Electricité : bases et application aux datacentres

Cours réalisé initialement par Patrick Eustache et Robert Ferret

EcoInfo

cnrs

Remerciements

- *Patrick Eustache , SIMSU*
- *Robert Ferret, Renater*

- *Cours de génie électrique de l'université d'Artois*
  - http://iutgc.bethune.free.fr/Feuilles/ZoneEtudiants/FI2emeAnnee/RESEAUX%20_GC_S3.pdf

Le programme

- Notions de base
  - Tension, intensité, puissance, unités
  - Courant continu, alternatif
  - Cos φ puissance active et compensation de puissance réactive
  - Triphasé et transport de l'énergie
- Electricité dans le Datacentre
  - Arrivée de l'énergie et distribution
  - Secours : UPS, groupe électrogène
- Electricité et énergie en France et dans le monde

Tension et intensité

- Tension, volt « V »
- Intensité, ampères « A »
- Puissance, Watt « W »
- Energie Joules ou « kWh »

- P = U I
- E = P.t

Intensité ou débit

Tension ou différence de potentiel

Quelques chiffres en passant

- Résistance en Ω se calcule avec la formule
  $R = \rho \times L / S$: résistivité ρ en Ω.m, L en m et S en m^2

- Exemple d'une rallonge de 50 m de section $1{,}5 mm^2$
- $R = 17\ 10^{-9} \times 50 / 1{,}5\ 10^{-6} = 0{,}57\ \Omega$
- Si $I = 10A$; $P = R \times I^2 = 57W$

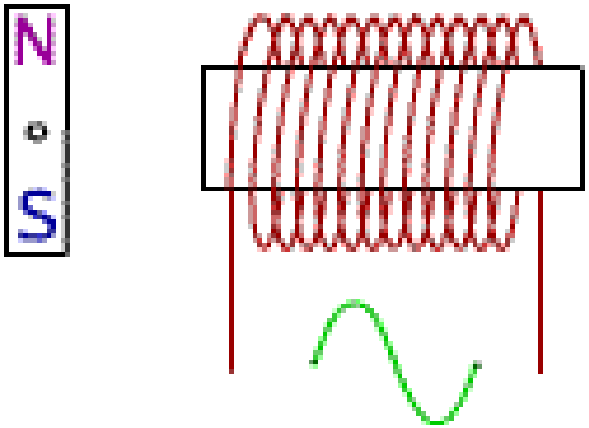
Courant continu ou alternatif

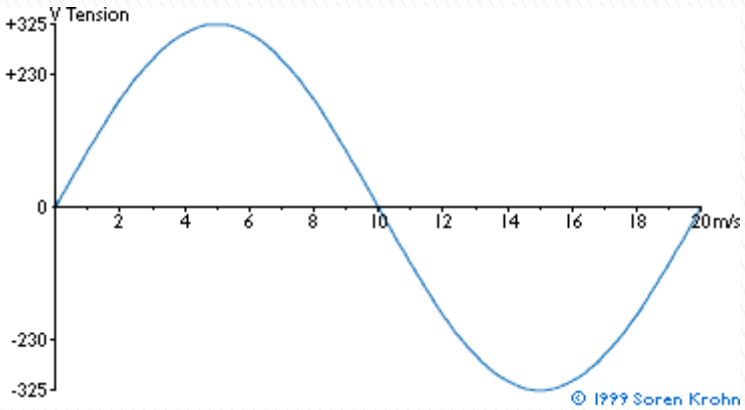
AC/DC

- Type de courant :
  - DC :« direct current » , ou courant continu
    - Polarité constante
    - Piles, batteries, alimentations DC, panneaux photovoltaïques …

Courant continu ou alternatif

- AC : « alternating current »
  « Courant alternatif »
  - Polarités alternées
  - Exemple : distribution EDF, courant purement alternatif et périodique (sources : alternateurs, transformateurs, onduleurs …)
  - Fréquence « f » en Hertz (Hz); 50Hz
  - Période « T » en seconde (s) = 1/F
  - Amplitude : valeur crête ou max
  - Valeur efficace (RMS) :

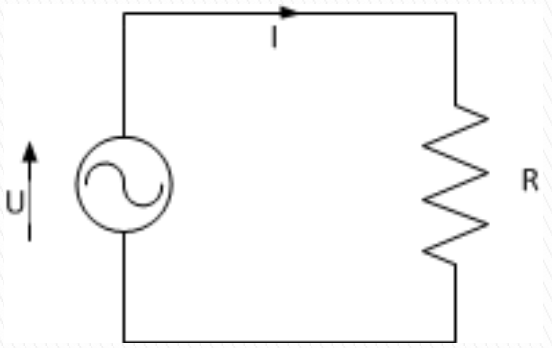




$$Ueff = U\max / \sqrt{2}$$

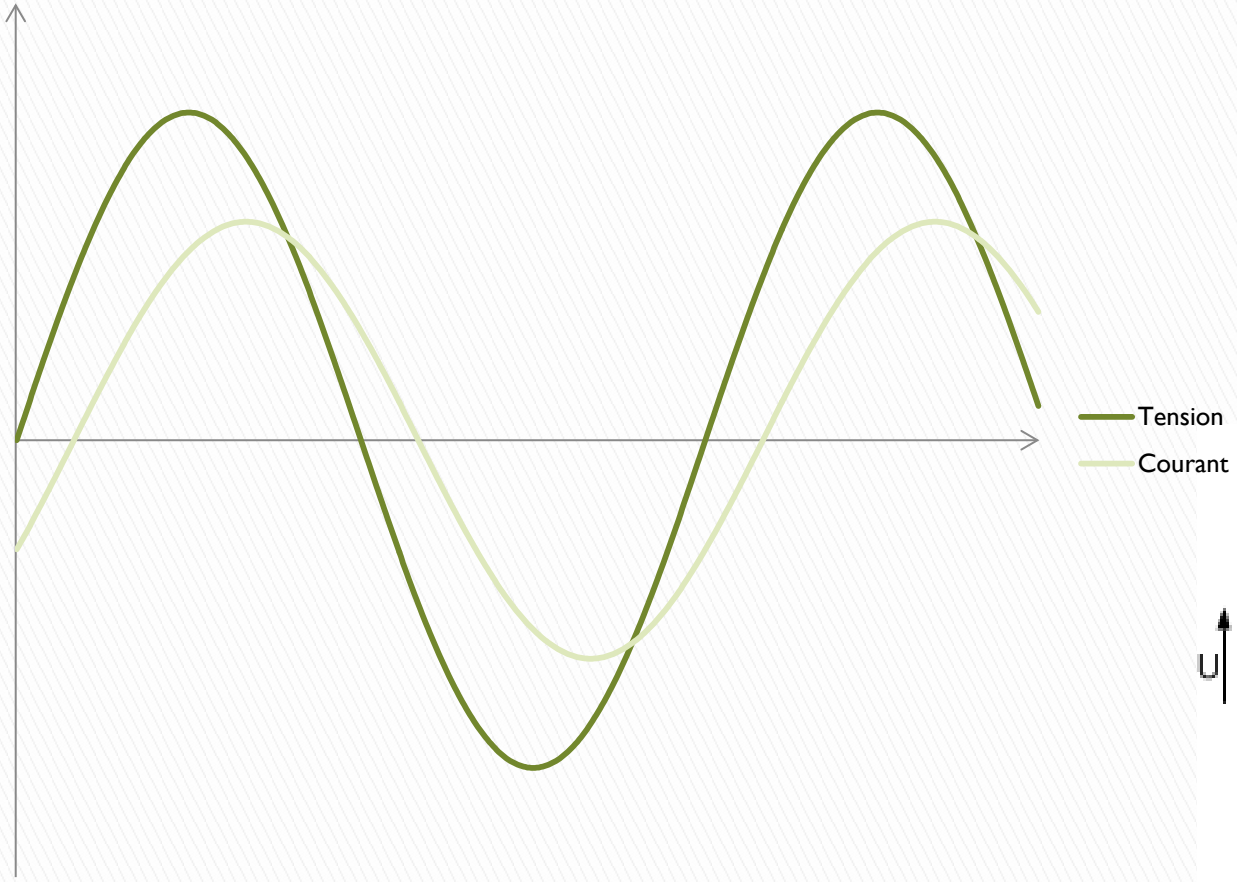
Comportement en « AC » cos(phi)

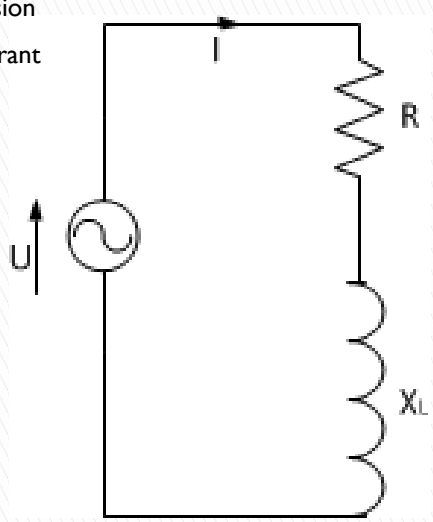
- Circuit résistif : en phase



Comportement en « AC » cos(phi)

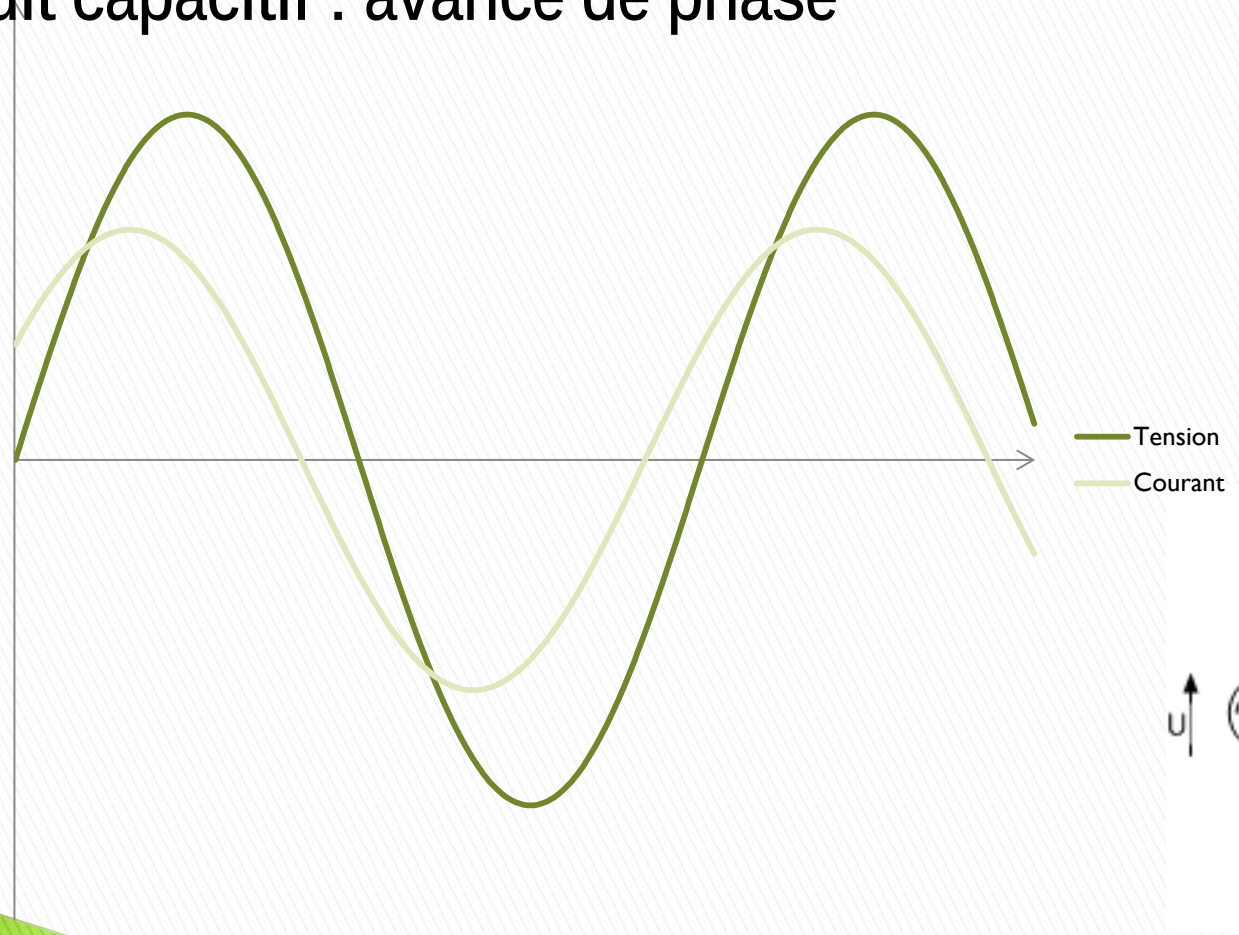
- Circuit inductif : retard de phase

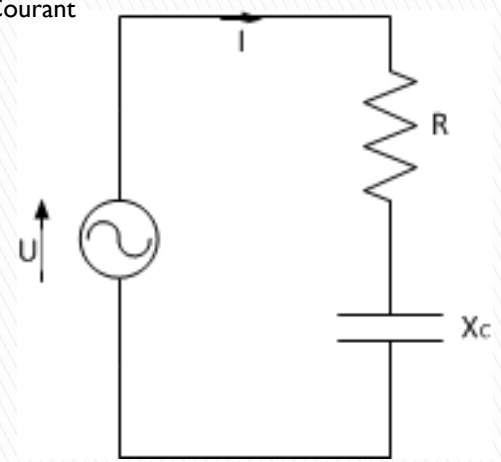




Comportement en « AC » cos(phi)

Circuit capacitif : avance de phase





Puissance active dans un circuit inductif

- 3 types de puissances :
  - Active P (W : Watt), « réelle », thermique (effet Joule),

    $P = UI \cos \varphi$

  - Réactive Q_L, partie « imaginaire »,

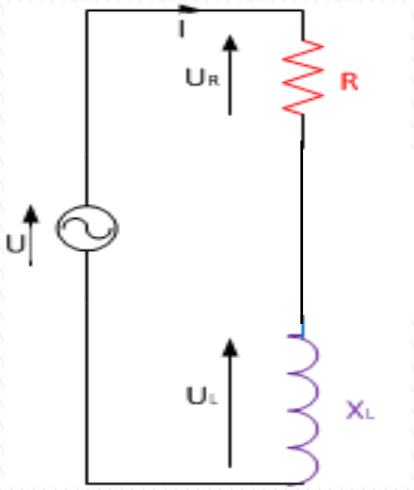
    $Q = UI \sin \varphi$

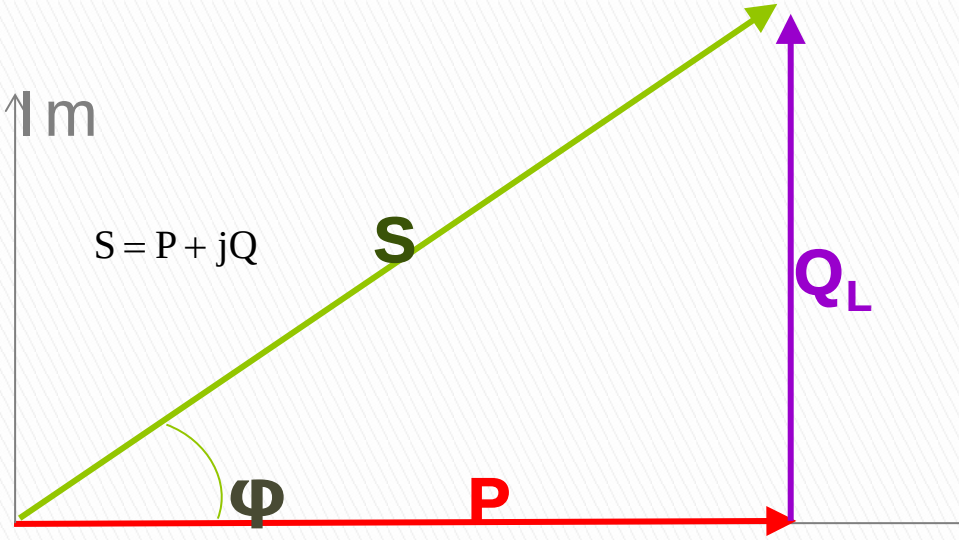
  - Apparente S (VA : VoltAmpère),

    $S = U\,I$

    $S^2 = P^2 + Q^2$

  - cos **φ**, facteur de puissance





Cos(phi) et datacentre

- Un datacentre constitue une charge inductive
- Pourquoi ce n’est pas bien d’avoir un mauvais cos(phi)
  - Plus de courant pour la même puissance : disjoncteurs câbles peuvent atteindre les limites
- Facturation mauvais cos(phi)
  - EDF dimensionne ses lignes pour transporter des ampères et facture des W.
  - Au pire, si tension et courant sont déphasés de 90° cos(phi) vaut 0. EDF fournit du courant mais pas de puissance !

Coût de l'électricité en France

- Prix de l'électricité, tarifs « standards » (€ TTC):

Option	Abon	HP	HC	HP	HC	HP	HC
Base	65-652	0.1209					
HP/HC	94-762	0.1311	0.0893				
Tempo	110-573	0.0836	0.0696	0.1194	0.1001	0.4966	0.1880

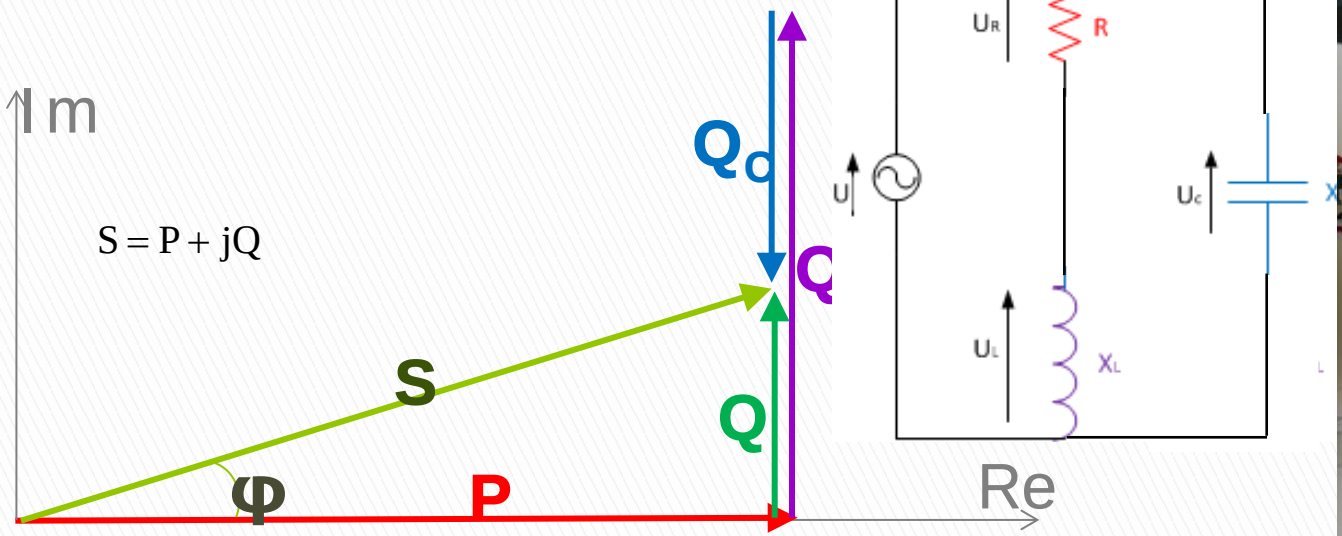
- Prix de l'électricité, tarifs « industriels » : Exemple de tarif vert A5 en €

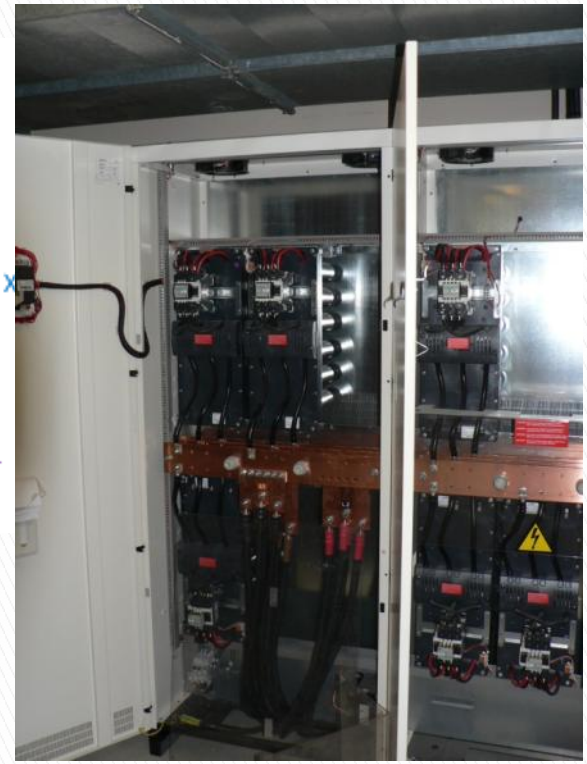
Version	Prime fixe annuelle €/kW	HIVER			ÉTÉ	
		PTE	HPH	HCH	HPE	HCE
TLU	98.76	0.06916	0.05564	0.04237	0.03950	0.02451
LU	68.64	0.10678	0.06406	0.04386	0.04044	0.02529
MU	48.12	0.14879	0.07559	0.04776	0.04165	0.02597
CU	24.84	0.22989	0.09934	0.05271	0.04311	0.02615
Coef. dépassement		1	0.71	0.31	0.27	0.25
Energie Réactive - Facturation (€/kVARh)				**0.01770**		

EcoInfo

Compensation de puissance active

- En ajoutant une capacité en parallèle il est possible de diminuer le cos **φ**



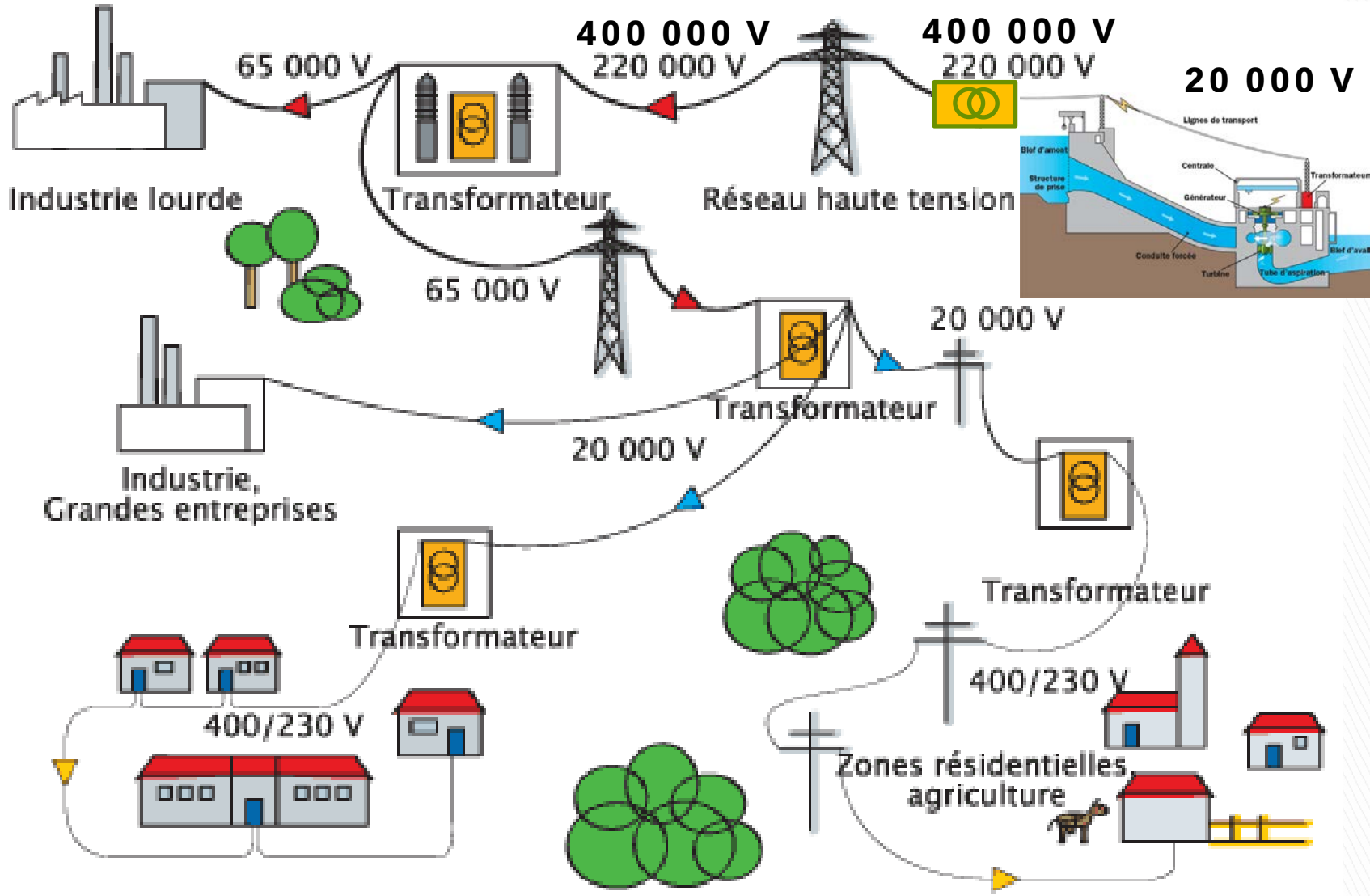


Où faut-il placer la compensation de puissance active?

Transport de l'énergie

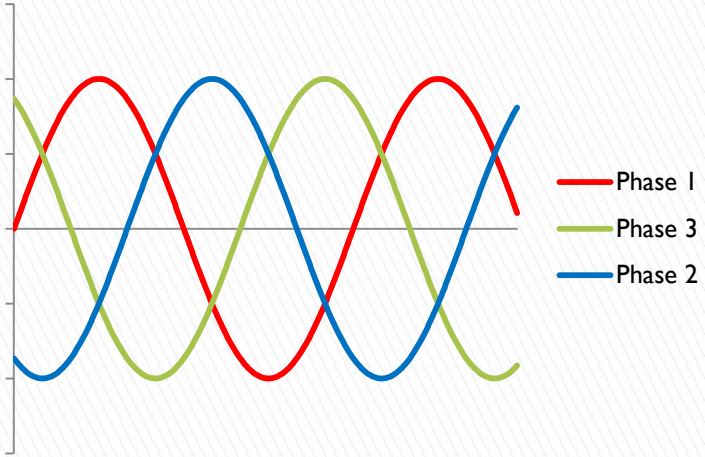
- Au début fut le continu, T. Edison fonde l'Edison Electric Light Co en 1878
  - changement de tension difficile,
  - pertes importantes,
  - rendement faible,
  - distribution à petite échelle; rayon < centaines km,
  - disjonction difficile, pas de passage à « 0 » du courant continu
- Puis passage progressif à l'alternatif (N. Tesla)
  - + changement de tension aisé (transformateur) et possibilité d'augmenter la tension pour transporter l'électricité
  - + pertes joules plus faibles ($P=RI^2$),
  - + meilleur rendement,
  - + transport sur de grandes distances,
  - + section du câble plus faible,
  - + pas besoin de redresseur (mécanique ou électronique)
  - + disjonction plus aisée (passage à 0A du courant)

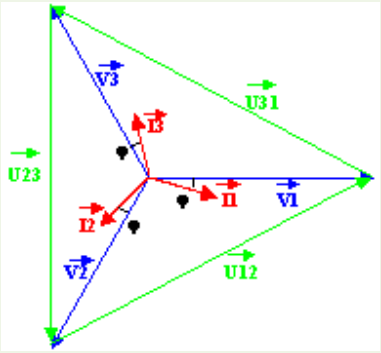
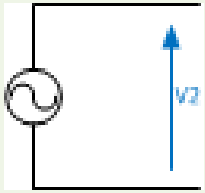
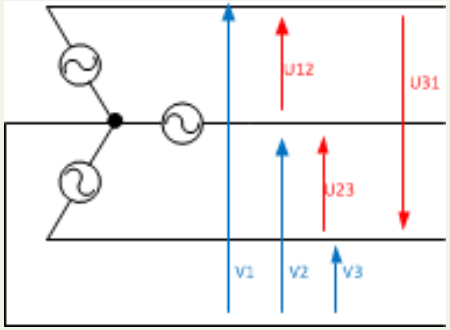
Transport de l'énergie



Le courant triphasé

- Le transport de l'énergie s'effectue en triphasé :
  - Trois tensions sinusoïdales (50Hz) identiques mais déphasées de 120°
- Avantages du triphasé :
  - Plus de puissance moins de cuivre (3 fois plus de puissance pour 2 fois plus de cuivre)

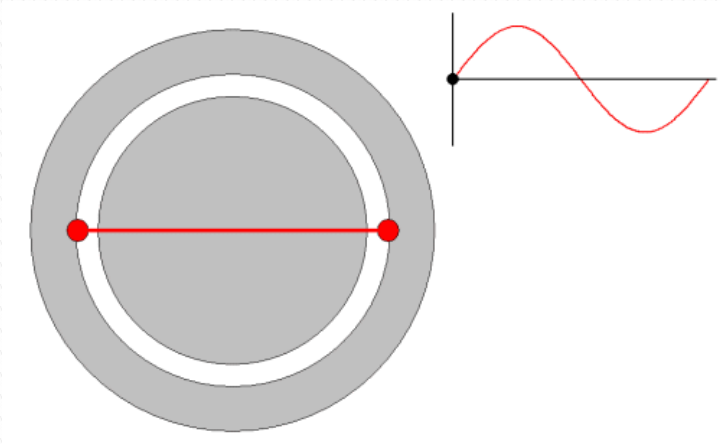


	Monophasé	Triphasé
Nombre de fils	2	3 ou 4
Volume de fils	=2*L*S	=4*L*S
Puissance	=V*I	=3*V*I =U*I*√3
		

Avantages du triphasé

- En générateur :
  - couple sur l'arbre de transmission jamais nul
- En moteur :
  - champ tournant « naturel » =>pas besoin de capacité de démarrage
  - volume 2 fois plus petit à puissance identique

- Inconvénients : nécessité d'équilibrer les phases



Fourniture de courant par EDF

- Dès que la puissance demandée atteint 50 kVA (200A sous 240V), les entreprises industrielles ou tertiaires sont alimentées en haute tension 20 kV (HTA).

- L'alimentation d'une installation électrique est effectuée avec un poste de transformation HTA/BT qui est disposé au plus près des éléments consommateurs d'énergie.

- L'abonné est livré en énergie électrique HTA (de 5 à 30 kV). Il n'est pas limité en puissance (quoique) et il bénéficie d'une tarification plus économique.

- Le poste de transformation HTA/BT s'appelle aussi poste de livraison.

Fourniture de courant par EDF

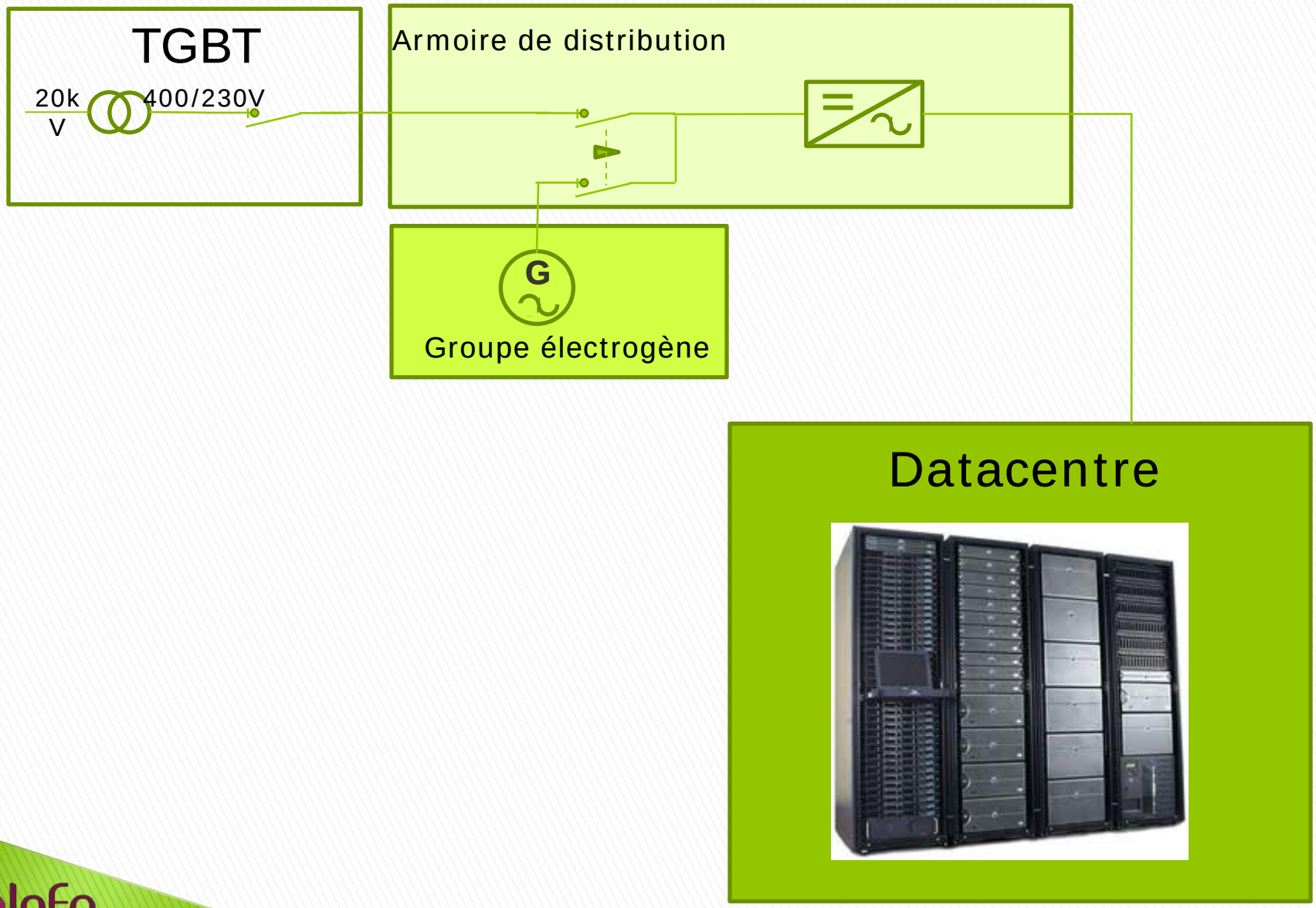
- La norme NF C 13-100 définit le poste HTA à comptage BT par :
  - Une tension de 1 à 33kV , valeur usuelle 20kV.
  - Un seul transformateur.
  - Un courant secondaire au plus égal à 2000A soit une puissance maximale P ≤ 1250 kVA sous 20kV.
  - Un comptage BT fournit par le distributeur d'énergie.

TENSION ALTERNATIVE	DOMAINE DE TENSION	APPELLATION COURANTE	VALEUR USUELLE EN FRANCE
≤ 50V	TBT		12 – 24 – 48V
≤ 500V	BTA	BT (Basse Tension)	220 – 380 – 400V
≤ 1000V	BTB		
1 ≤ U ≤ 50kV	HTA	MT (Moyenne Tension)	5,5 – 6,6 – 10 – 15 – 20 – 36kV
U ≥ 50kV	HTB	HT (Haute Tension)	63 – 90 – 150kV
		THT (Très Haute Tension)	225 – 400kV

De la HT au datacentre

- Les différents types de tableaux se différencient par le type d'application et par leur principe de réalisation.
- On distingue :
  - Le Tableau Général Basse Tension (TGBT)
  - Les Armoires ou Tableaux Divisionnaires (AD ou TD)
  - Les coffrets terminaux

Distribution de l'énergie au datacentre



Distribution de l'énergie 20kV à BT

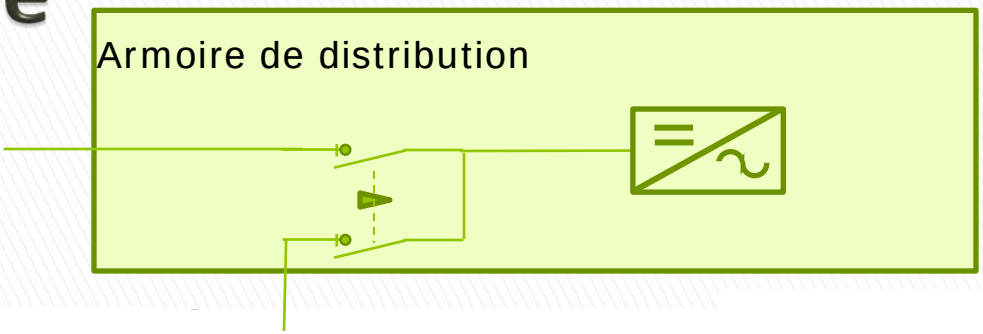
20kV

Transformateur HT/BT

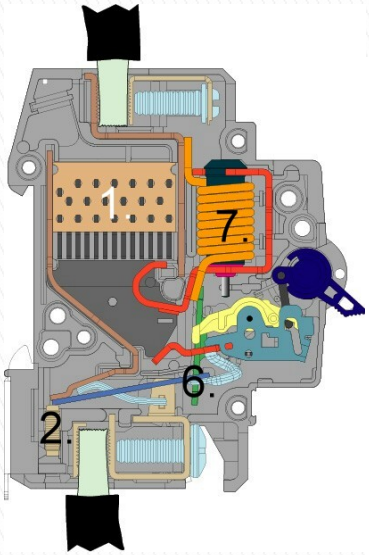
400/230V

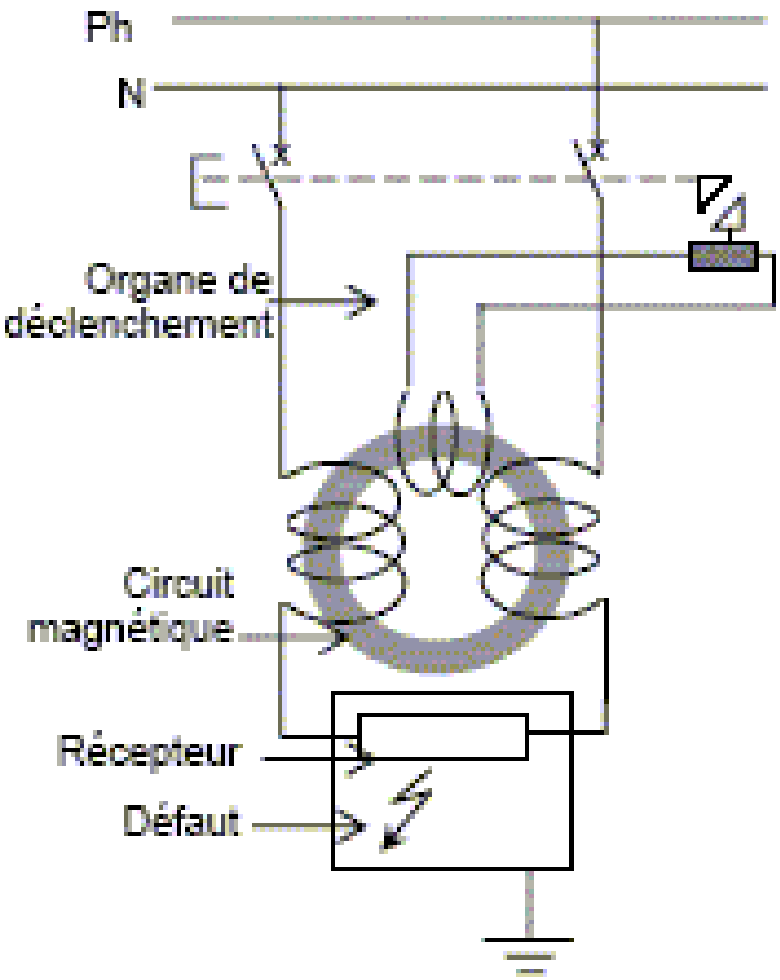
TGBT Tableau Général
Basse Tension

Distribution de l'énergie sectionnement et métrologie



Distribution de l'énergie protection



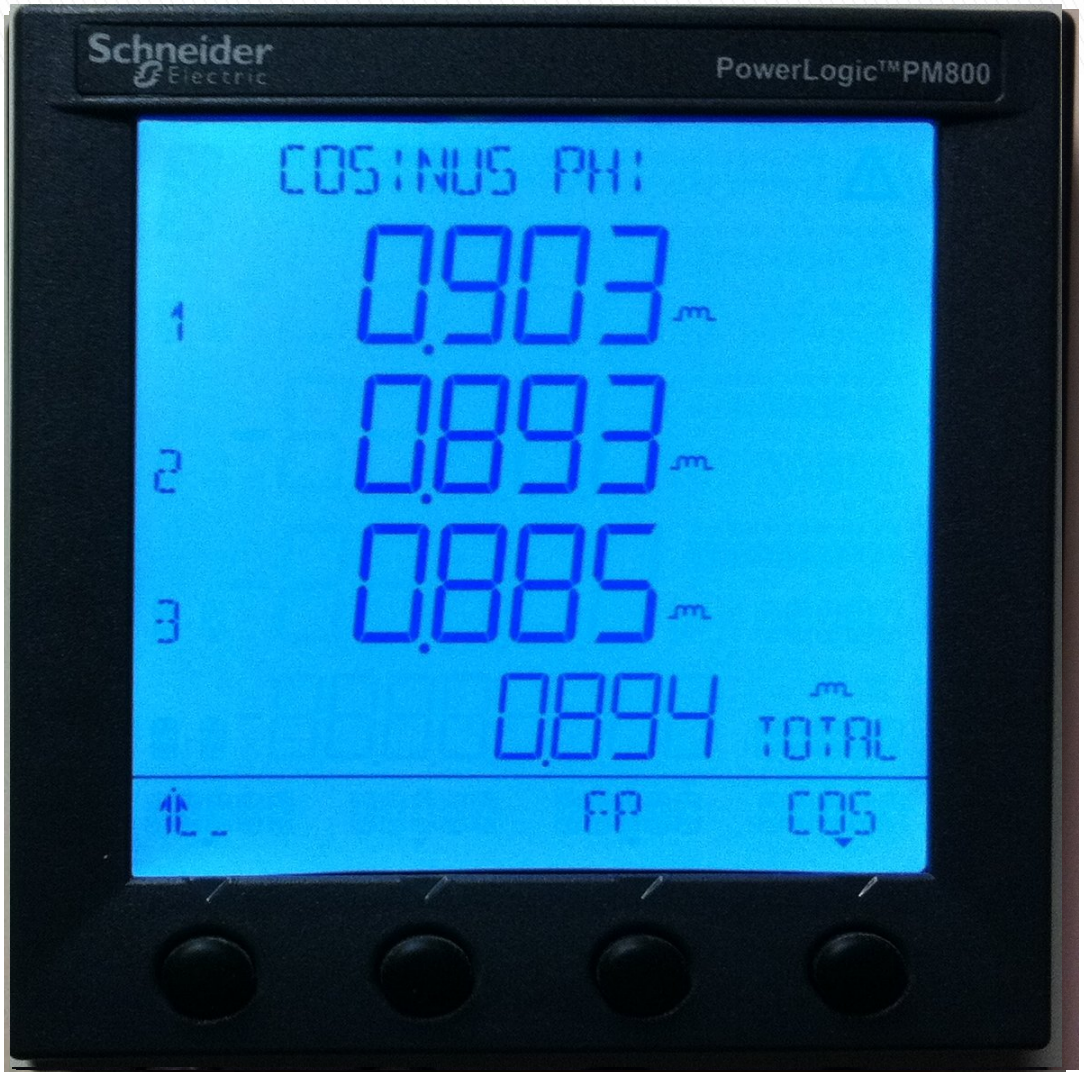


Disjoncteur différentiel monophasé

Section (mm²)	Intensité (A)	Puissance (W)
1,5	10	2300
2,5	16 (20)	3680
6	32	7360
10	40	9200
…		

Classe	Coef
B	3 à 5 * I_n
C	5 à 10
D	10 à 20

Distribution de l'énergie mesure



Onduleurs

Wikipedia : Un **onduleur** est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique délivrant un courant continu. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur statique de type continu/alternatif

Une **alimentation sans interruption** (*ASI*), **alimentation statique sans coupure** (*ASSC*)[1,2] (en anglais ***Uninterruptible power supply*** ou *UPS*) ou, du nom d'un de ses composants, **onduleur**, est un dispositif de l'électronique de puissance qui permet de fournir à un système électrique ou électronique une alimentation électrique stable et dépourvue de coupure ou de micro-coupure, quoi qu'il se produise sur le réseau électrique.

UPS

Constitué de la mise en cascade de :

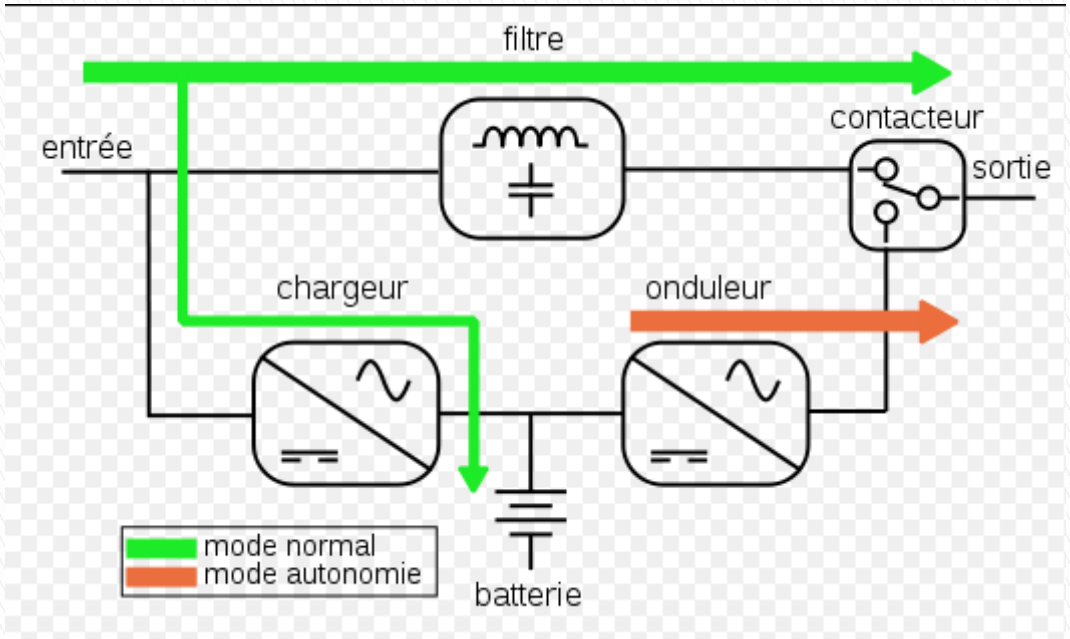
- un redresseur,
- un dispositif de stockage de l'énergie
  - batterie d'accumulateurs,
  - supercondensateurs,
- un onduleur
  - convertisseur produisant à nouveau du courant alternatif fonctionnant à fréquence fixe,
- accessoirement d'une source d'énergie externe (par exemple un groupe électrogène) si l'interruption de l'alimentation électrique se prolonge.
- le terme onduleur est fréquemment utilisé par abus de langage pour désigner l'ensemble du dispositif.

UPS, stockage de l'énergie

- sous forme chimique (batterie d'accumulateurs), on parle de *BESS* pour *Battery Energy Storage System* ;
- sous forme électrique (dans des supercondensateurs ou des bobines supraconductrices), on parle alors de « SMES » pour *Superconducting Magnetic Energy Storage* ;
- sous forme mécanique / énergie cinétique (utilisation d'une machine synchrone raccordée au réseau prenant le relais en cas de coupure). On parle alors d'accumulateur cinétique.
- Cependant ce stockage ne peut fonctionner que pendant un temps limité et l'alimentation SANS interruption, nécessite une source d'énergie de plus longue durée tel qu'un groupe électrogène..

UPS en attente passive (offline)

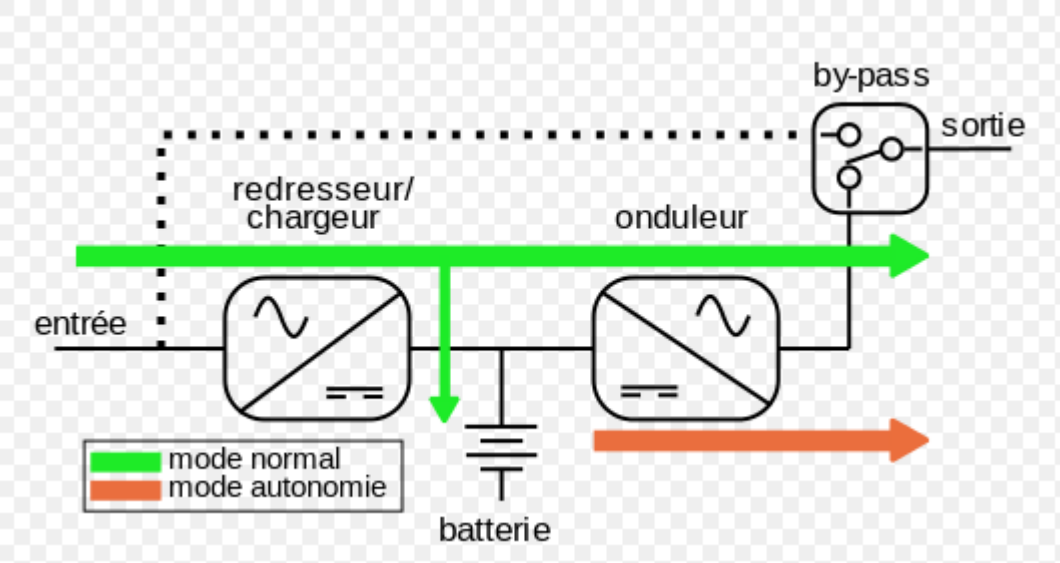
- En mode normal, l'onduleur est en attente, isolé de la charge par l'interrupteur d'ASI. La charge est branchée directement au réseau. Le chargeur, branché sur le réseau, assure la recharge de la batterie.
- En mode autonome, l'alimentation est transférée vers l'onduleur via l'interrupteur. Le temps de permutation est de l'ordre de 10 ms.
- Simple, économique, mais rudimentaire, n'est utilisable qu'avec de faibles puissances (moins de 2 kVA) et pour des appareils tolérant assez bien le risque.



EcoInfo

UPS à double conversion (online)

- En mode normal, l'onduleur est en série entre le réseau et la charge. La puissance fournie à la charge transite en permanence par le duo chargeur-onduleur qui réalise une double conversion alternatif/continu - continu/alternatif.
- En mode autonome, l'onduleur et la batterie assurent l'alimentation de la charge.
- Complet mais coûteux. L'onduleur régénère en permanence la tension fournie par le réseau, ce qui permet une régulation précise de la tension et de la fréquence de sortie (il y a même possibilité de fonctionner en convertisseur de fréquence, lorsque cela est prévu).
- Isolement de la charge par rapport au réseau : pas de perturbations et permutation instantanée
- Excellent choix pour protéger les applications critiques dans les moyennes et grosses puissances (10 kVA et plus).



UPS à accumulateur cinétique

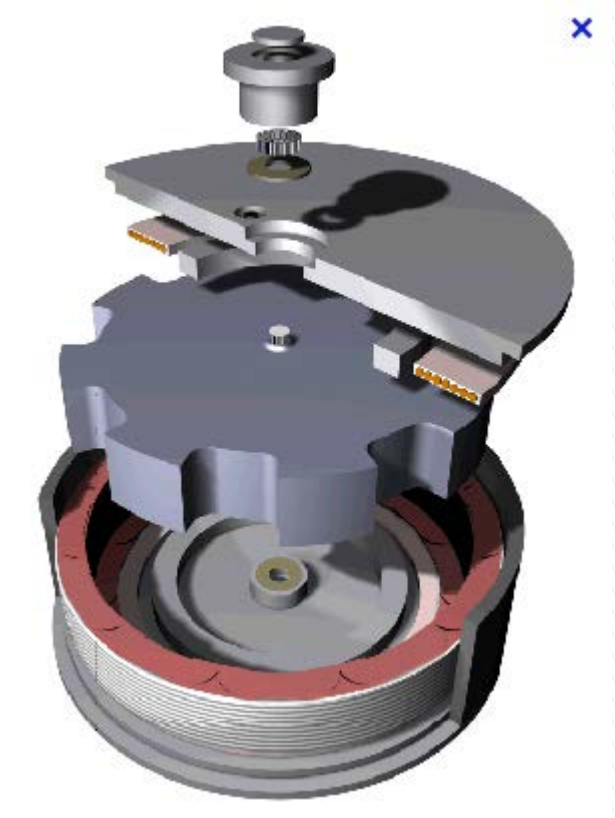
- Principe
  - L'énergie est stockée sous forme d'énergie cinétique dans une machine tournante
  - J est le moment d'inertie
  - $E = ½ J \omega^2$
  - Pour un disque $J = ½ M r^2$
- A.N.
  - Un disque de 275kg de diamètre 80 cm est lancé à 7000 t/mn
  - Quelle énergie permet-il de stocker en J et en kWh?
  - Pendant combien de temps il pourrait alimenter un datacentre de 250kW?
  - Combien de batterie au plomb de 12V, 40 A.h faut-il mettre pour avoir la même autonomie?

Gyrobus (credit Kneiphof)

UPS à accumulateur cinétique

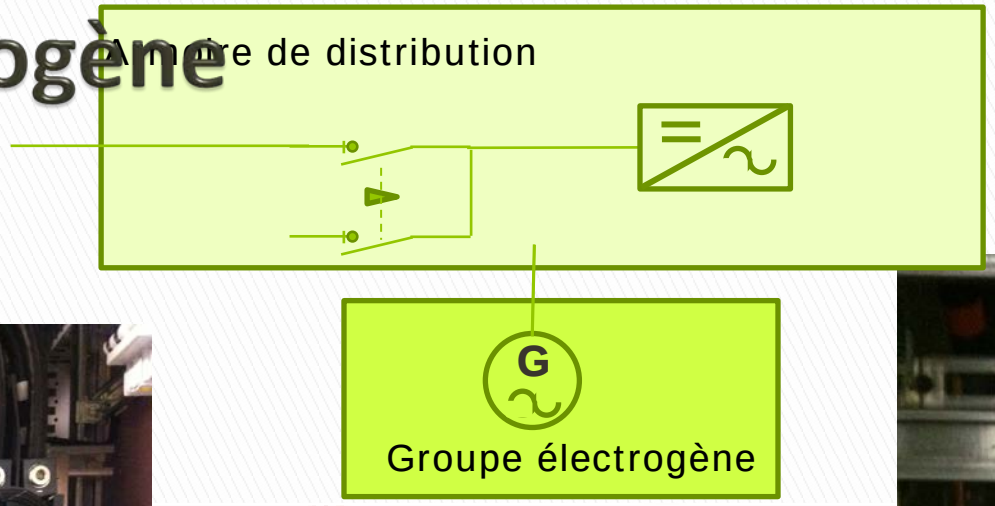
- Principe
  - Le disque de 275kg lancé à 7000 t/mn stocke 8 MJ, soit 2,2kWh.
  - En pratique il pourra assurer une charge de 250kW pendant une quinzaine de secondes (32 théorique); le temps de démarrer un groupe électrogène.

- Les avantages, les inconvénients
  - Pas de batteries : au niveau éco responsabilité c'est un gros plus, pas non plus de recyclage des batteries
  - Pas de contrainte de température en exploitation
  - Meilleure disponibilité, meilleur rendement
  - Plus cher (à l'achat), ne permet pas les autonomies longues



UPS dynamiques Caterpillar avec stockage de l'énergie cinétique à partir de 250kVA

Distribution de l'énergie Groupe électrogène

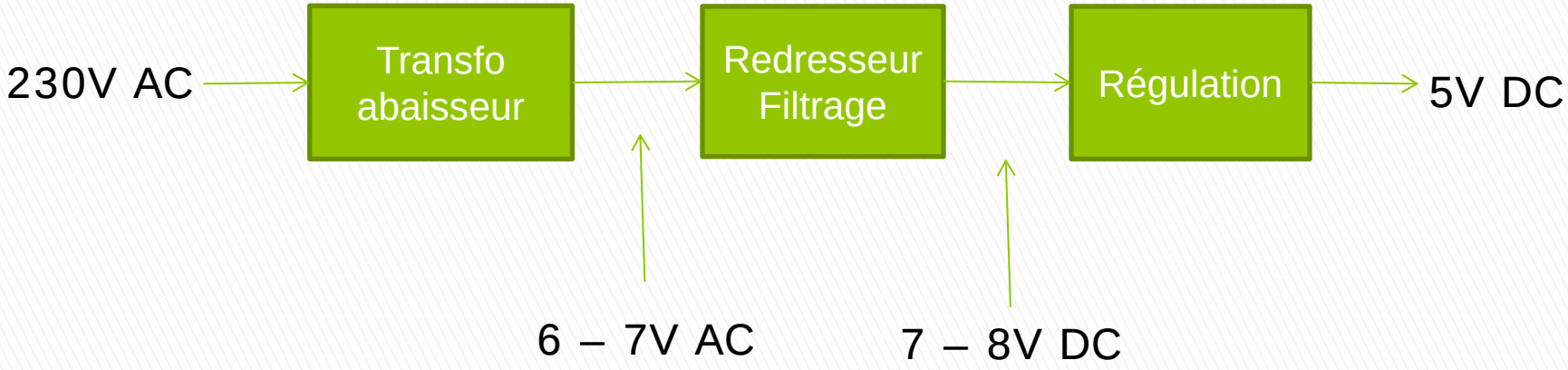


Etapes du basculement sur groupe électrogène

- https://lafibre.info/ovh-datacenter/test-de-groupes/?PHPSESSID=sie4e04atgco9g74k1ut2pm4g5
- Le film

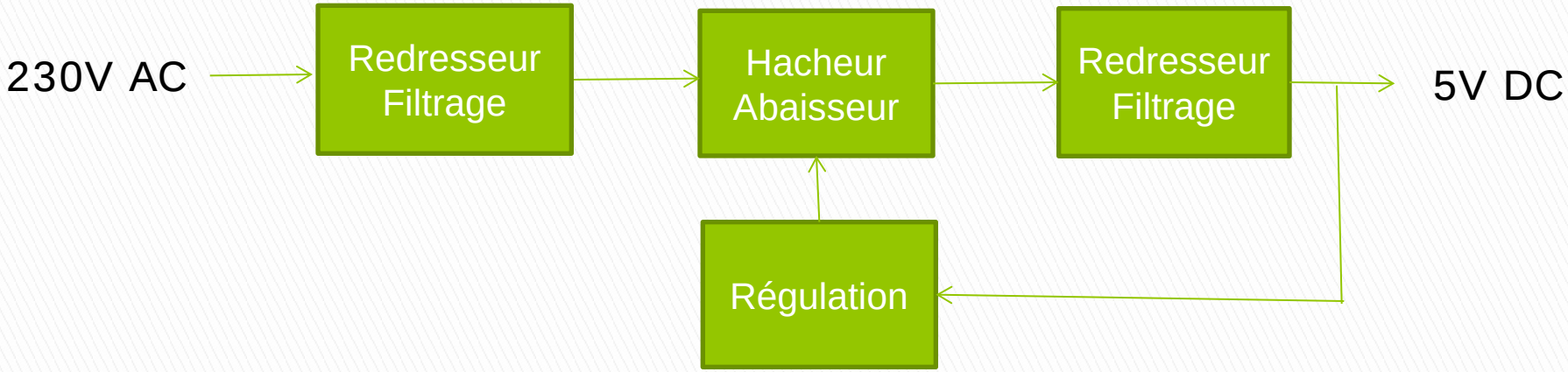
Alimenter un dispositif électronique (1)

- Le problème posé :
  - La distribution électrique est en 230V AC
  - Les besoins des équipements sont en : 3.3, 5, 12, … V DC
- Solution : « l'alimentation » ! Deux principes :
  - Avant : linéaire, rendement : dans les 60%



Alimenter un dispositif électronique (2)

- Maintenant : alimentations à découpage



- 230VAC 50Hz => 325VDC => 325VAC/HF => 5-6VAC/HF => 5VDC

- Rendement : couramment > 80% => ecolabels

Alimentation des serveurs

Alimentations « 80 PLUS » à 50% de sa puissance maximale :

- Bronze : 85%
- Gold : 92%
- Titanium : 96%

Required Efficiency depending on % of Rated Load

80 PLUS Certification	115V Internal Non-Redundant			230V Internal Redundant			
% of Rated Load	20%	50%	100%	10%	20%	50%	100%
80 PLUS	80%	80%	80%	N/A			
80 PLUS Bronze	82%	85%	82%	—	81%	85%	81%
80 PLUS Silver	85%	88%	85%	—	85%	88%	85%
80 PLUS Gold	87%	90%	87%	—	88%	92%	88%
80 PLUS Platinum	90%	92%	89%	—	90%	94%	91%
80 PLUS Titanium	—	—	—	90%	94%	96%	91%

Mean that :

Entre Bronze et Titanium, on peut économiser 11 % d'énergie:
1 kW * 8760h * 0,07 € = 613 € * 0,11 = 67,43 € / an

Un petit DC de 100 kW IT, « Bronze » => 876 MWh = 61,3 k€ / an
Le même DC de 89 kW IT, « Titanium » => 780 MWh = 54,6 k€/an
PUE = 2 : 200 kW => 122,6 k€ / an; économie 192 MWh = 13,5 k€ / an

Energie quand tu nous tiens

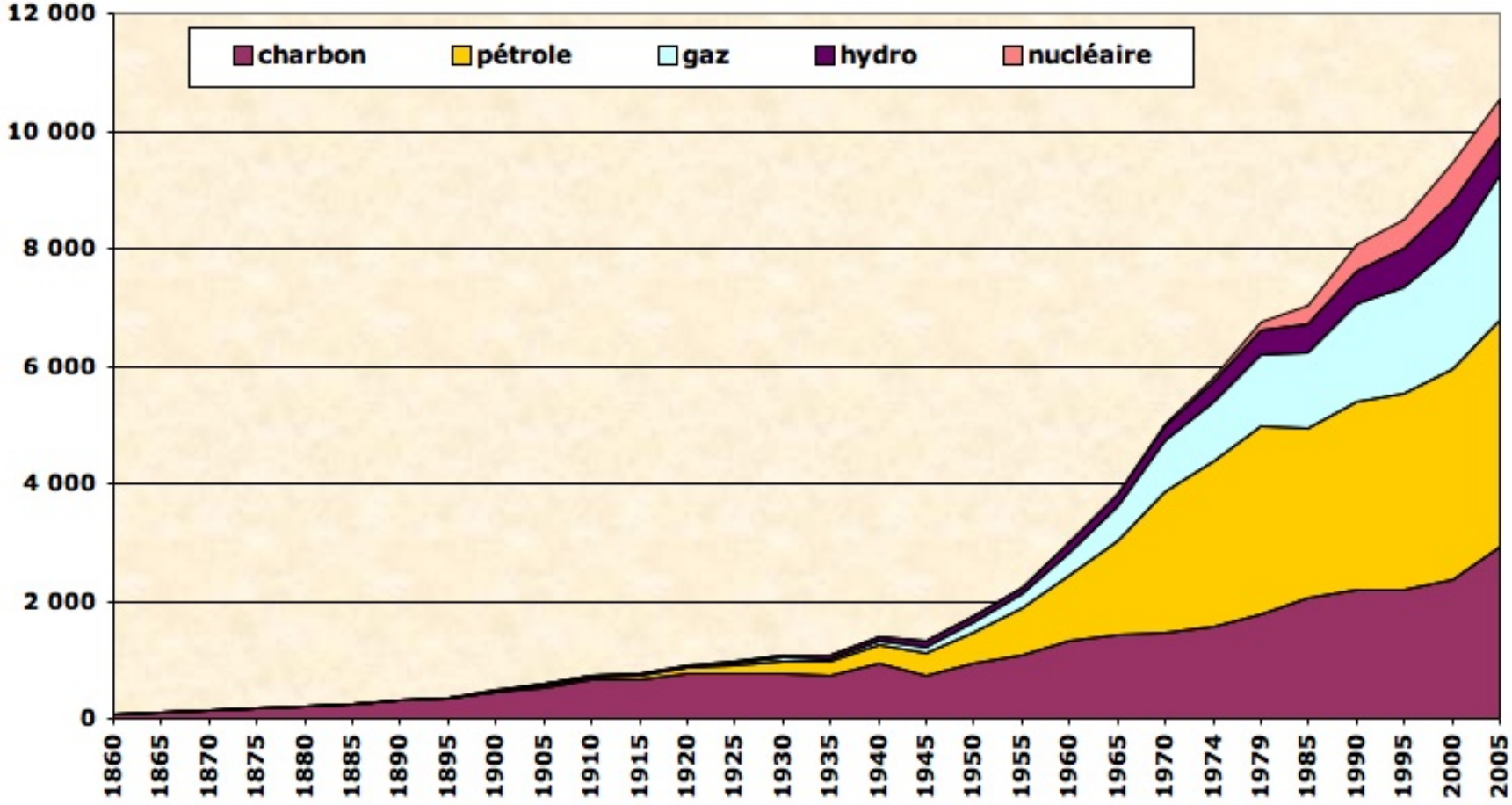
Différentes unités sont utilisées selon les métiers, les professions; la conversion est « aisée » (☺) . Un extrait :

- La référence : dans le SI on parle en Joules (J)
- Les TIC utilisent les kWh, MWh, GWh, TWh …
- L'industrie et le monde des affaires parlent en TEP, Tonnes équivalent Pétrole; TOE en anglais. En barils si on parle de réserves ou de production de pétrole
- Dans le monde de la climatisation : calorie et Btu

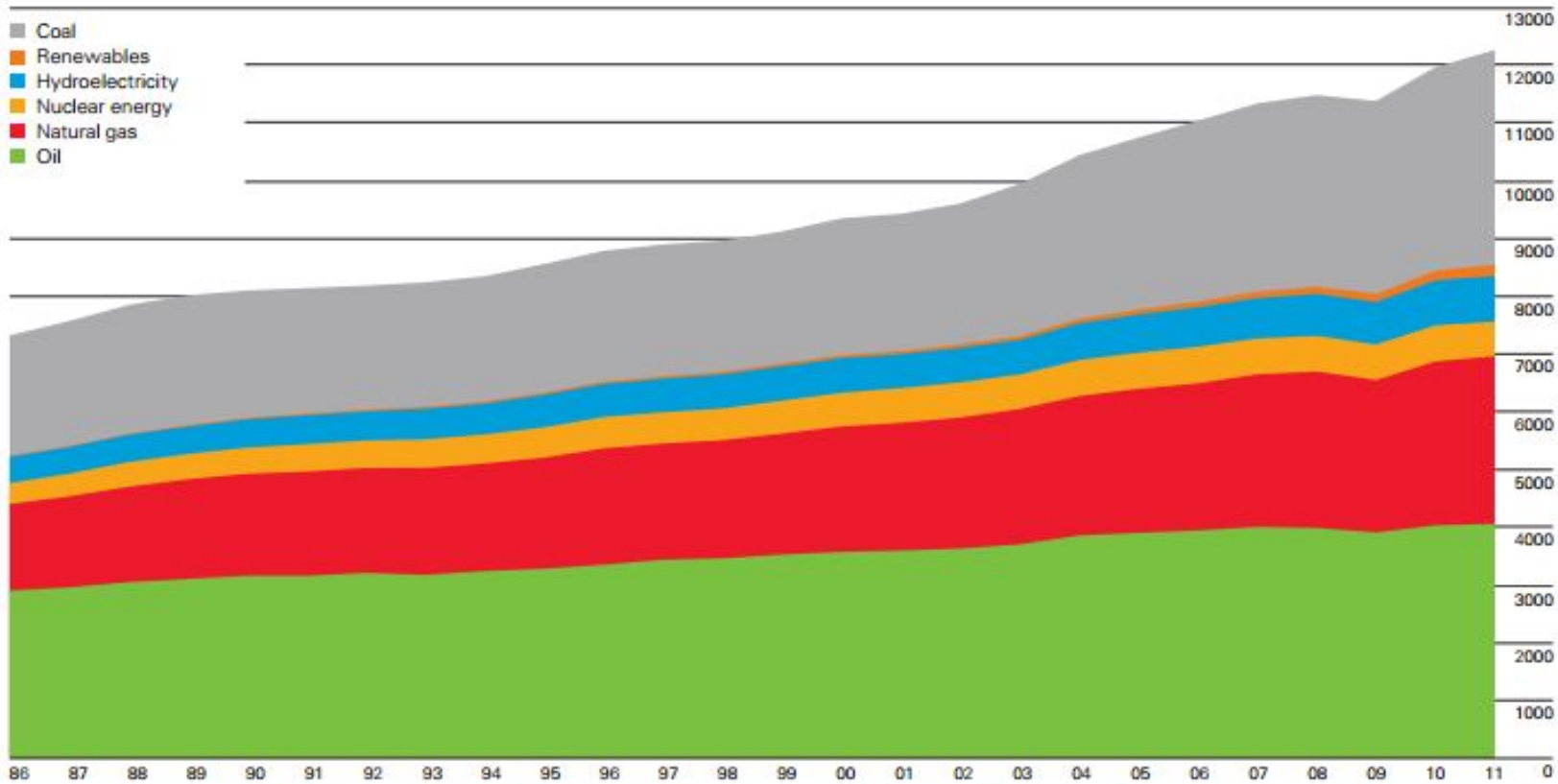
1 TOE = 7,3 barils (159 l) = 1160 litres = 42 US gallons =

- 41,86 GJ = 10 Gcal ; 1 cal = 4,18 J ; 1 J = 1 W.s
- 39,68 Mbtu ; 1 Btu = 1060 J = 252 cal
- 11 630 kWh ; 1 l de fuel = 10kWh

L'énergie dans le monde



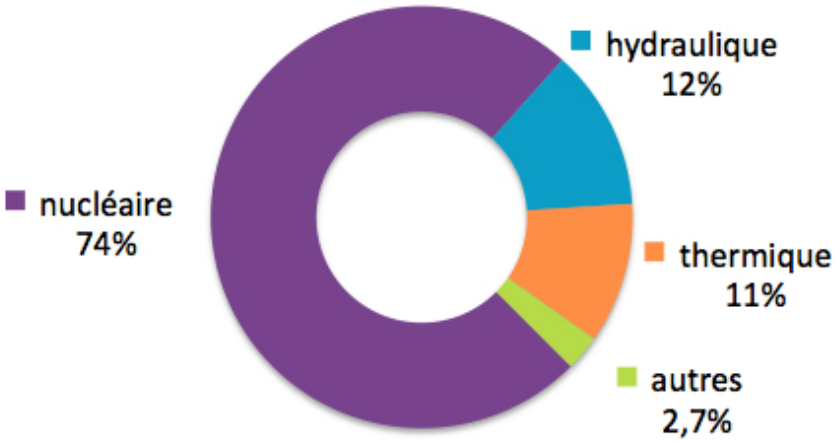
L'énergie dans le monde, plus proche

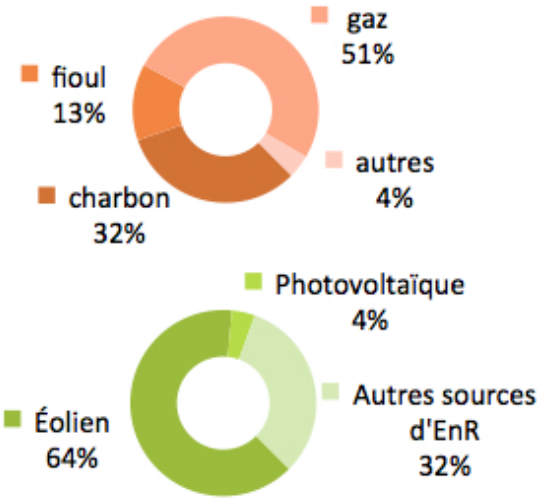


World primary energy consumption grew by 2.5% in 2011, less than half the growth rate experienced in 2010 but close to the historical average. Growth decelerated for all regions and for all fuels. Oil remains the world's leading fuel, accounting for 33.1% of global energy consumption, but this figure is the lowest share on record. Coal's market share of 30.3% was the highest since 1969.

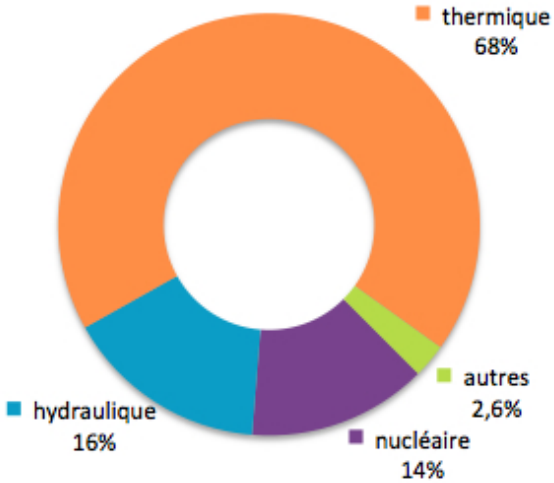
Electricité dans le monde

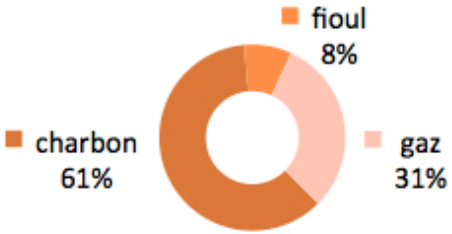
550 TWh
France[1]





19800 TWh
Monde[2]



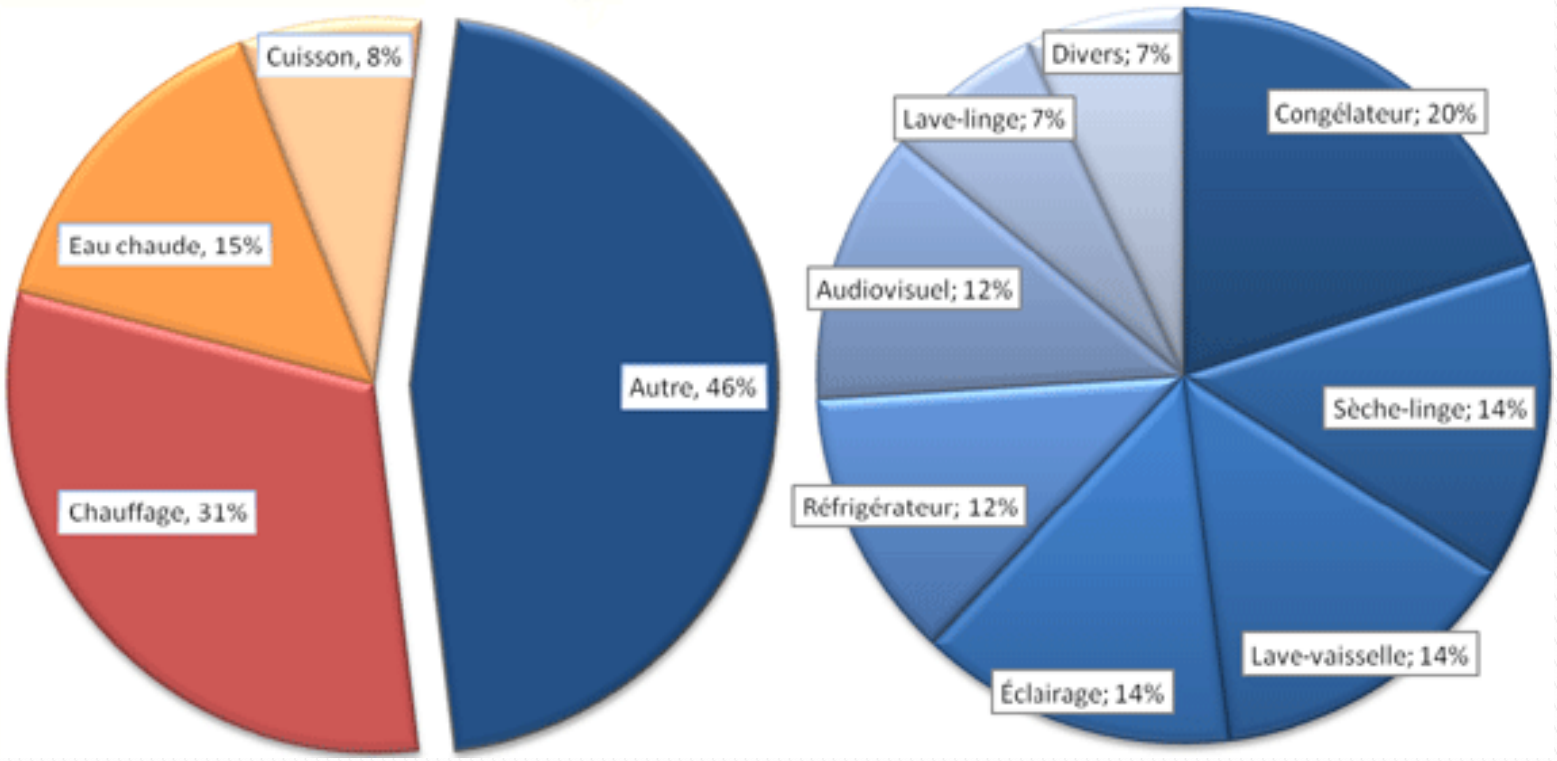


Atlante & Cie
atlante.fr

L'électricité en France

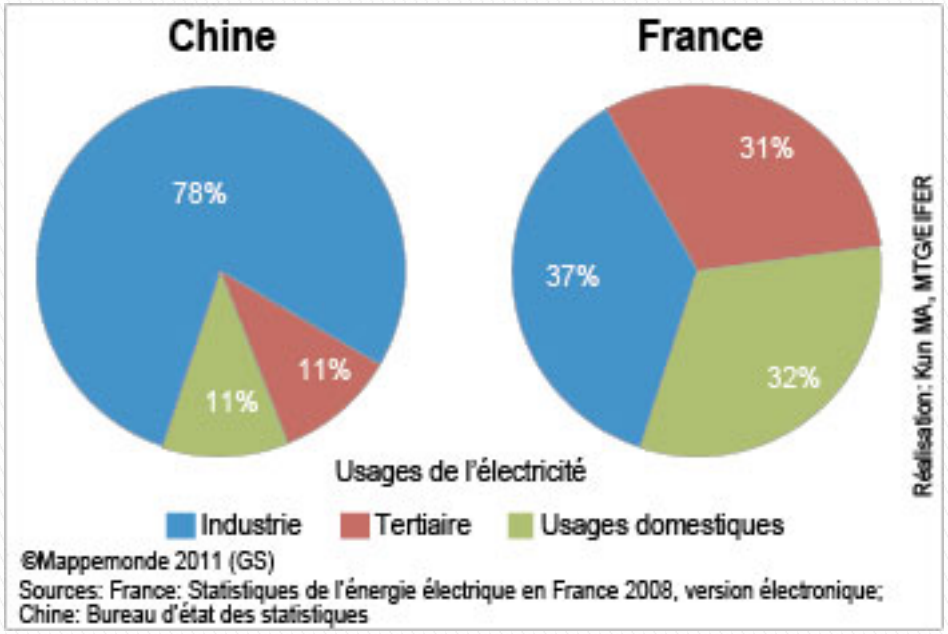
Energies renouvelables en Europe

L'électricité en France



Répartition de la consommation électrique moyenne d'un foyer français

L'électricité en France



Répartition de la consommation électrique moyenne d'un foyer français

Coût de l'électricité en France

- Prix de l'électricité, tarifs « standards » (€ TTC):

Option	Abon	HP	HC	HP	HC	HP	HC
Base	65-652	0.1209					
HP/HC	94-762	0.1311	0.0893				
Tempo	110-573	0.0836	0.0696	0.1194	0.1001	0.4966	0.1880

- Prix de l'électricité, tarifs « industriels » : Exemple de tarif vert A5 en €

Version	Prime fixe annuelle €/kW	HIVER			ÉTÉ	
		PTE	HPH	HCH	HPE	HCE
TLU	98.76	0.06916	0.05564	0.04237	0.03950	0.02451
LU	68.64	0.10678	0.06406	0.04386	0.04044	0.02529
MU	48.12	0.14879	0.07559	0.04776	0.04165	0.02597
CU	24.84	0.22989	0.09934	0.05271	0.04311	0.02615
Coef. dépassement		1	0.71	0.31	0.27	0.25
Energie Réactive - Facturation (€/kVARh)				0.01770		