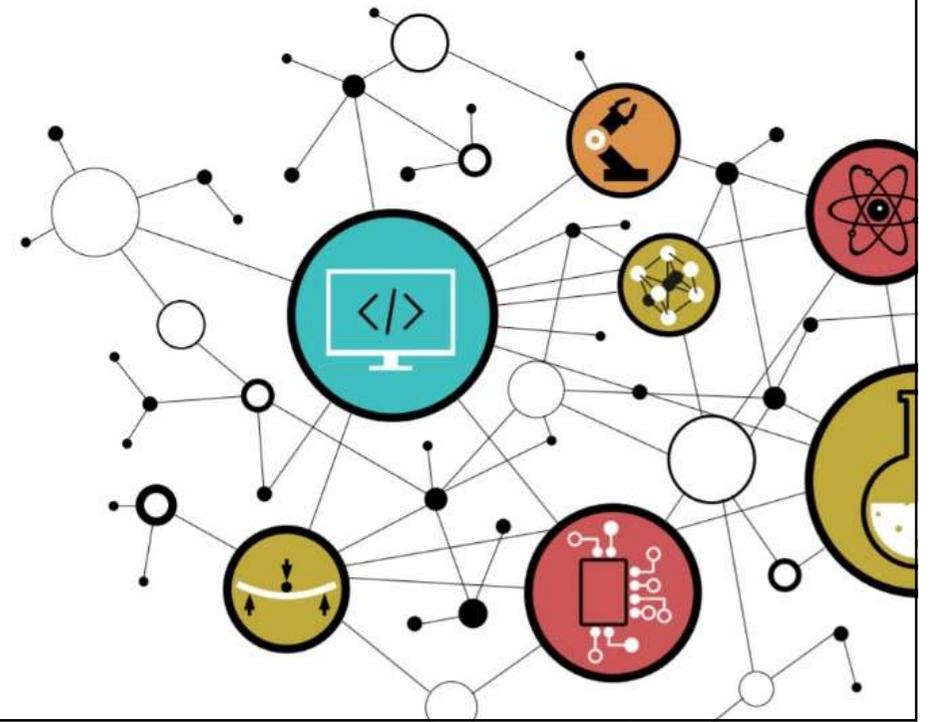


En cas d'erreur humaine, de défaut matériel, d'incident climatique, la protection des biens et des personnes est principalement assurée par les aspects suivants

- *Appareillages de protection* : disjoncteur, disjoncteur différentiel, sectionneur, etc
- *Régimes de neutre* : *TT* chez les particuliers, *IT* milieux critiques (hôpitaux), etc
- *Habilitation électrique* : B0, B0V, B1, B1V, etc. Formation et certification au respect des normes, procédures de sécurité, maîtrise des risques, etc

# PROTECTION

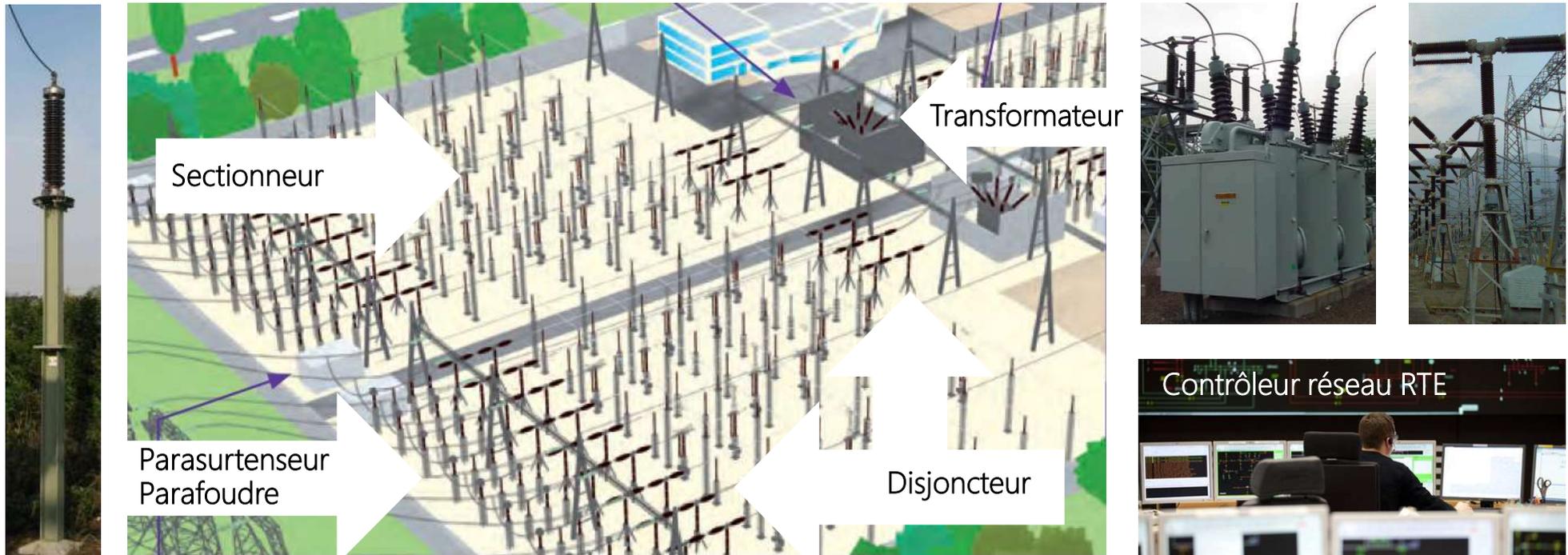
## PROTECTION DES BIENS



La protection des biens intervient aussi bien sur les réseaux HTB que les réseaux BTA. Les principaux appareillages de protection ou d'isolement sont les suivants

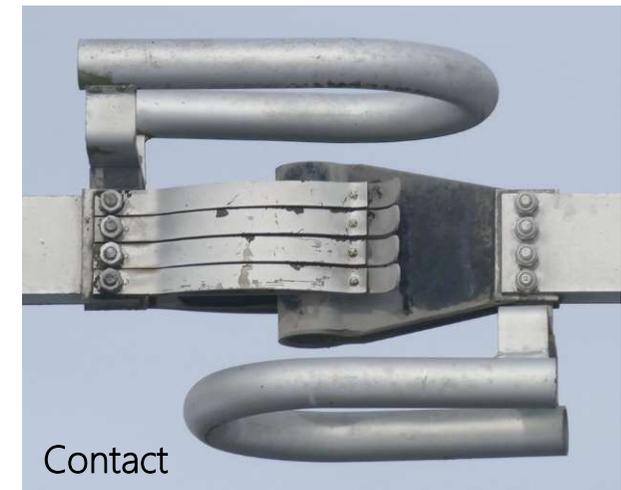
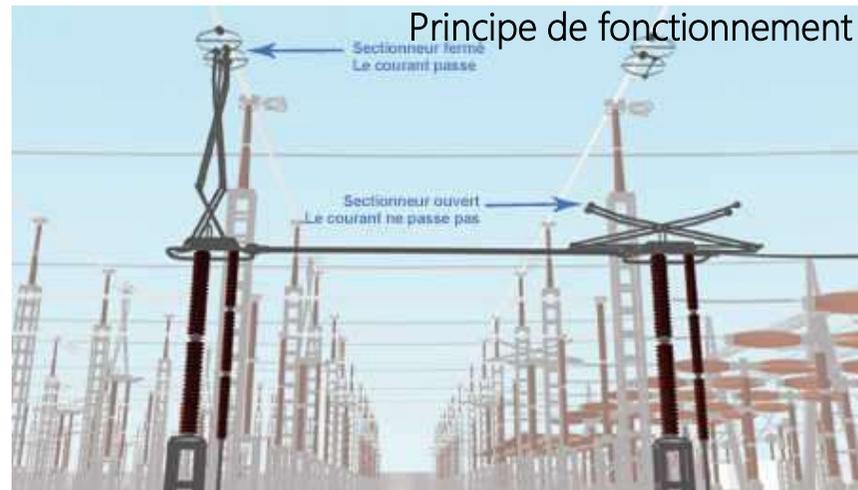
- *Disjoncteur* (pouvoir de coupure)
- *Sectionneur* (sans pouvoir de coupure)
- *Interrupteur* (pouvoir de coupure)
- *Contacteur* (pouvoir de coupure)
- *Fusible* (pouvoir de coupure)

Observons les appareillages et fonctions d'un poste de transformation électrique haute tension : *transformation, routage, protection, isolement et supervision*

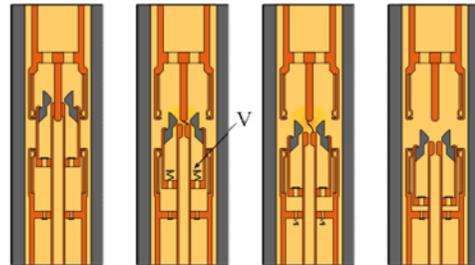
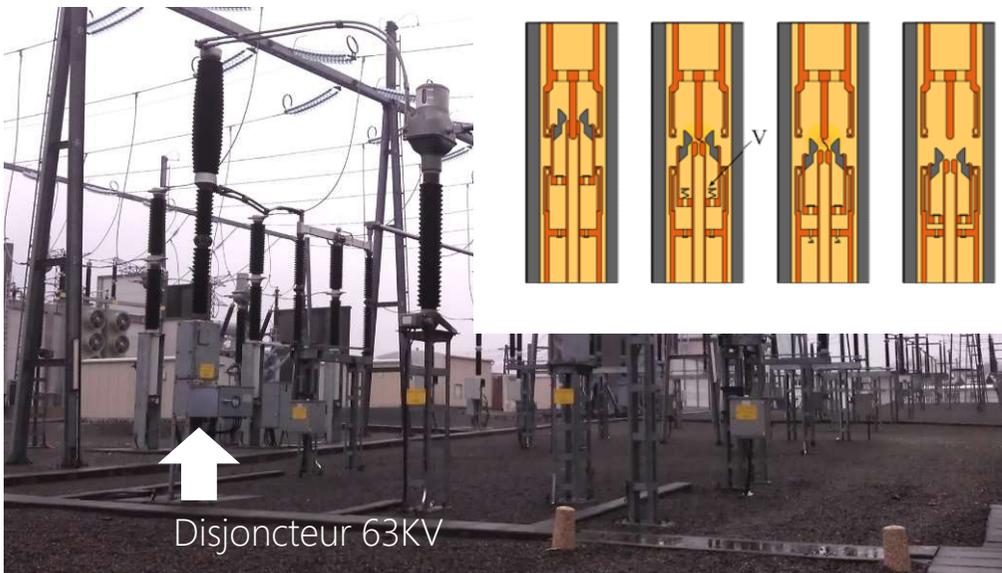




Le *sectionneur* est un appareillage d'aiguillage et de protection essentiel présent dans les postes de transformation haute tension. Architecturés sous forme de matrice d'interconnexion, ils assurent le routage de l'énergie d'un réseau à un autre (pic de consommation, discontinuité, maintenance, etc). Il a un rôle d'isolement mais ne possède aucun pouvoir de coupure.



Le *disjoncteur* est l'un des principaux éléments de protection d'appareillages électriques. Les disjoncteurs sont réarmables et assurent une protection contre les surcharges en courant voire les court-circuits.



Disjoncteur Legrand  
230V 16A

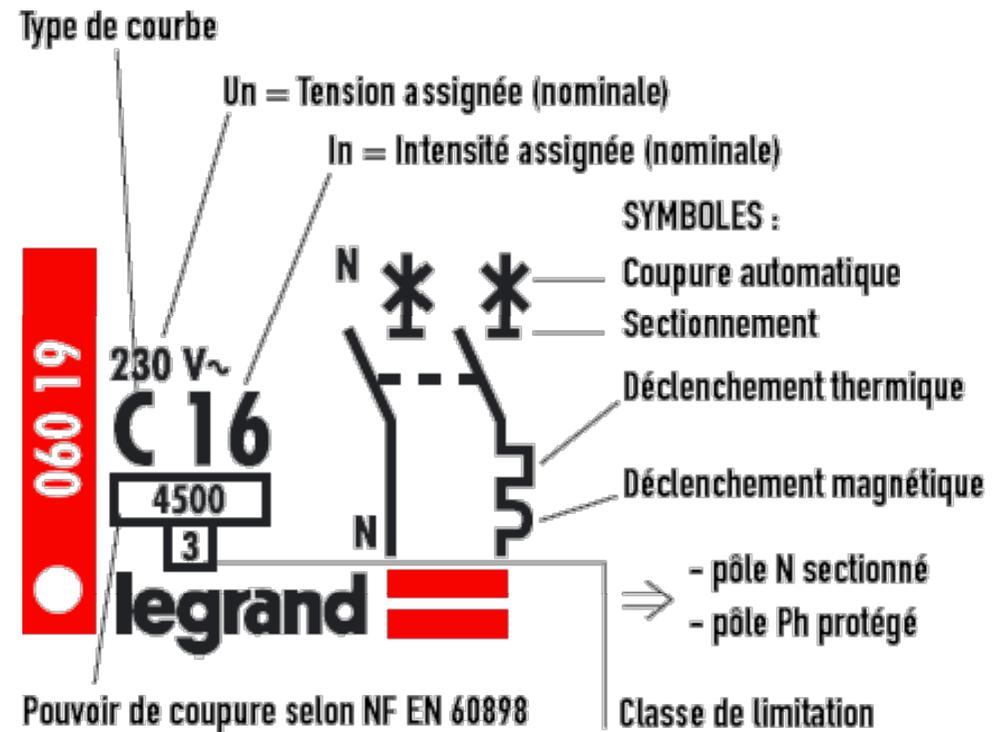


En 2010, *Alstom Grid (actuellement GE power)* et *Schneider Electric* ont fait l'acquisition de *Areva T&D* (~30% de Areva en 2008), le leader mondial dans les domaines de la transmission et de la distribution d'électricité (~1800 Salariés)



Usine de Villerbanne, fabrication de disjoncteurs

Prenons l'exemple d'un disjoncteur travaillant en basse tension, typiquement installé chez des particuliers. Observons les informations inscrites en face avant

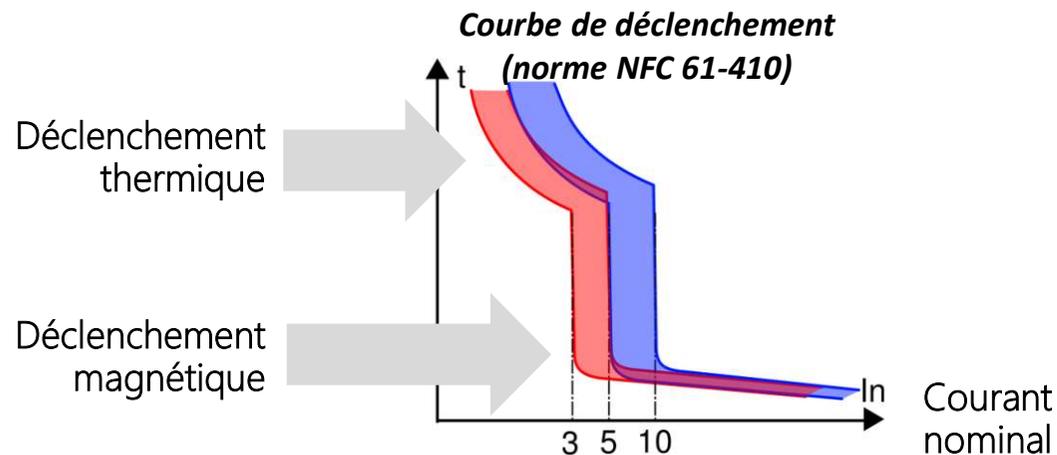


En 2017 *Legrand* est le leader mondial sur les marchés des infrastructures électriques et numériques du bâtiment (interrupteurs, prises, produits de cheminement de câbles, etc)

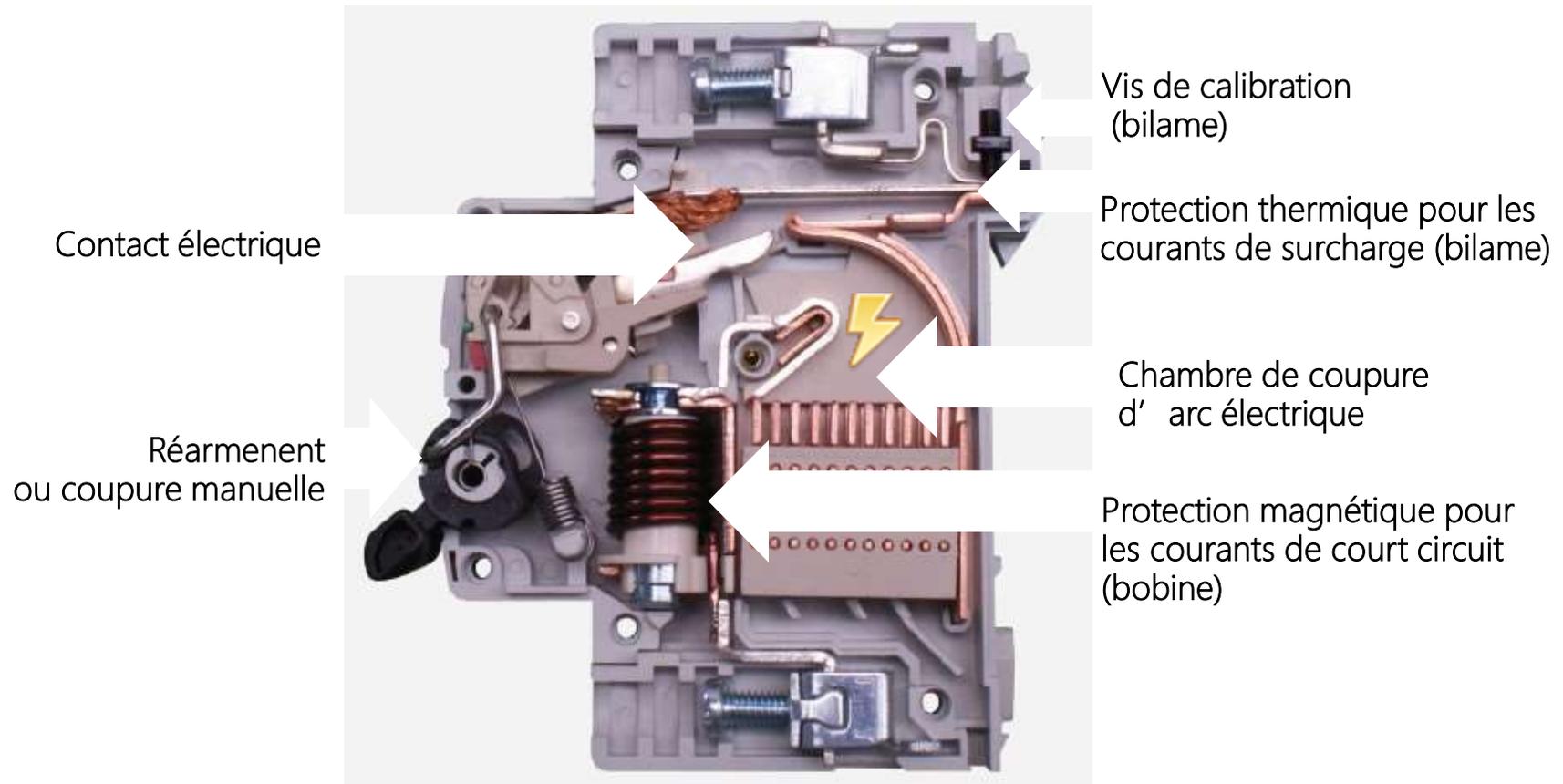


Un disjoncteur est un dispositif électromécanique permettant d'interrompre la circulation du courant électrique en cas d'incident. Contrairement au fusible, il est réarmable. En basse tension, il est capable d'interrompre deux types de défauts :

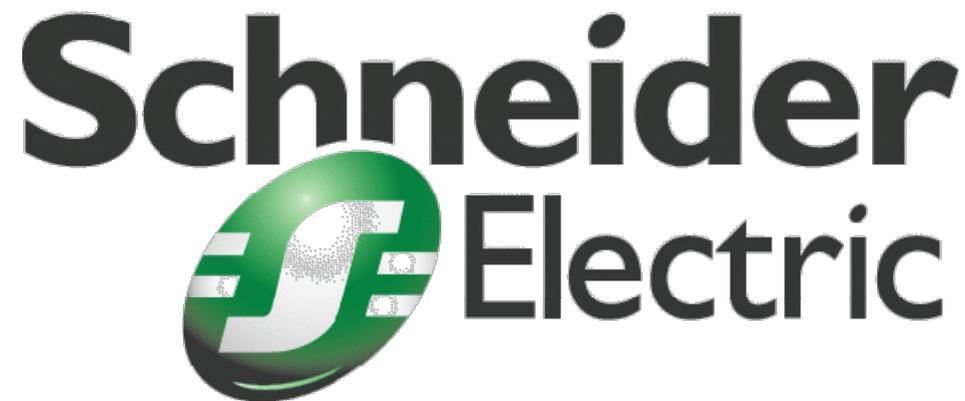
- Courant de *Surcharge* (déclencheur thermique - bilame)
- Courant de *Court-circuit* (déclencheur magnétique - bobine)



### Etudions la structure interne d'un disjoncteur domestique

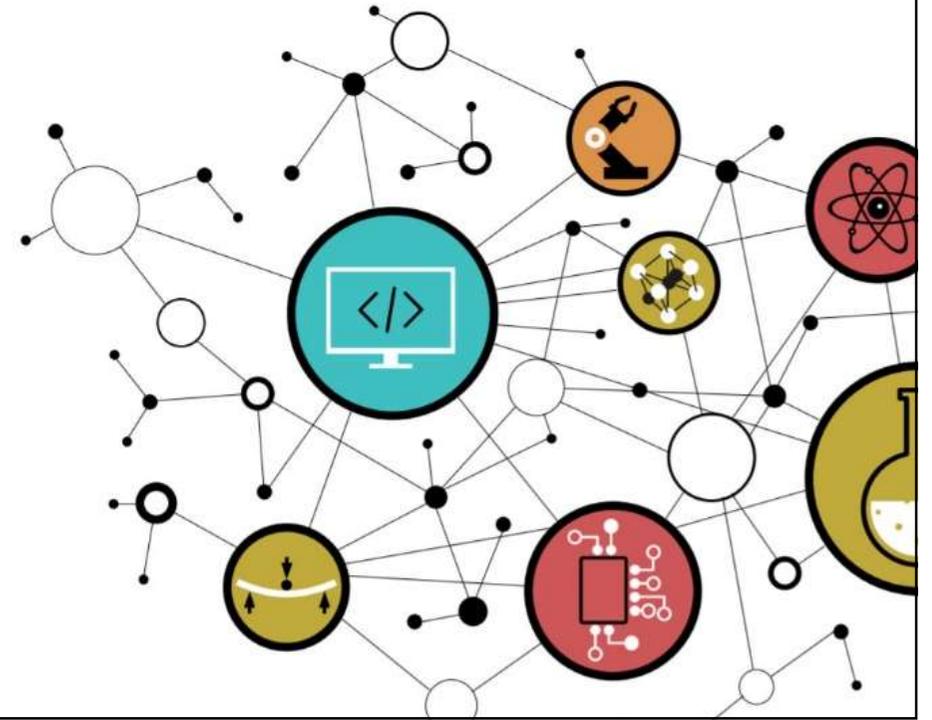


En 2015, la société Française *Schneider Electric* figure parmi les premiers fabricants mondiaux d'équipements de distribution électrique basse et moyenne tension, d'automatismes industriels et d'équipements de protection électrique. Suite au rapprochement du groupe avec le britannique AVEVA, il devient en 2017 le leader mondial des logiciels industriels et d'ingénierie



# PROTECTION

## PROTECTION DES PERSONNES



Observons les différentes gammes de courants alternatifs pouvant être dangereuses pour un être humain. Les valeurs présentées ci-dessous sont légèrement plus élevées pour des grandeurs continues

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

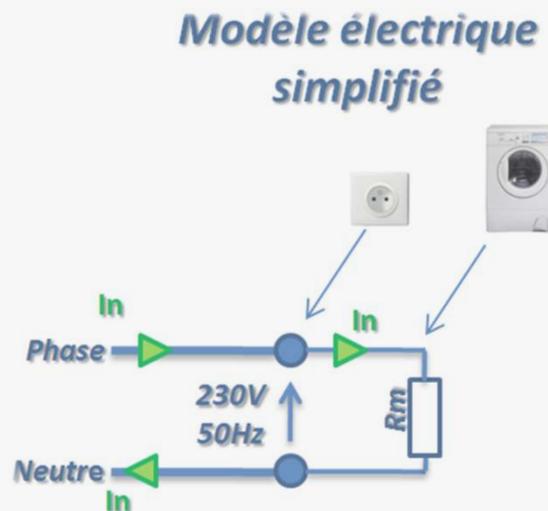
Le corps humain étant essentiellement constitué d'eau (~60%). La résistance au passage du courant dans le corps humain dépend essentiellement de notre peau (~95%). Observons les principaux facteurs aggravants

- *Epaisseur* de la peau (dépend des activités de l'individu)
- *Humidité* (salle de bain, cuisine, etc)
- *Surface* et *pression* de contact

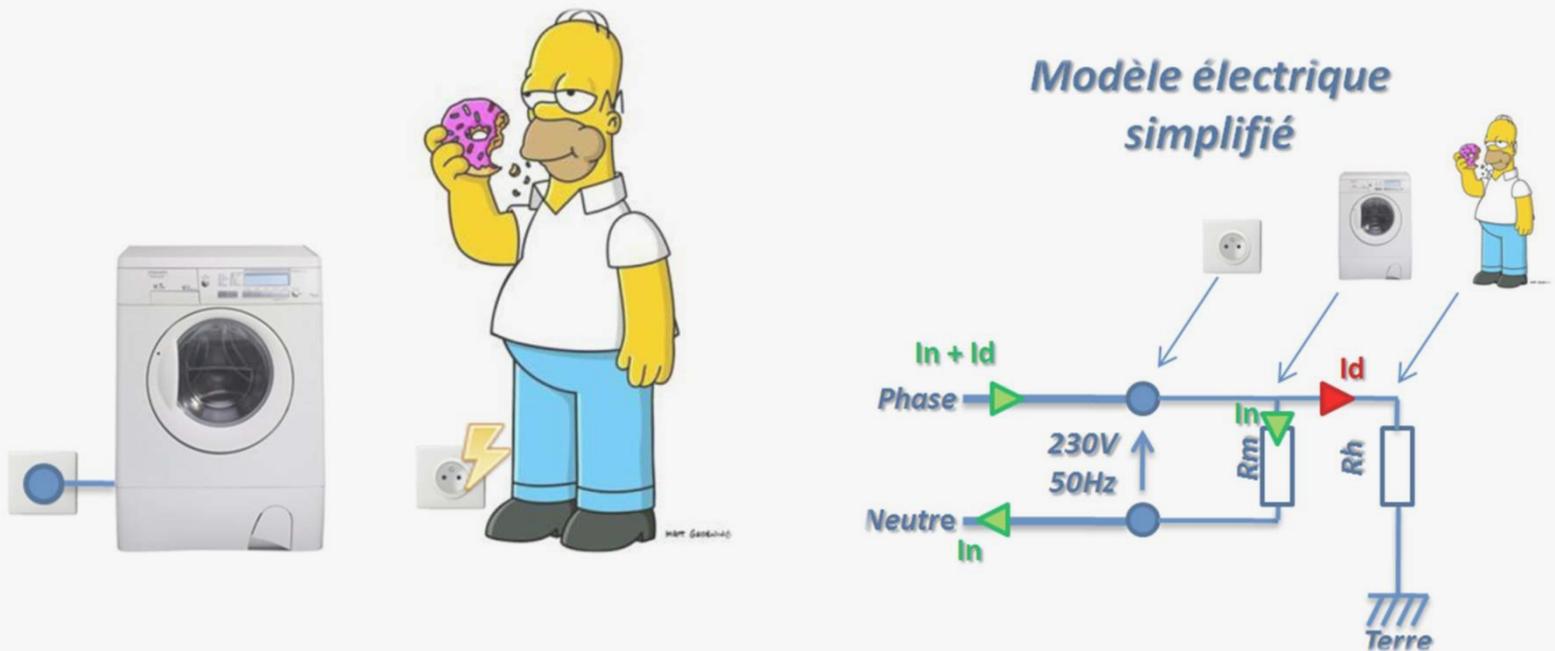


La résistance relative au corps humain avoisine en moyenne  $1K\Omega$

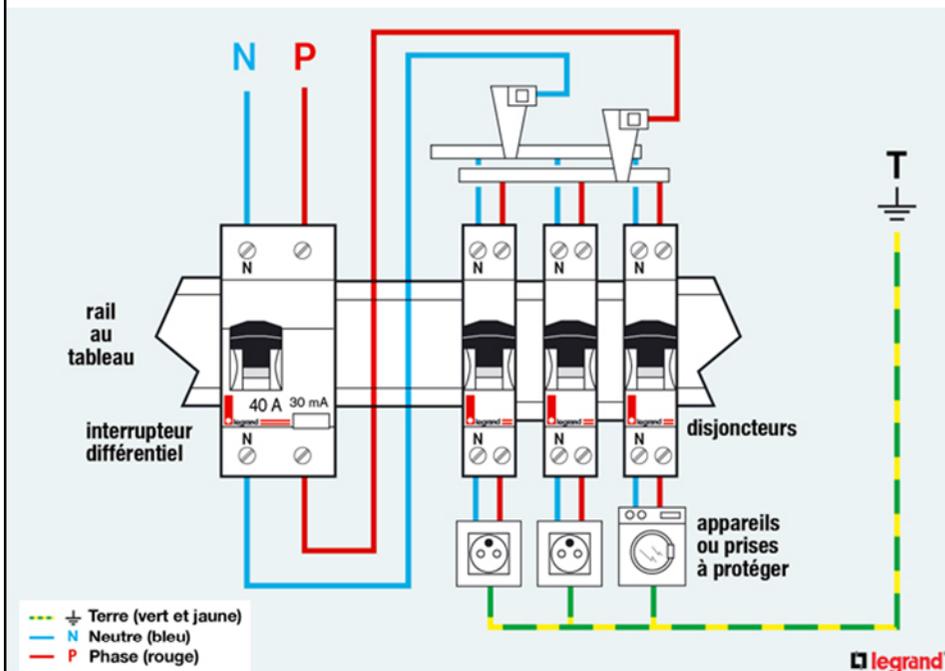
Prenons un exemple du quotidien et observons les sécurités déployées dans un milieu domestique afin d'assurer la sécurité des personnes. La norme NF C15-100 réglemente les installations électriques en basse tension en France



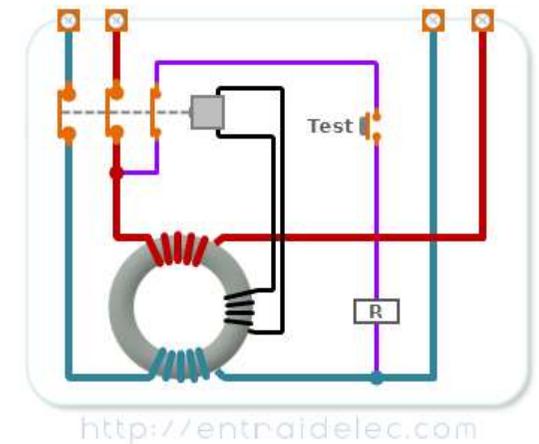
En cas de contact le réseau, le courant cherchera le chemin le plus court pour se rendre à la terre. Exemples de précaution, utiliser toujours la main droite pour toute manipulation (cœur à gauche), utiliser des chaussures offrant un bonne isolation avec le sol voire des gants, couper le disjoncteur différentiel en amont, etc



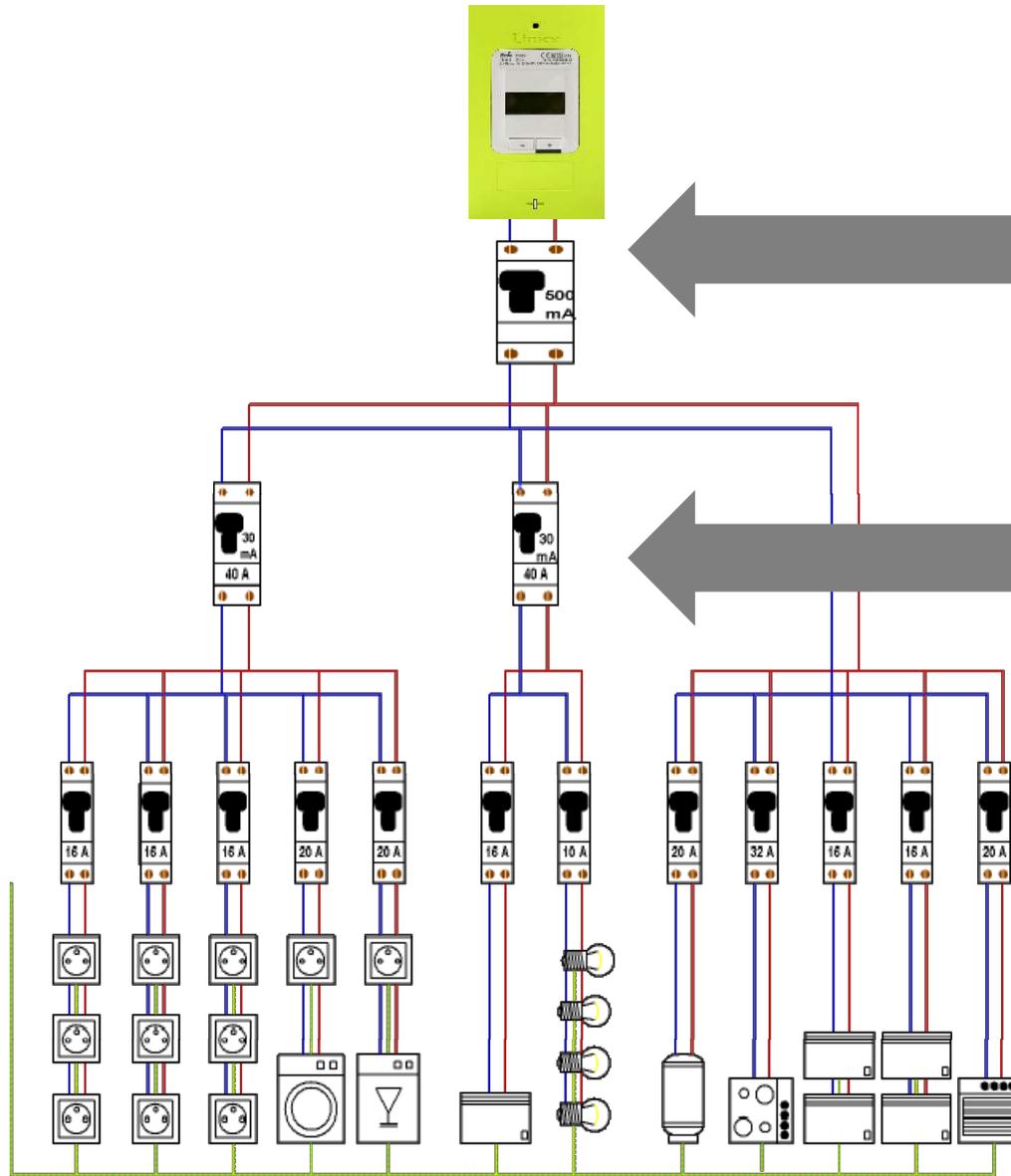
Il existe un réel danger pour l'homme à travailler sans protection sur les réseaux BTB (230V - 50Hz). Le principal appareillage de protection à votre domicile en cas d'incident est le *disjoncteur différentiel*. En complément d'une protection en cas de surcharge, son rôle est d'assurer une coupure en cas de mesure d'une différence de courant entre phase et neutre supérieure à 30mA



Disjoncteur Legrand 40A (surcharge) et différentiel 30mA



Prenons l'exemple d'une 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)



Prenons quelques exemples de protection d'opérateurs RTE et Enedis en services sur des lignes en hautes et moyennes tensions. Ces opérateurs ont en possession une habilitation électrique

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



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



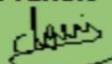
Coupure du réseau en amont et mise à la terre par sécurité (hors tension)



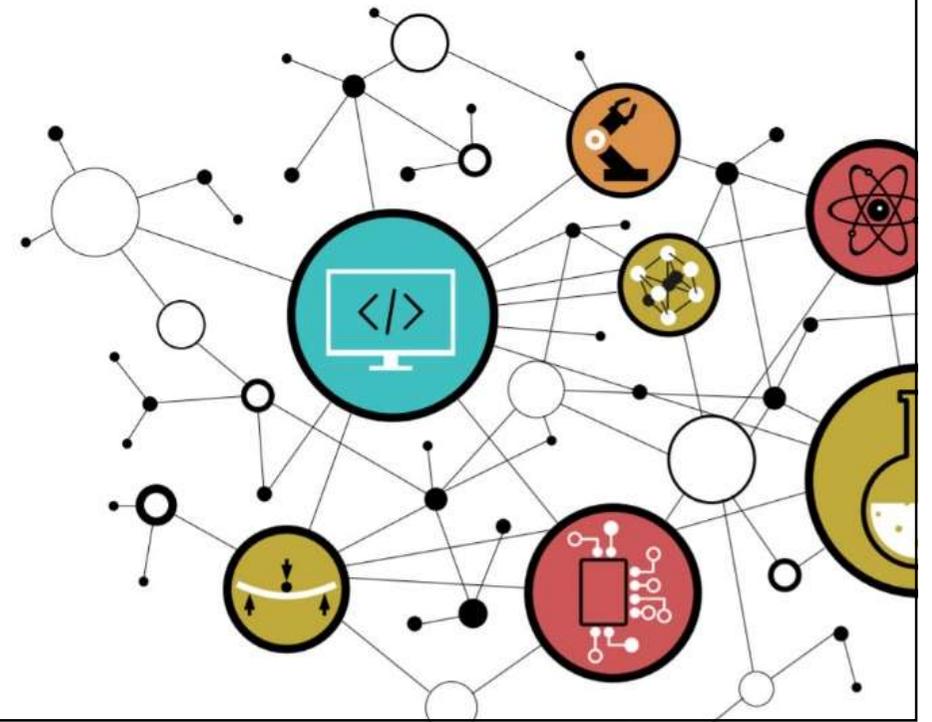
Distances de sécurité pour isolation durant la maintenance (sous tension)

*L'habilitation électrique* (B0, B0V, B1, BC ...) est la reconnaissance de la capacité d'une personne à opérer en toute sécurité sur différents réseaux électriques (B=TBT-BT, H=HT). Cette habilitation est accompagnée d'une formation aux risques électriques effectuée par une entreprise spécialisée et est délivrée par l'employeur



<b>Nom : DUPONT</b>		<b>Employeur : Entreprise du Sud-Ouest</b>		
<b>Prénom : Jacques</b>		<b>Affectation : Direction régionale de Toulouse</b>		
<b>Fonction : Chef d'équipe</b>				
Personnel	Symbole d'habilitation	Champ d'application		
		Domaine de tension	Ouvrages concernés	Indications supplémentaires
Non électricien habilité				
Exécutant électricien				
Chargé de travaux ou d'interventions	B2	BTA	Toutes installations industrielles de la Direction régionale Supermarché de Toulouse Eclairage	Sauf tableau général du supermarché
	BR	BTA		
Chargé de consignation	BC	BTA	Supermarché de Toulouse Zone machines frigorifiques	
Habilités spéciaux				
Le Titulaire signature: 		Pour l'Employeur Nom et prénom : CHARDRI Francis Fonction : Chef de Division Signature: 		Date : 1 janvier 2001 Validité : fin décembre 2002

# CONVERSION

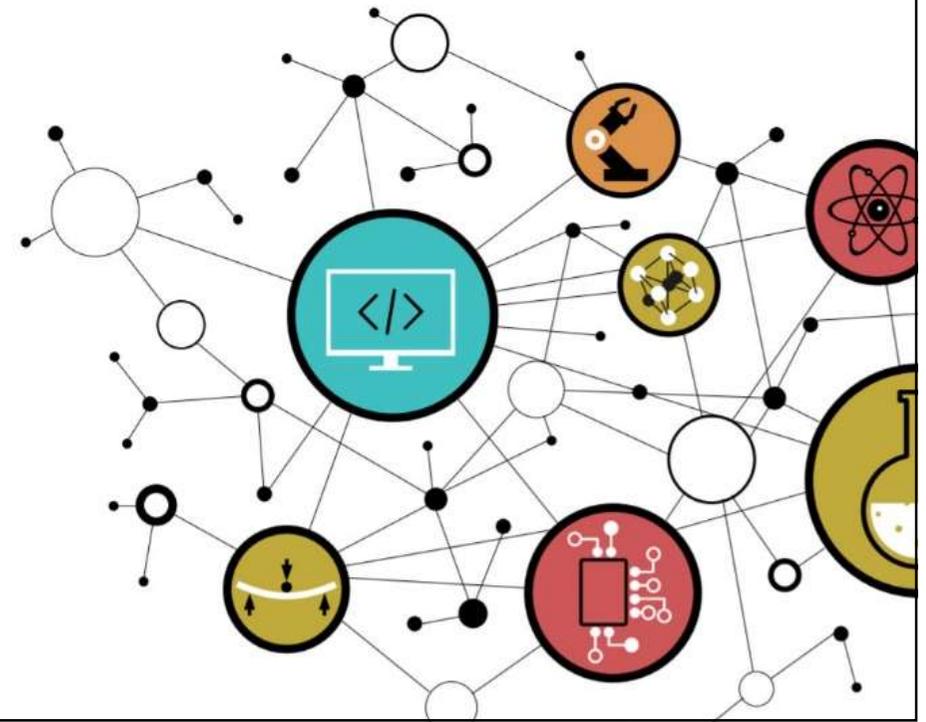


L'étude de la conversion de l'énergie électrique en une autre source électrique de nature différente (alternative ou continue) ou en énergie mécanique peut-être découpée en deux grandes parties

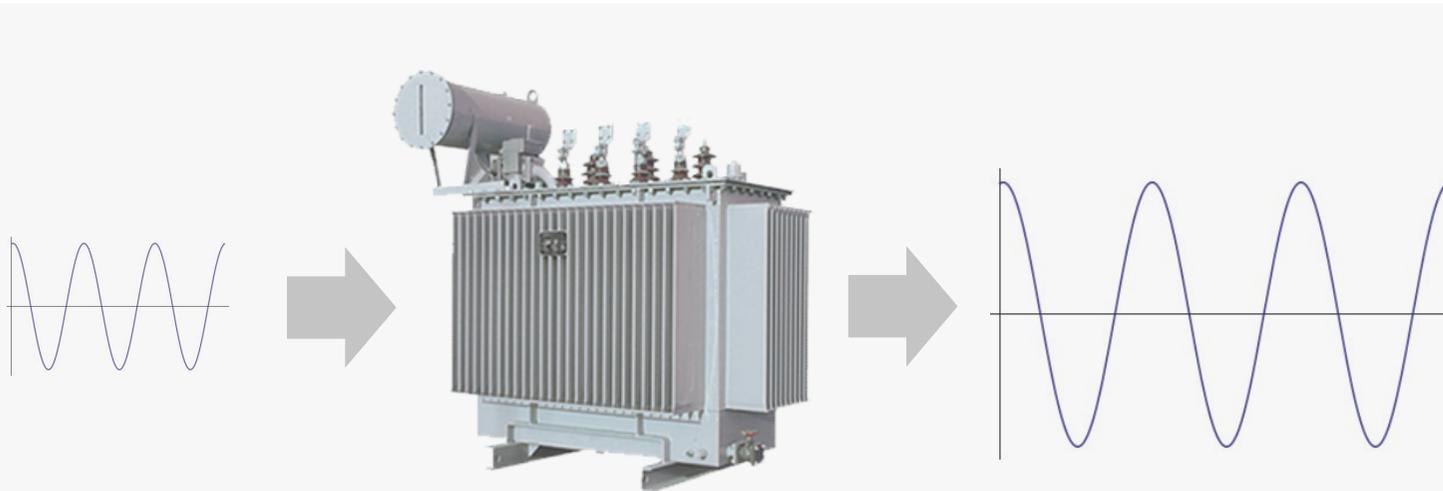
- *Electronique de puissance et transformateurs.* Conversions électriques (alternatif/alternatif, alternatif/continu, continu/alternatif, continu/continu)
- *Machines électriques tournantes* en fonctionnement moteur ou alternateur/générateur. Conversions Electromécaniques réversibles. *L'analyse préalable du fonctionnement d'un transformateur est un avantage indéniable pour la compréhension de ces machines !*

# CONVERSION

## TRANSFORMATEUR



Un *transformateur* assure une conversion électrique sans modification de la fréquence des grandeurs, seules les amplitudes des courants et tensions sont impactées (utilisé dans sa plage de linéarité). Un transformateur est réversible. Utilisation sur les différents réseaux électriques, applications aux transports (ferroviaire, aéronautique, etc), etc pour de l'adaptation de niveaux de tension et de l'isolement



Transformateurs RTE 2016		
Tension primaire	NOMBRE DE TRANSFORMATEURS	PUISSANCE 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
<b>TOTAL</b>	<b>1 223</b>	<b>232 758</b>

Observons des transformateurs 400KV Alstom (actuellement GE power) présents sur le réseau de transport RTE. La politique de rénovation, d'évolution du réseau et de diminution des pertes en lignes reste très active chez RTE (technologies des transformateurs, des conducteurs, maillage du réseau, etc)



Transformateur en assemblage  
(noyau magnétique et enroulements)



Transformateur en test



Transformateur en service

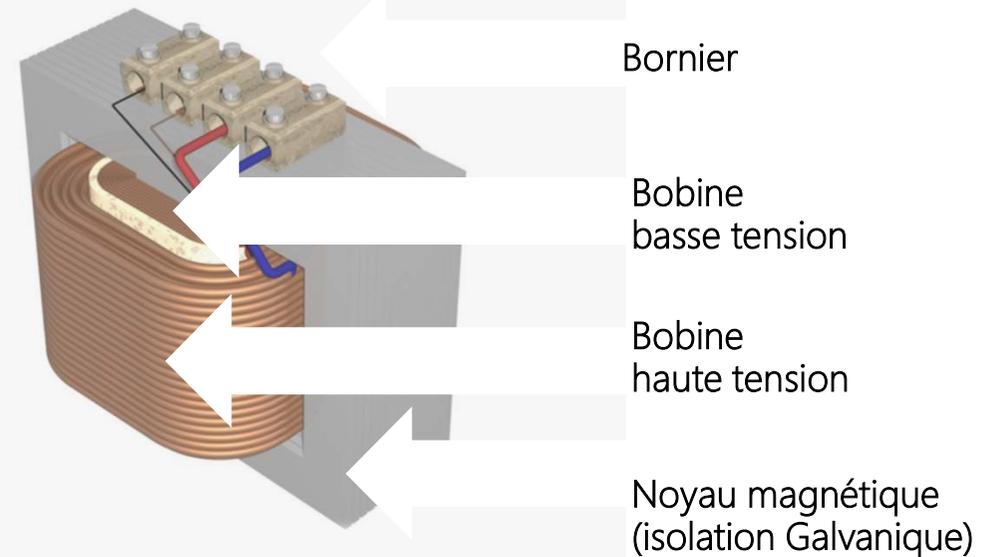


Un transformateur reste essentiellement constitué par un noyau magnétique (alliage de Fer-Silicium) et deux enroulements en cuivre par phase (primaire/entrée et secondaire/sortie). Il assure un transfert direct d'énergie sans stockage. La France compte plusieurs fabricants (Schneider Electric anciennement France Transfo, etc)

Transformateur triphasé

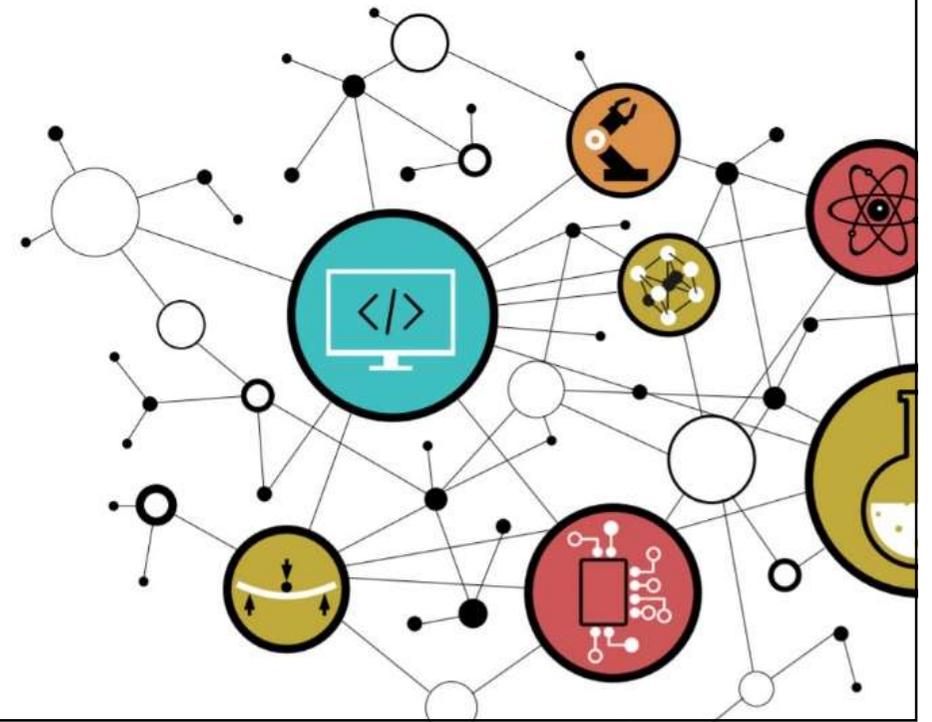


Transformateur monophasé



# CONVERSION

## MACHINES ELECTRIQUES

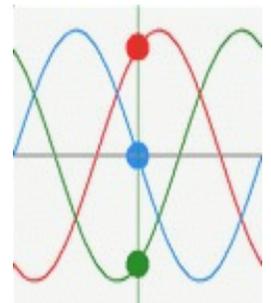


Le fonctionnement d'une machine électrique tournante est entièrement réversible, moteur ou alternateur/générateur. Dans les applications en puissance, deux technologies triphasées alternatives se détachent. D'autres variantes ou technologies existent, notamment en faible puissance

- *Machines Synchrones ou MS* : production électrique, transport, etc
- *Machines Asynchrones ou MAS* : industrie, moteur vitesse fixe, etc

Rotor

Stator



Pour la production d'électricité, solutions pour le transport où le poids reste critique, les machines synchrones sont les plus répandues. Pour les machines à aimants en transport, meilleur ratio poids-puissance-encombrement. Machine à rotor bobiné en fort couple ou en production électrique (turbo-alternateur, etc)





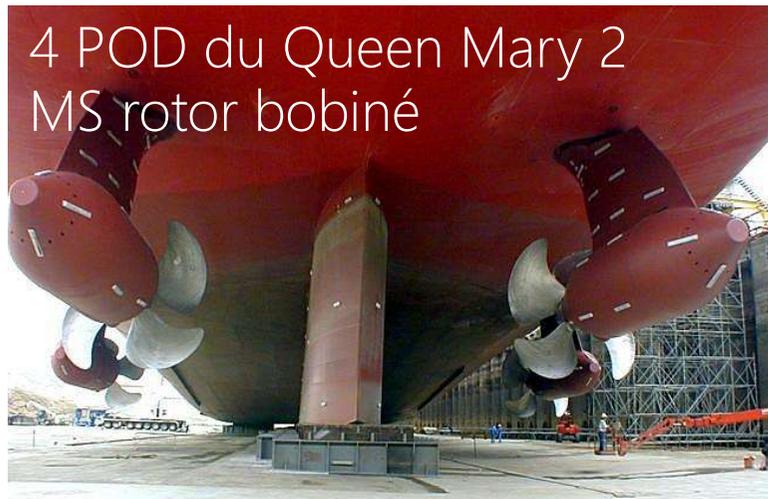
En 2015, la branche *Alstom Transport* du groupe *Alstom* était notamment leader mondial dans les domaines du transport suivants

- *Trains* à grande vitesse (AGV et TGV) et trains pendulaires
- *Trains* de banlieues et régionaux (X 72500/X 73500/X 73900)
- *Tramways* (Citadis) et véhicules légers sur rail

En terme de volumes, les machines électriques tournantes sont utilisées majoritairement en fonctionnement moteur, prenons quelques exemples industriels et à usages domestiques



Prenons un exemple présentant une évolution technique liée au potentiel des machines électriques. Concernant le Queen Mary 2, les machines électriques utilisés pour la propulsion sont déportés dans les POD (Propulsors Outboard Drives). Impossible à réaliser avec des moteurs thermiques

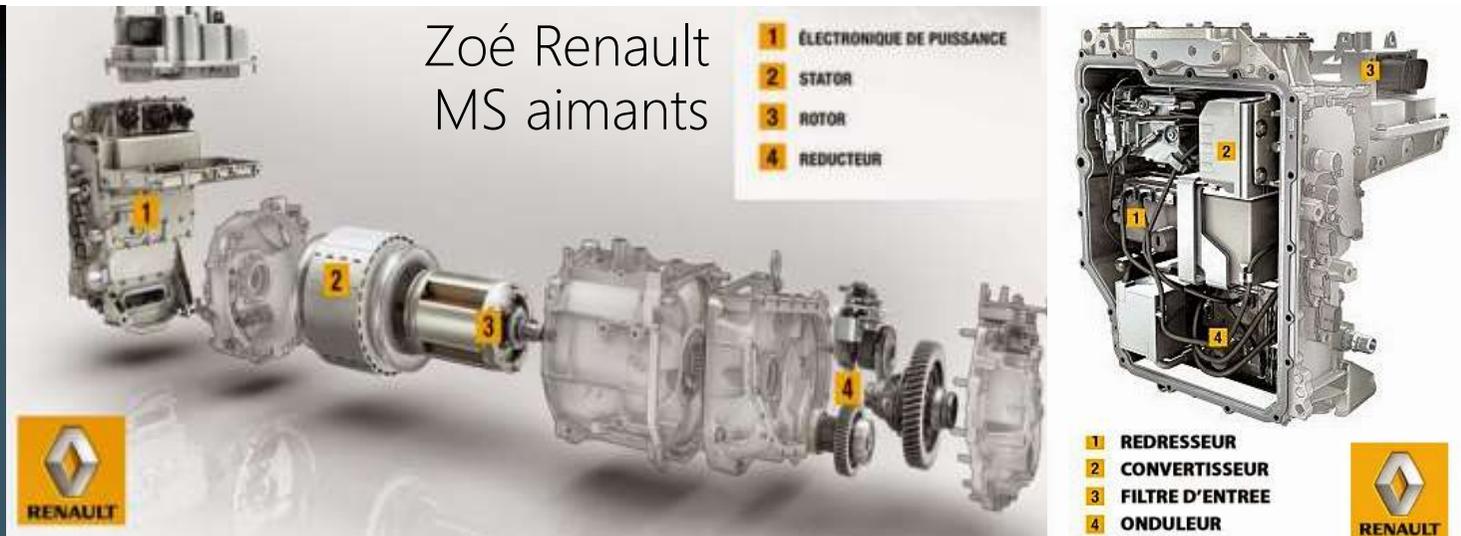
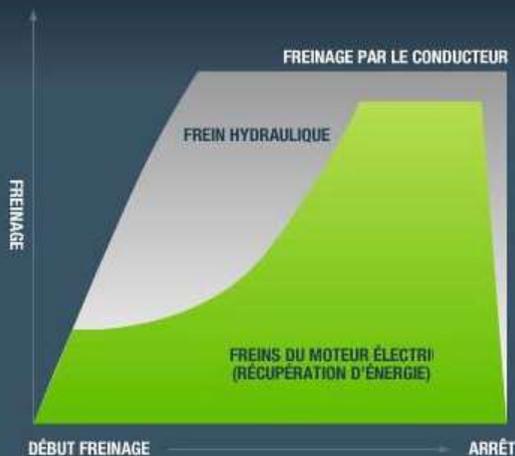


Actuellement, dans les applications ferroviaires, les machines utilisées pour la propulsion deviennent également génératrices durant les phases de roues libres et de freinage (frein principal). Néanmoins, le stockage seraient trop impactant (poids-coût), cette énergie récupérée est alors dissipée dans des rhéostats. Le projet Hesop développé par Alstom tend à palier ce problème (Tramway parisien T1 RATP en 2011, métro londonien ligne Victoria en 2014, etc)



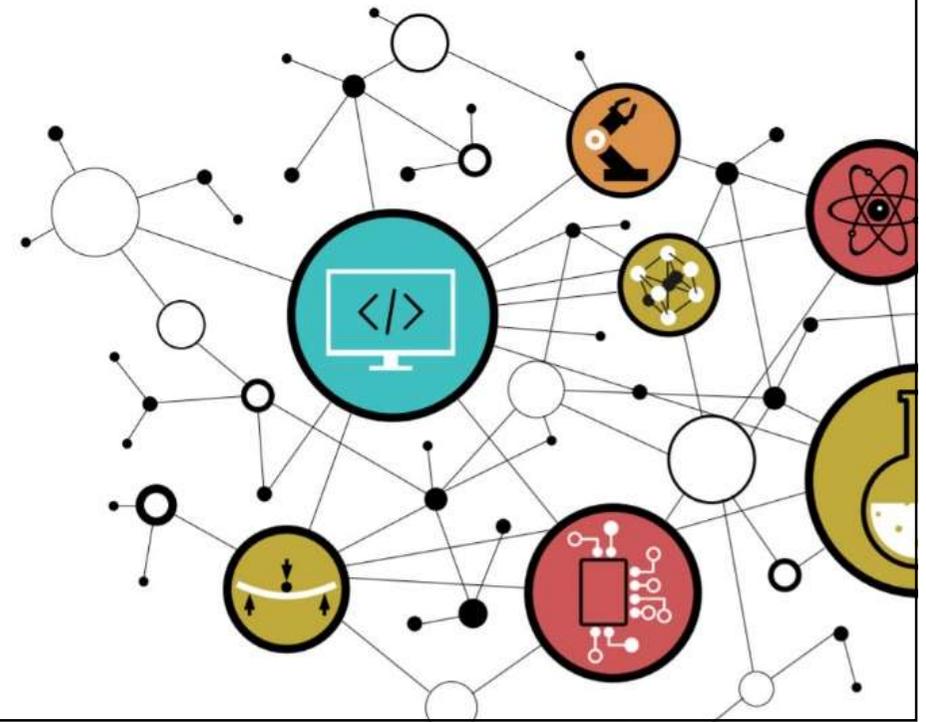
Une machine électrique est réversible et peut devenir génératrice (roue libre, freinage magnétique). Cette source de production étant discontinue, une interface de stockage est alors nécessaire (supercondensateur, etc). La problématique est semblable aux applications de production EnR éolien, photovoltaïque, etc

### MÉCANISME, DIAGRAMME CONCEPTUEL



# CONVERSION

## ELECTRONIQUE DE PUISSANCE



L'Electronique de Puissance est un domaine récent de l'ingénierie (~1950) au regard de l'âge de l'Electrotechnique (~1850). Ce domaine est basé sur l'utilisation du *transistor*, utilisé sous forme d'interrupteur statique (non mécanique). Les structures de l'électronique de puissance sont souvent historiquement nommées convertisseurs statiques. Observons les composants élémentaires

- *Transistor* : interrupteur électronique commandé à l'ouverture et à la fermeture mais non réversible en courant
- *Diode* : interrupteur électronique non commandé non réversible en courant
- *Thyristor* : interrupteur électronique non réversible en courant commandé à l'ouverture seulement

En fonction des gammes de courants, de tensions et de fréquences rencontrées (limitations technologiques) durant le développement d'une application, différentes solutions d'interrupteurs statiques sont alors accessibles (cellules de commutation). Prenons quelques exemples illustratifs

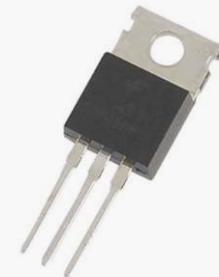
### Technologies



Thyristor GTO  
4500V - 3000A - ~1KHz

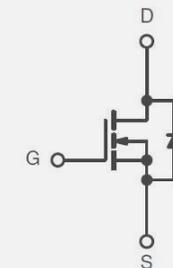
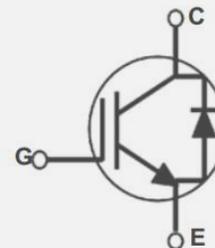
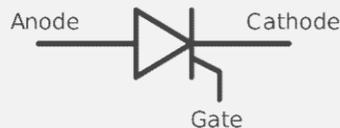


Transistor IGBT  
600V - 150A - 25KHz



Transistor MOSFET  
100V - 10A - 1MHz

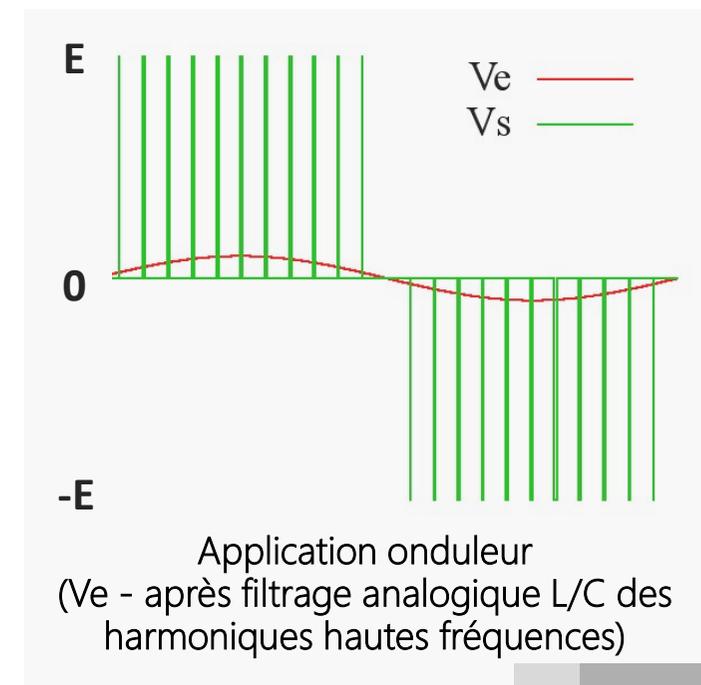
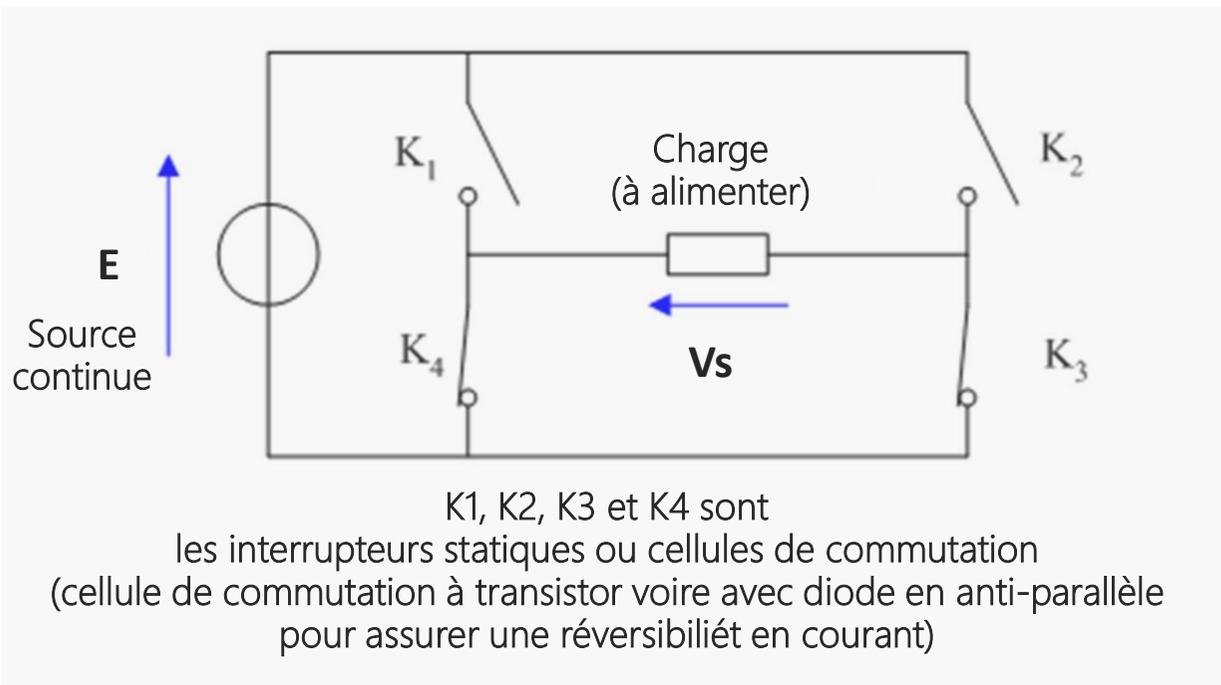
### Symboles

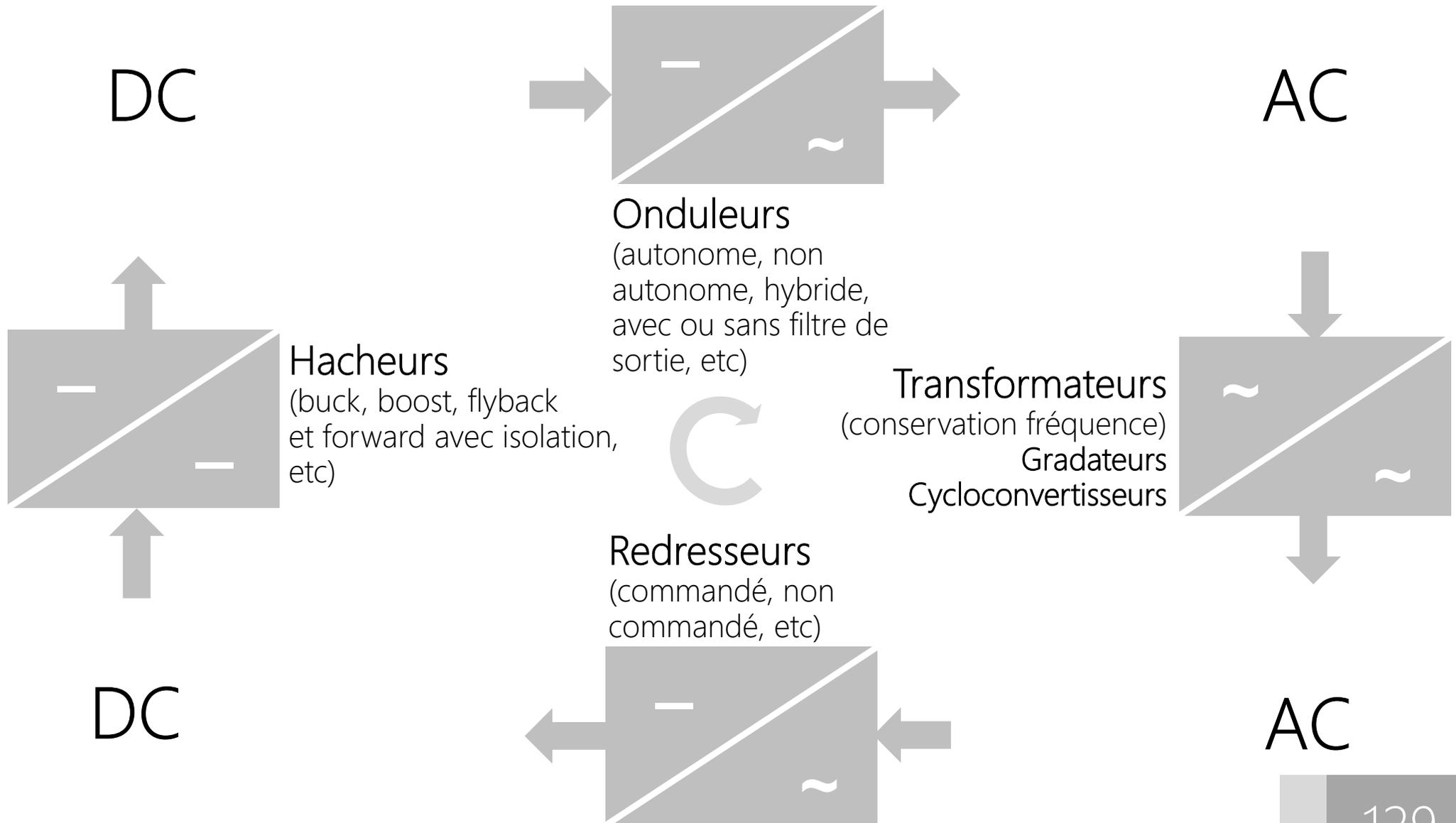


N-Channel MOSFET

Diode pour réversibilité en courant

La structure électronique présentée ci-dessous est quasi universelle et se nomme *hacheur quatre quadrants* (ou pont en H). En fonction des applications visées, différentes topologies plus ou moins riches en cellules de commutation voire avec isolation Galvanique existent (buck, boost, flyback, forward, etc)

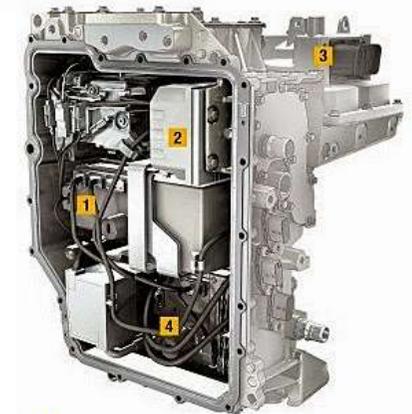




Prenons quelques exemples d'applications. De façon générale, tout appareillage utilisant de l'électronique (traitement de signaux électriques sous forme d'information) nécessitera au préalable une étape de conversion vers des grandeurs continues (TBT < 50V)



Observons à nouveau la voiture électrique Zoé proposée par Renault (modèle 22KWh). Pour information, le pack batterie Lithium-ion offre une tension totale de 400V (12 modules pour 192 cellules). Quizz autour de l'électronique puissance embarquée

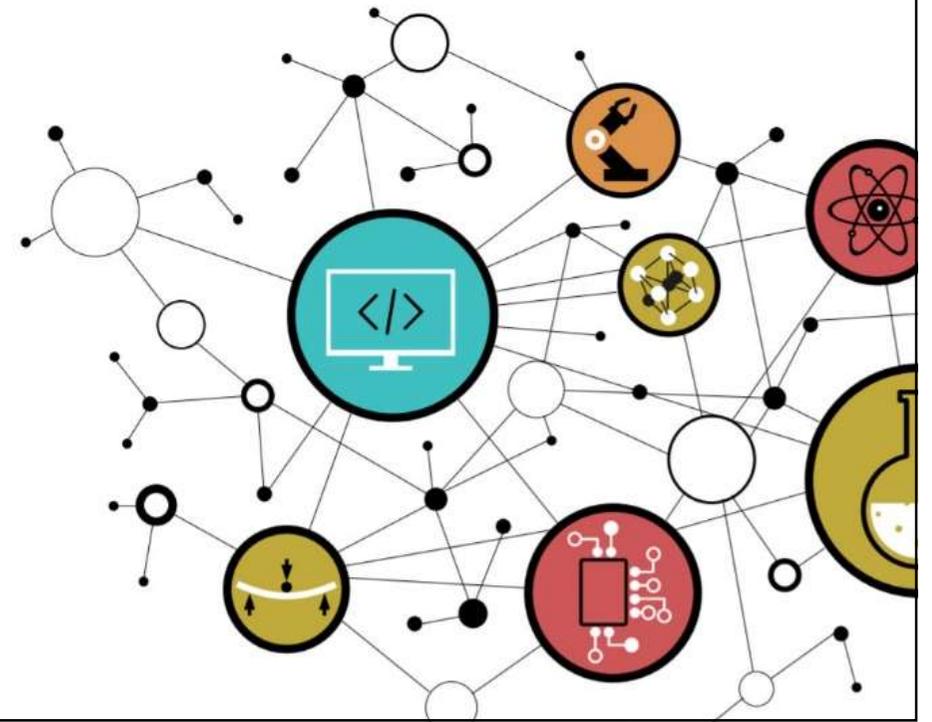


- 1 REDRESSEUR
- 2 CONVERTISSEUR
- 3 FILTRE D'ENTREE
- 4 ONDULEUR



Proposer une architecture pour le système électronique de puissance embarqué !

# STOCKAGE



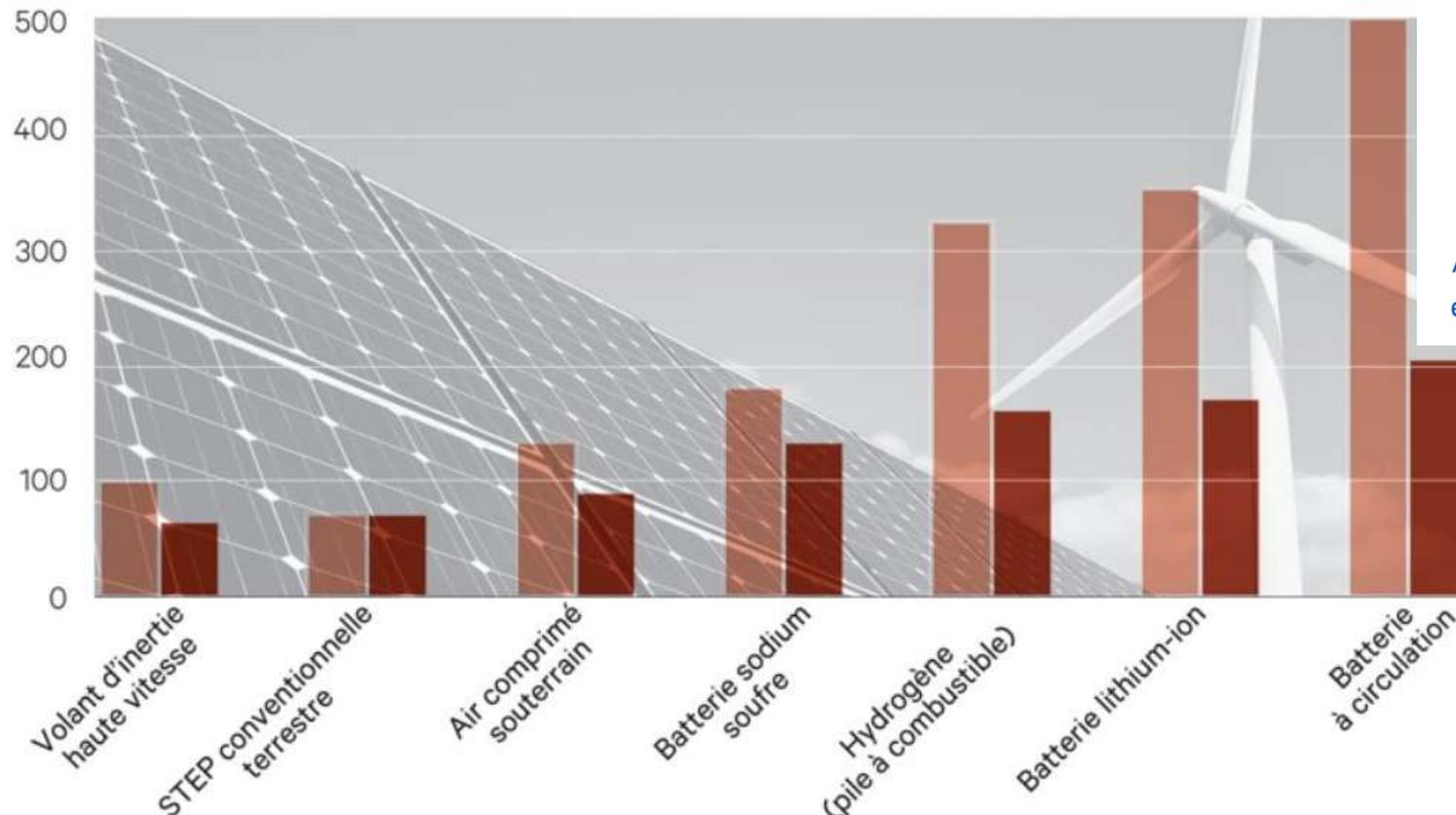
Avec l'émergence grandissante des EnR (éolien, solaire, etc) ainsi que les besoins en stabilité et continuité du service, le stockage d'énergie va devenir un enjeu majeur de demain

- *Energie mécanique* : STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompes), volant inertiel, CAES (Compressed Air Energy Storage)
- *Energie électrochimique et électrostatique* : Batterie, supercondensateur, condensateur électrolytique classique
- *Energie chimique* : pile à combustible, P2G (Power to Gas)
- *Supraconductivité* : SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)

Observons les solutions pour le stockage d'énergie électrique classées par coût (source – ADEME). A notre époque, il reste moins coûteux de produire que de stocker (appoint)

### Le coût des technologies de stockage d'électricité

En euros par MWh ■ 2013 ■ 2030

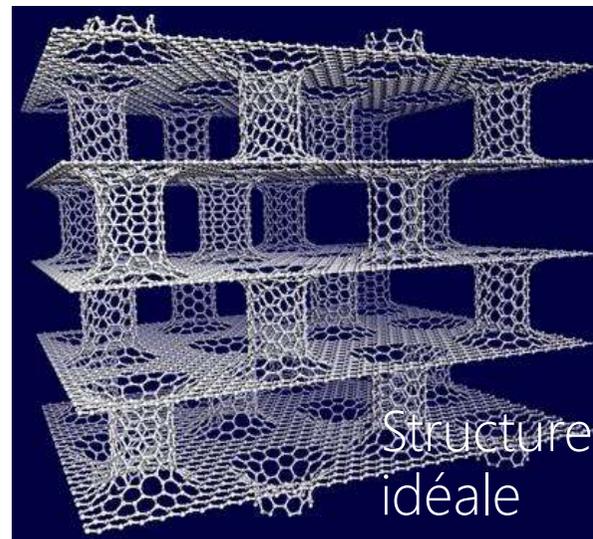
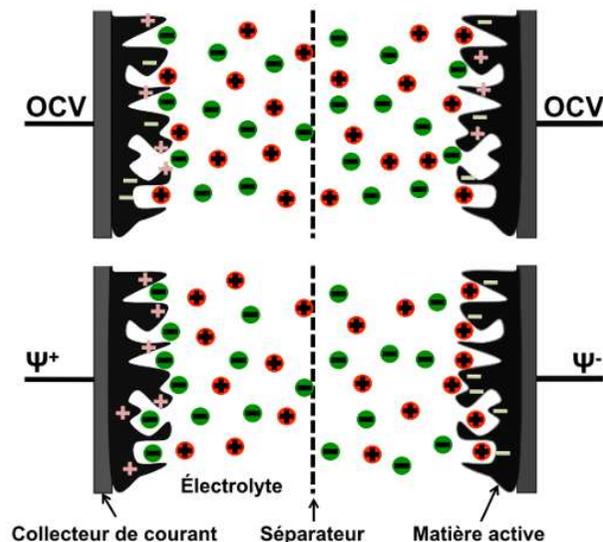


**ADEME**

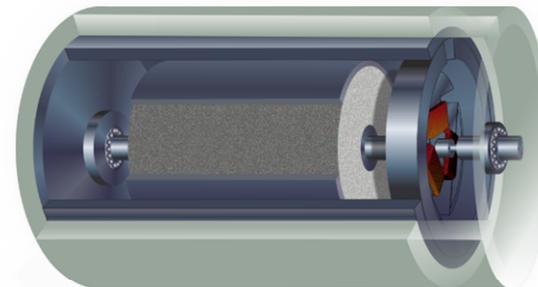


Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Energie

De grands efforts sont fournis dans les différents développements autour des *supercondensateurs* (nanotechnologies, graphène, etc). Il s'agit de condensateurs utilisant des techniques particulières offrant une densité de puissance et d'énergie intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques (électrodes en charbon actif). Temps de charge rapide et très grande durabilité (transport, solaire, etc)



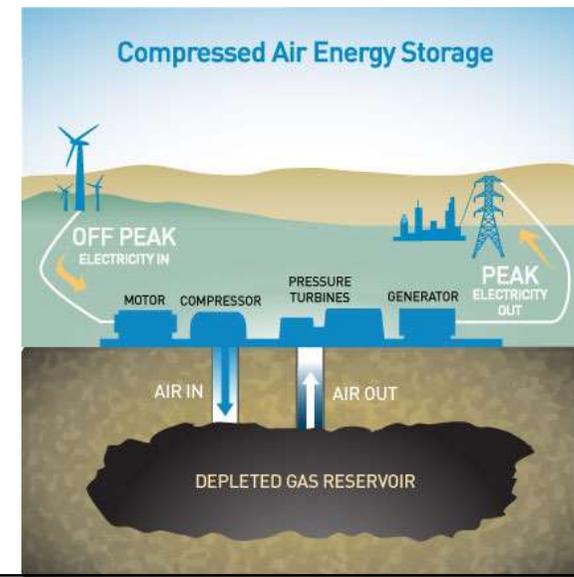
Un *volant inertiel* assure un stockage d'énergie sous forme d'énergie cinétique en rotation. Trois phases sont alors rencontrées, la phase de stockage (un machine tournante en fonctionnement moteur convertit énergie électrique en énergie cinétique), la phase stationnaire (vitesse constante et faible consommation électrique) et la phase de restitution (la machine tournante devient génératrice et est entraînée par la masse en rotation). Exemple de la société française *Energiestro* en 2017 pour une application dédiée à des parcs photovoltaïques.



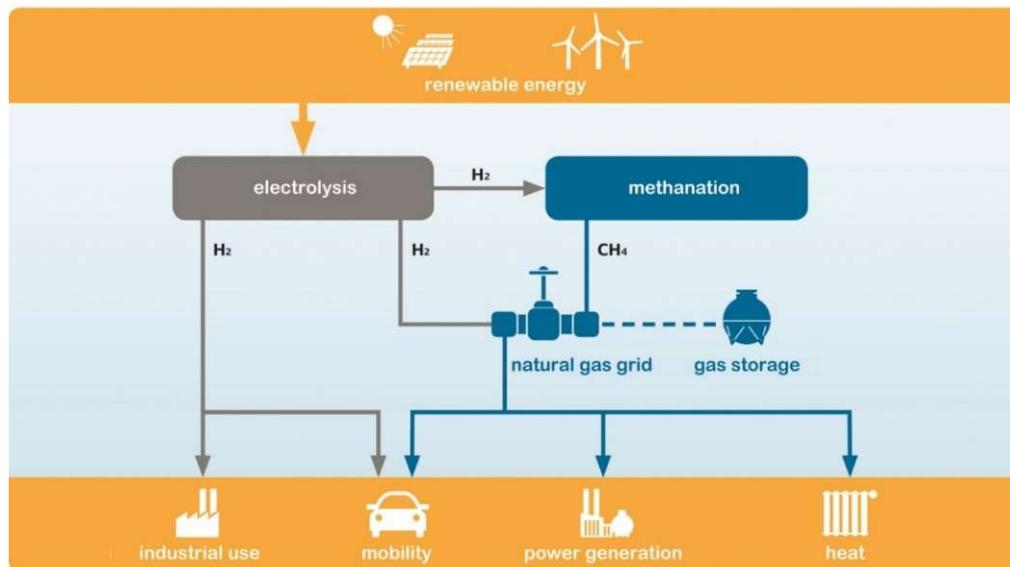
Le stockage *CAES (Compressed Air Energy Storage)* utilise le principe d'élasticité de l'air. L'énergie à emmagasiner est indirectement stockée par compression d'air dans des cavités souterraines pour être récupérée par détente d'air attaquant un turbo-alternateur. Bien qu'existant depuis 1978 (Huntorf, Allemagne), il n'existe en 2017 qu'une dizaine de projets en production ou en construction de part le monde. Néanmoins, de nouveaux projets sont en cours de financement. Des solutions adiabatiques (A-CAES) sont en études et pourraient relancer le CAES

### Huntorf

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

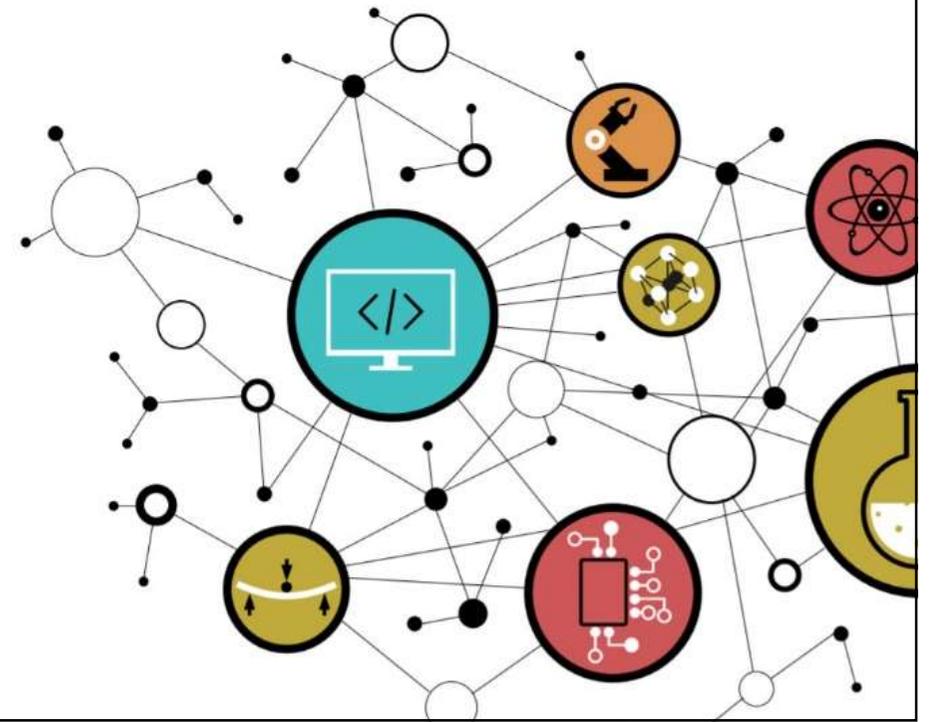


Le *P2G (Power to Gas)* consiste à transformer de l'électricité en hydrogène par électrolyse de l'eau lorsque celle-ci est excédentaire sur le réseau. L'hydrogène peut alors être valorisé de différentes manières (cf. image ci-dessous). Une fois converti en méthane, il offre l'avantage de devenir facilement stockable. En raison de l'accroissement des sources intermittentes de production sur les réseaux, derrière l'Allemagne et le Danemark, il est à noter quelques projets Français (GRHYD Dunkerque, Jupiter 1000 Fos, etc)



Audi, Allemagne  
6MW

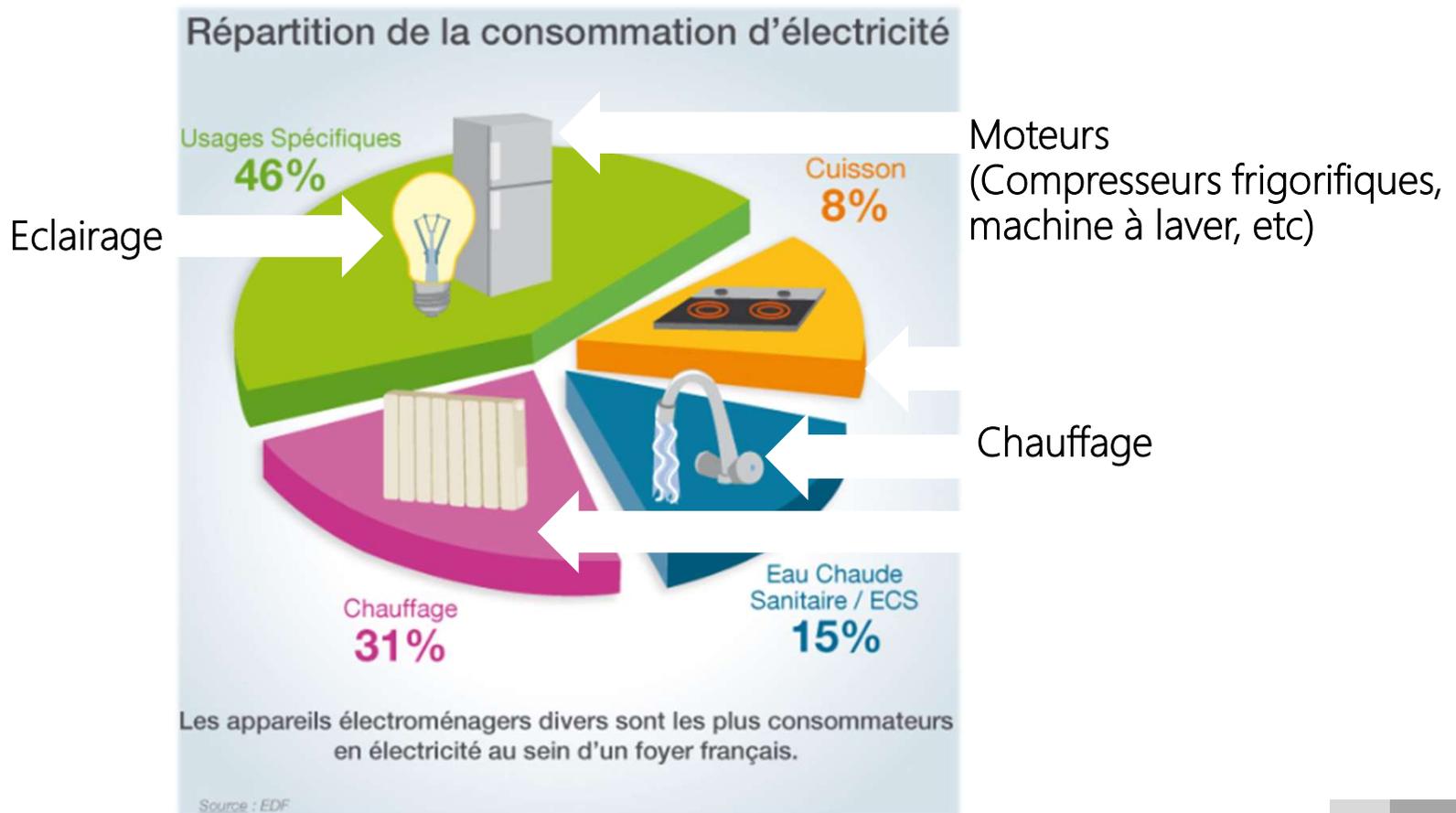
# UTILISATION



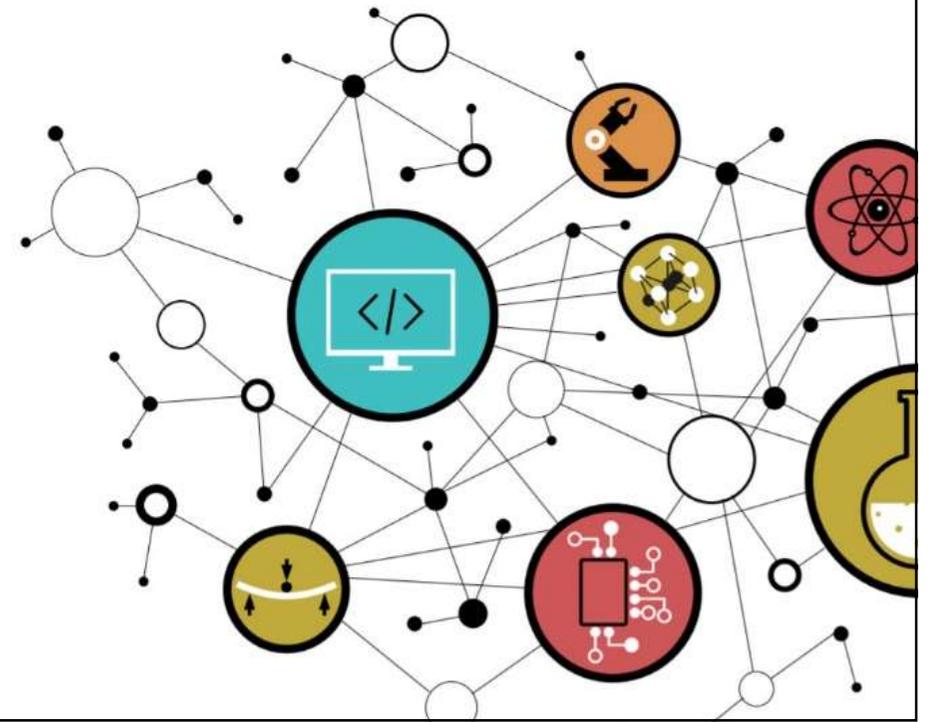
Cette dernière partie traite de domaines étroitement liés à celui du traitement de l'énergie électrique et pointes certains usages clés de cette énergie

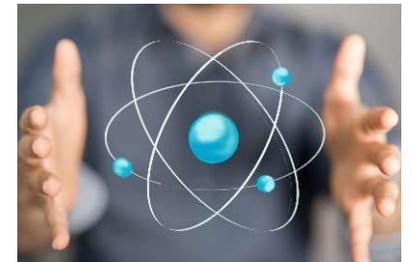
- *Eclairage* : domestique, publique, industriel, etc
- *Chauffage* : domestique, publique, industriel, etc
- *Automatisme* : Automatisation du contrôle de procédés (API ou Automate Programmable Industriel), pilotage de machines outils, chaînes de production, etc (très nombreux moteurs)

Observons par exemple à notre époque les principales sources de consommation dans le domicile des usagers



# SYNTHESE





Merçi