



Les Réseaux électriques

Introduction

Histoire de l'électrification

Grandeurs importantes

Structure des grands réseaux

Principes fondateurs du fonctionnement

Fonctionnement normal et phénomènes exceptionnels

« Stratégie » de pilotage des réseaux Européens

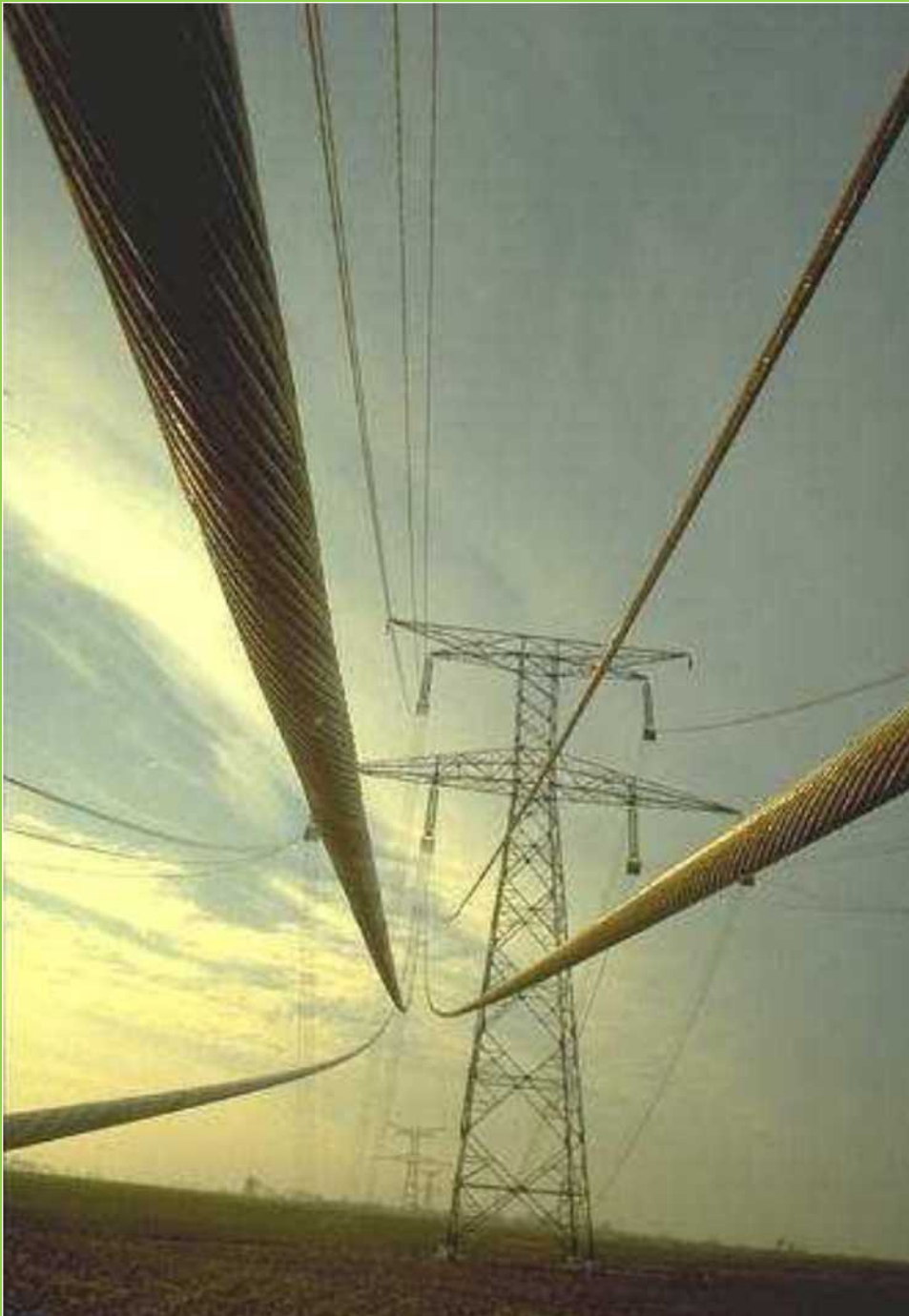
Les Réseaux électriques

Qu'est ce qu'un incident ?

Quel est l'intérêt de l'analyse des incidents ?

Quels sont les principaux défauts affectant le réseau ?

Quels sont les outils d'analyse d'incidents ?



Les Réseaux électriques

Introduction



- *Introduction*



L'énergie électrique aujourd'hui...

- Elle est présente dans la vie quotidienne de pratiquement tous les habitants de la planète.
- C'est une forme d'énergie facilement transportable et pratique à convertir en d'autres formes : mécanique , thermique , etc...

- *Introduction*

Les réseaux électriques aujourd'hui...

- L'énergie électrique est acheminée quasi exclusivement par des réseaux électriques.
- Ces réseaux sont à l'échelle continentale (l'Europe constitue, par exemple, un gigantesque réseau dans son fonctionnement normal), et ce pour des raisons techniques et économiques.
- Ils constituent une plaque tournante du marché de l'énergie.
- Leur fonctionnement est au cœur des problématiques actuelles liées à l'énergie.



- *Introduction*

En resume :

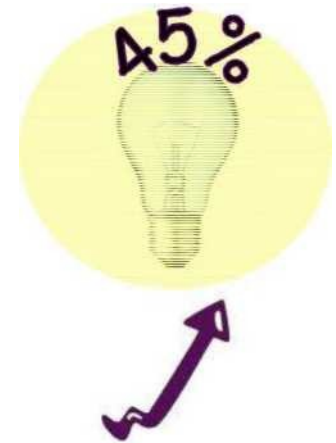
-L'énergie électrique représente jusqu'à 45% des énergies primaires, en France comme dans la majorité des pays développés.

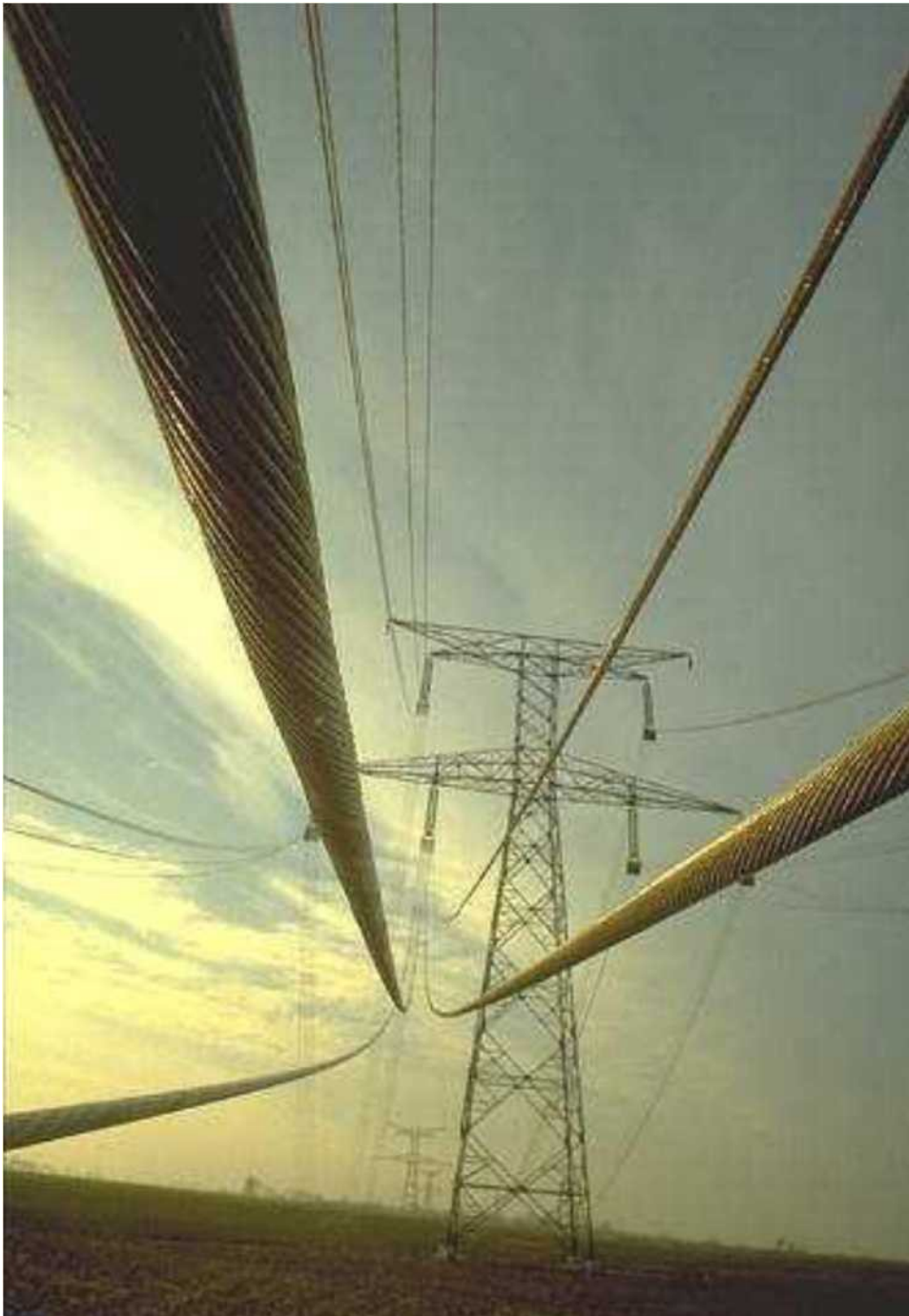
-La consommation électrique est régulièrement croissante.

-Il semble que les difficultés liées à l'envolée du prix du pétrole ne fasse qu'augmenter ces proportions.

-L'importance des réseaux électriques dans nos sociétés est donc aujourd'hui tout à fait centrale, et semble ne pouvoir que prendre de l'ampleur à l'avenir...

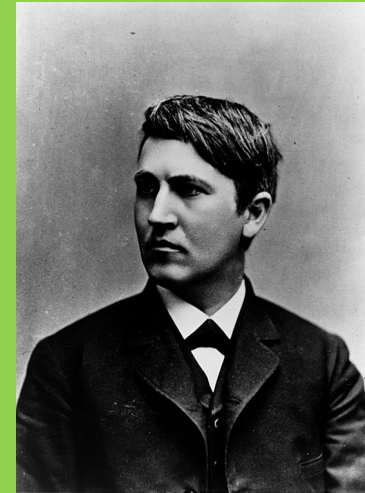
Les réseaux à la veille de grands changements ?





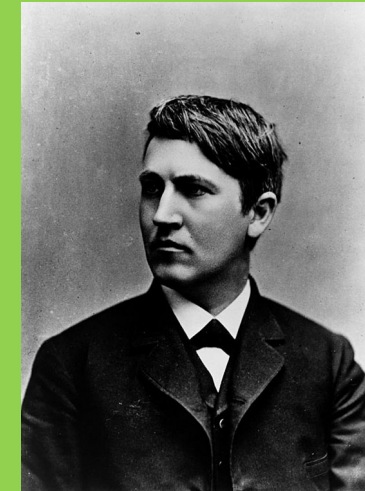
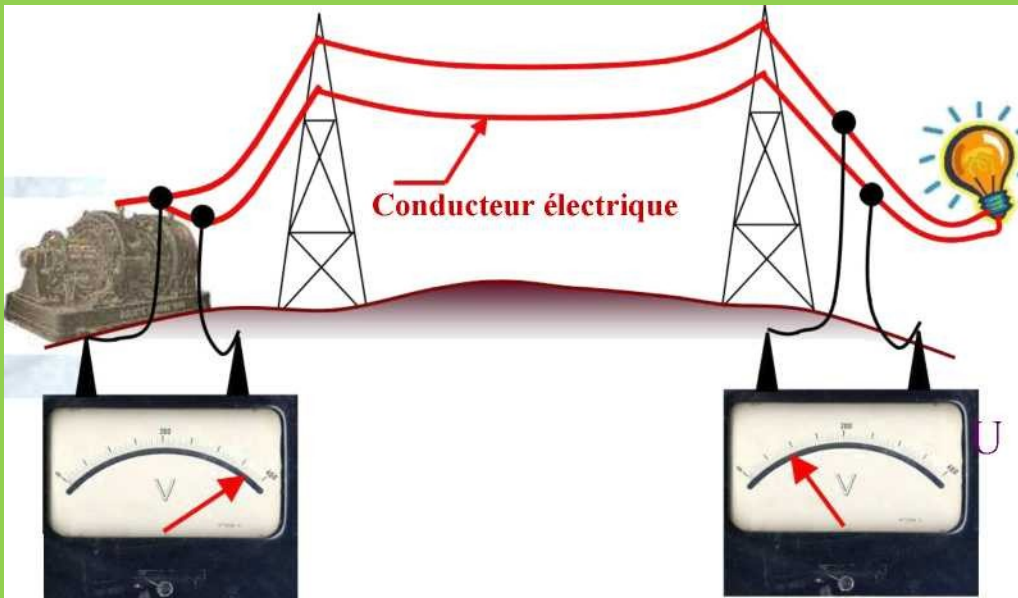
Les Réseaux électriques

Histoire de l'électrification

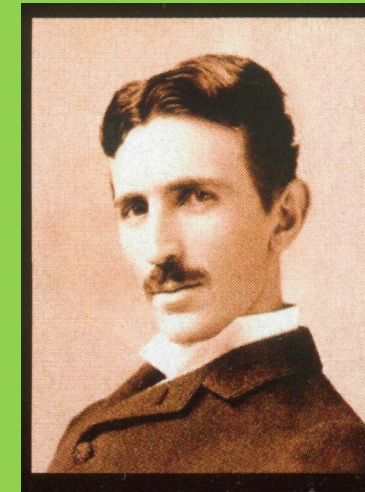


Edison a été un pionnier dans la réalisation des premiers réseaux électriques en courant continu.

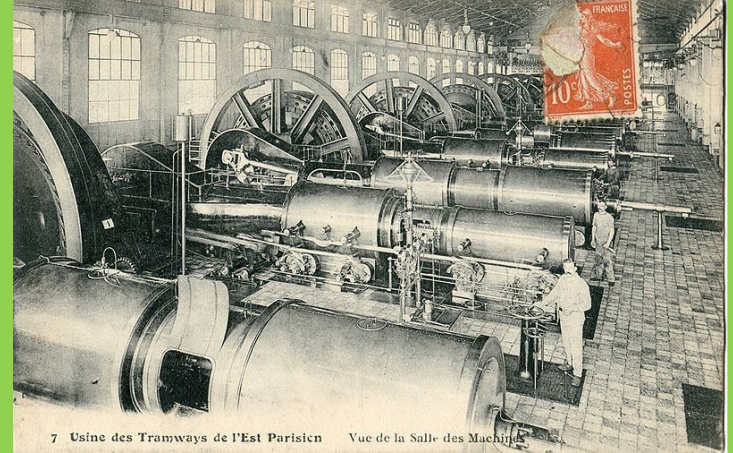
Les lignes sont le siège de pertes et de « chutes de tension »



Edison a été un pionnier dans la réalisation des premiers réseaux électriques en courant continu.



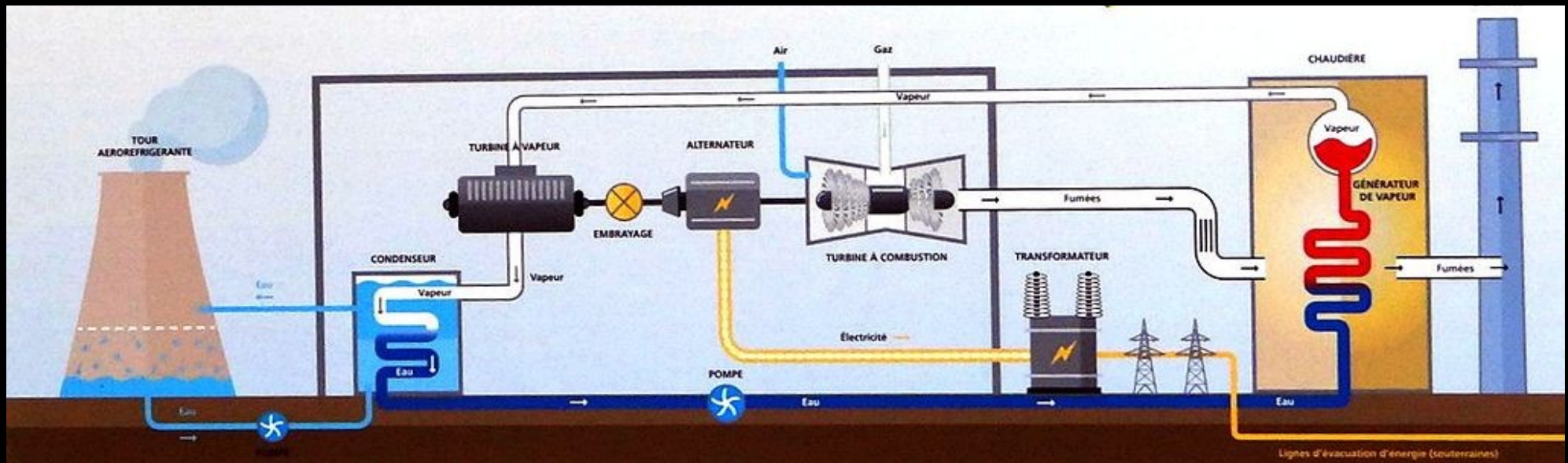
Tesla, un inventeur qui a conçu les premiers réseaux électriques en courant alternatifs



CENTRALE THERMIQUE



Centrale Thermique Cycle combiné

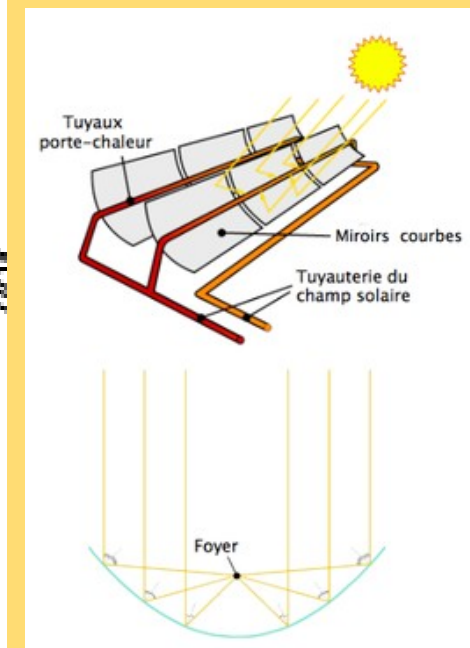
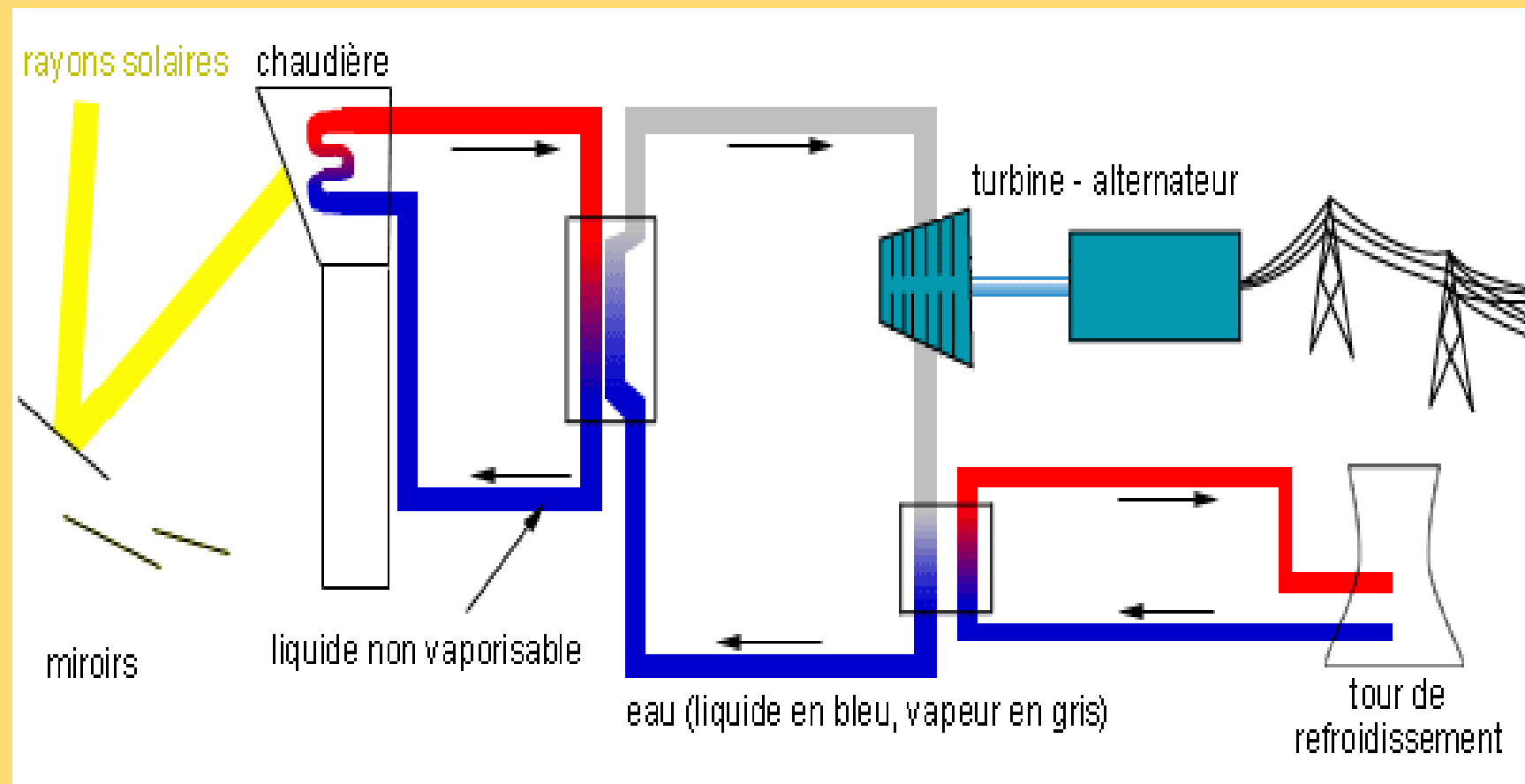








CENTRALE SOLAIRE



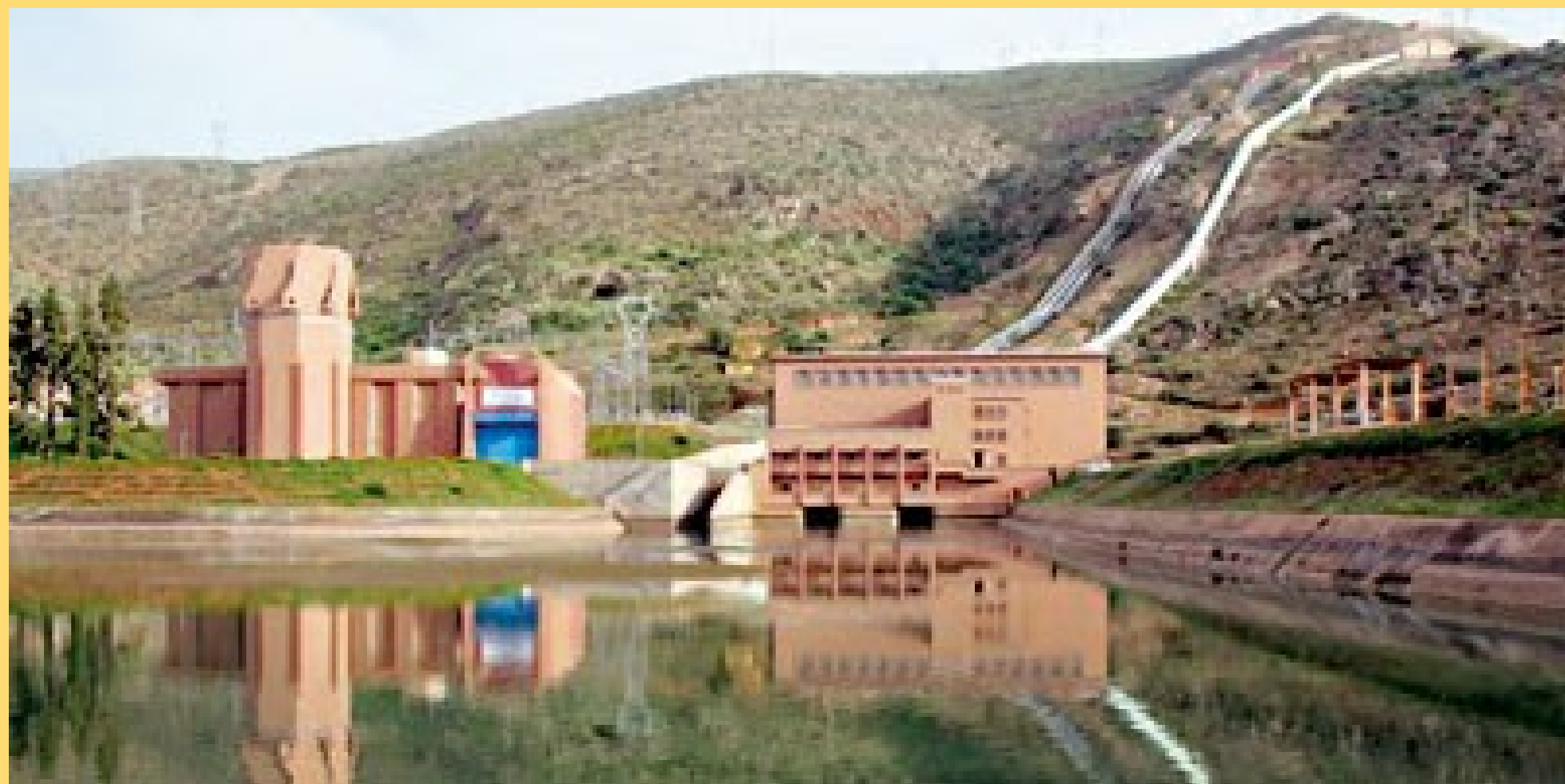
CENTRALE EOLIENNE



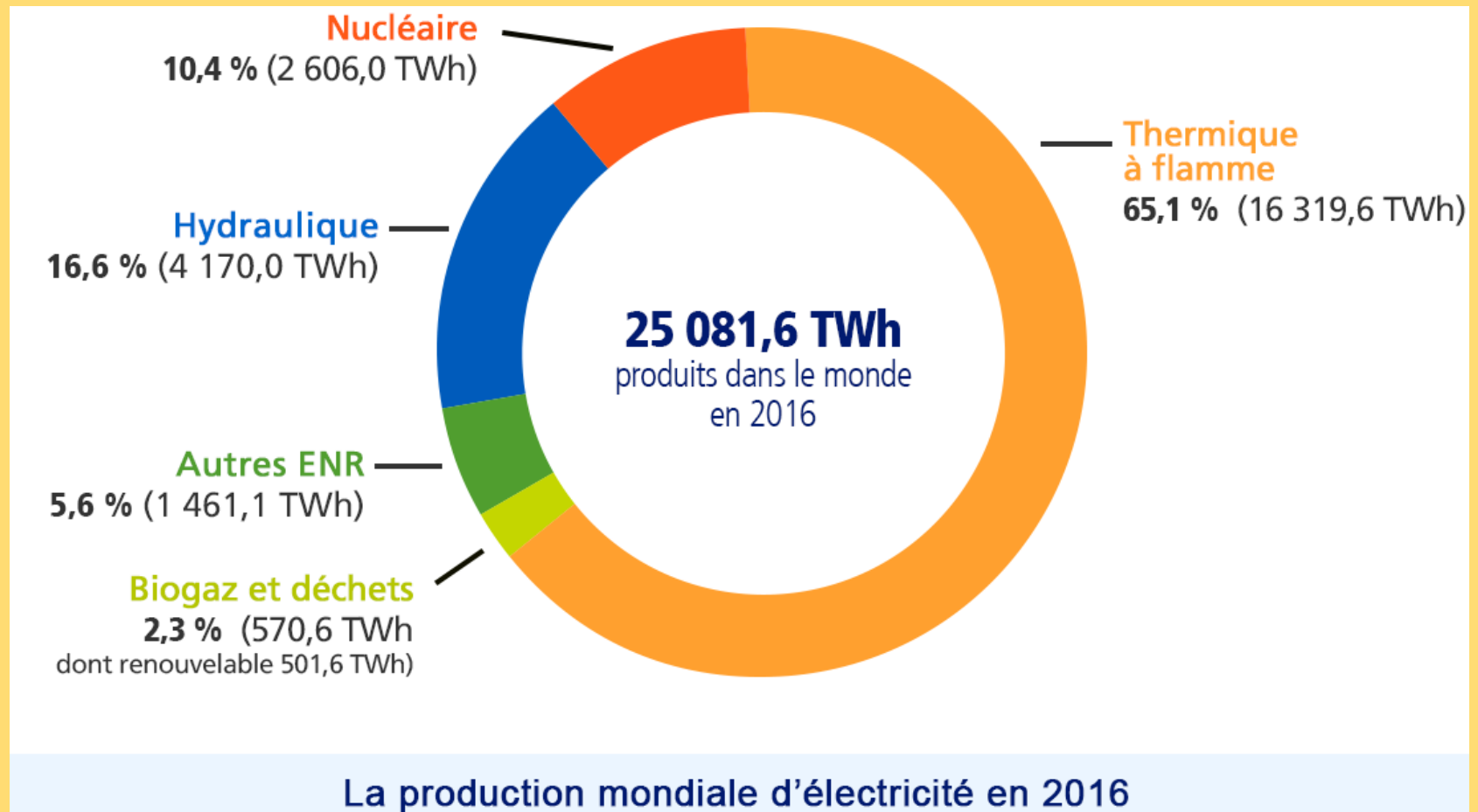






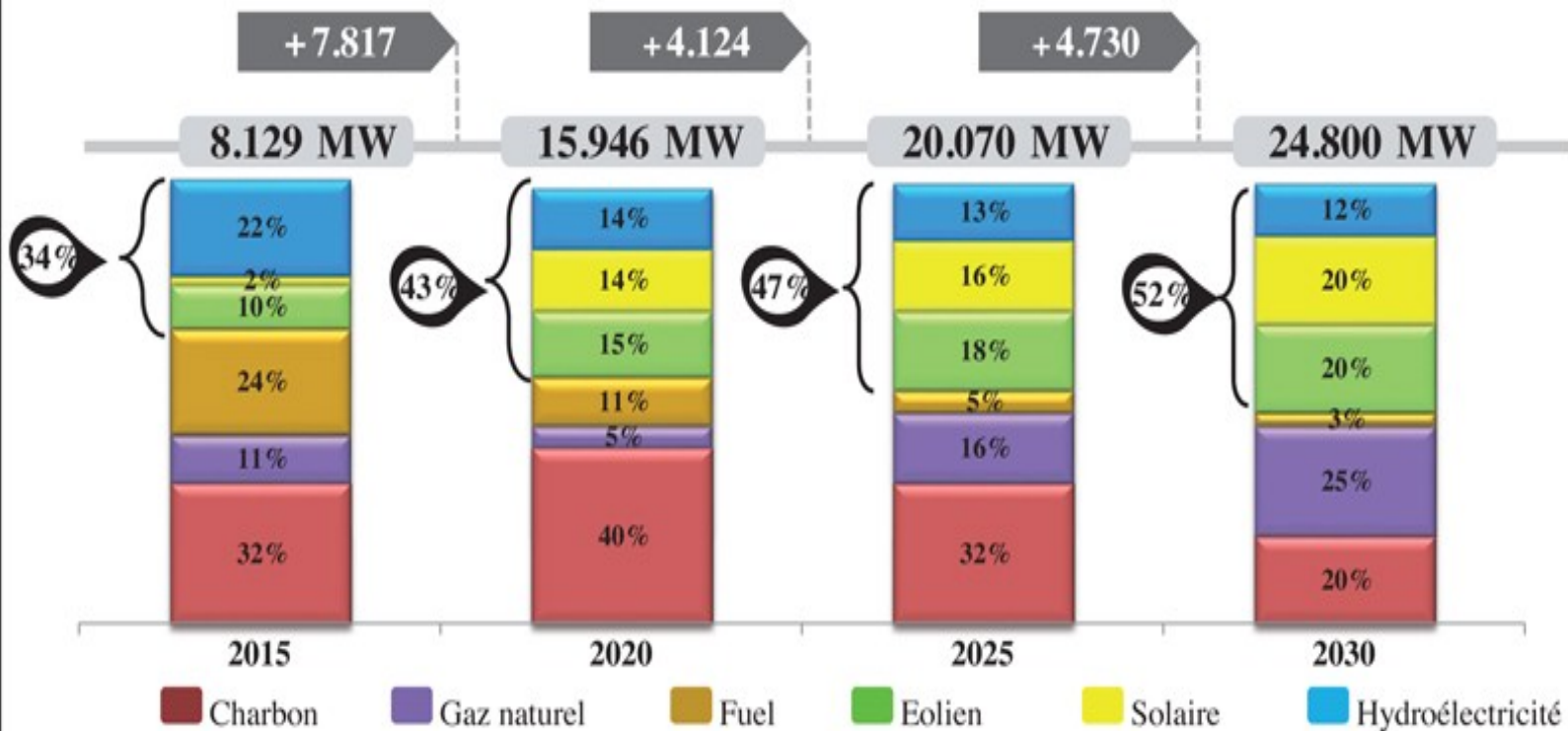


STATISTIQUES



STATISTIQUES

Accélération de la transition énergétique



Source: Ministère de l'Energie, des Mines et du Développement durable



9 754 MW en Allemagne



3 397 MW en Espagne

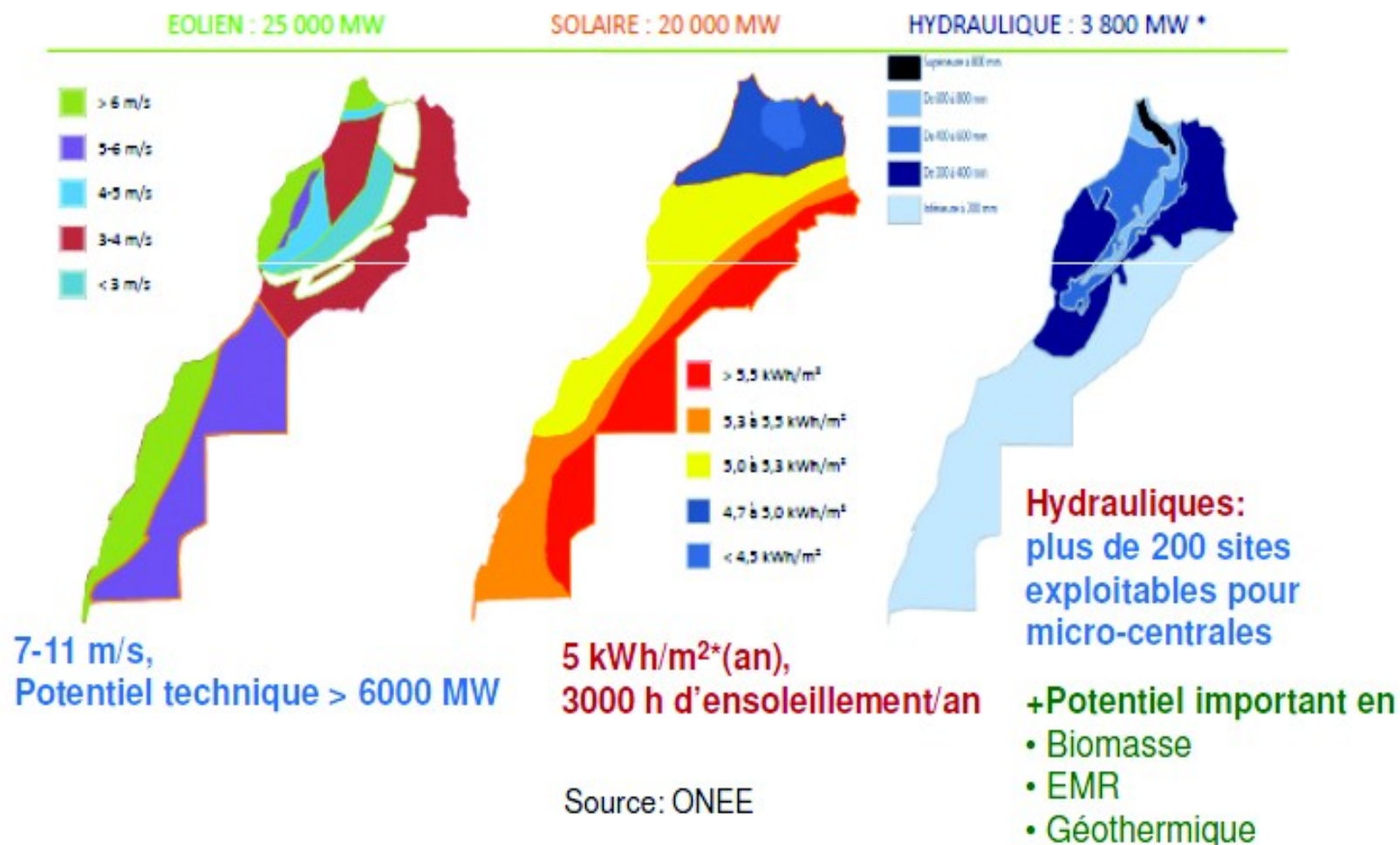


2 498 MW au Danemark



83 MW en France

Le Maroc dispose d'un potentiel considérable en EnR





Choix stratégiques de l'onde électrique

**Nécessité de transporter l'électricité
à une tension élevée**

Courant alternatif ou continu ?

Pourquoi une tension sinusoïdale ?

Un système monophasé ou triphasé ?

Fréquence des réseaux électriques

Choix stratégiques de l'onde électrique

Grandeurs électriques importantes

Surveillance de la tension

Intensité et problématique de l'IMAP

Intensité de court circuit



- La diversité des sources permet de « jongler » entre :

Des unités qui produisent beaucoup de puissance mais dont les changements de régime sont lents à mettre en œuvre (tranche nucléaire par exemple)

Des unités facilement manœuvrables mais dont les puissances de pointe sont assez faibles, ou dépendent d'éléments naturels (éoliennes, barrages, etc.).

- Les choix des ressources majoritaires sont politiques, technologiques et économiques. Les ressources utilisées sont très différentes d'un pays à l'autre, même pour deux pays voisins et assez semblables :

Structure des grands reseaux electriques

Le transport et la distribution :

- Les reseaux transportent l'energie electrique sous laforme de systemes triphases de tensions (sinusoïdales) dont les caracteristiques sont : la frequence, les niveaux de tension et les couplages des terminaisons.

- Frequence:

La frequence est normalisee et ne presente que deux valeurs possibles dans le monde :
50 Hz ou 60 Hz.



Légende			
50 HZ	■	60 HZ	■
220 a 250V		100 a 130V	
		220 a 250V	

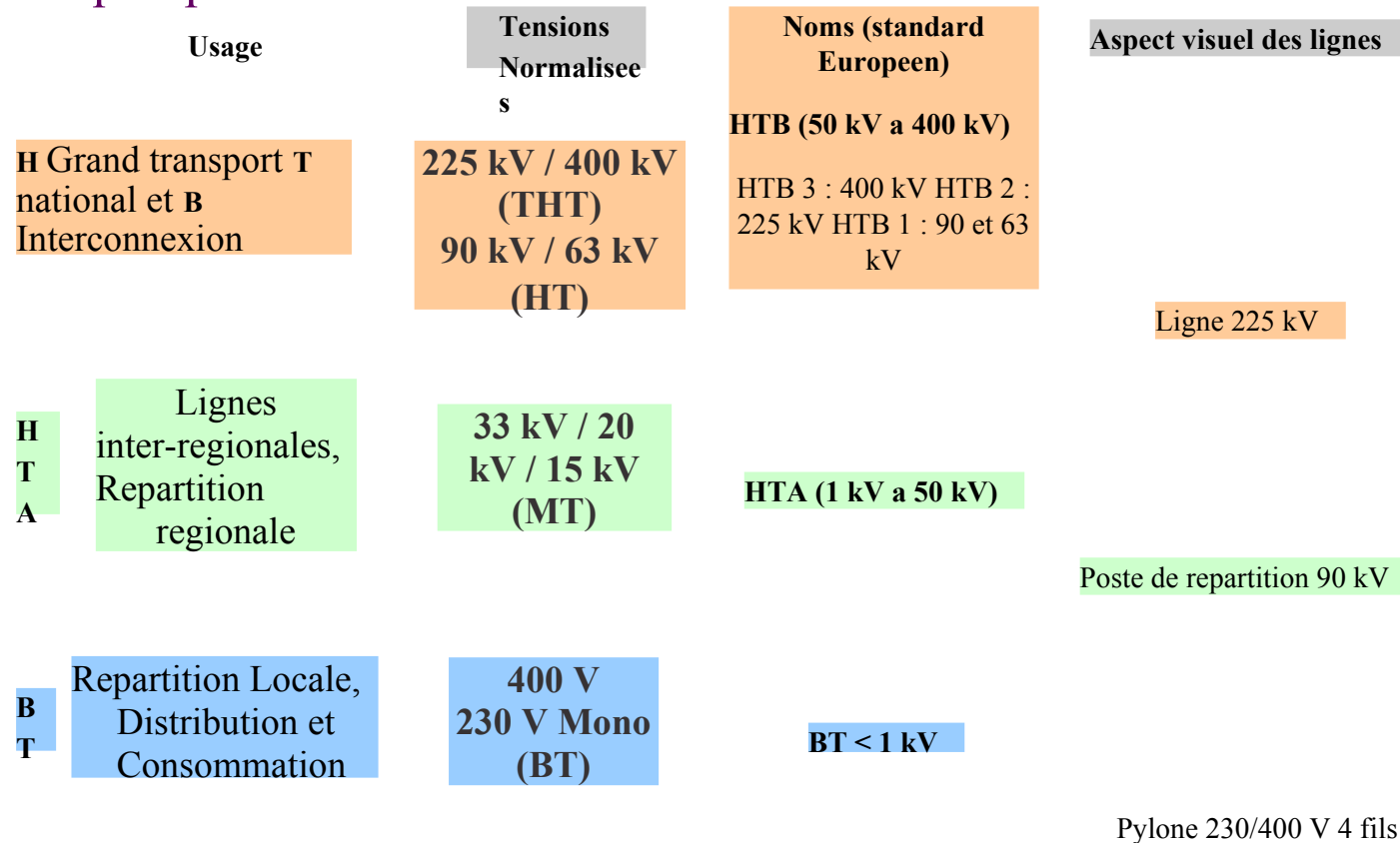
50 HZ 100 a
130V

Repartition mondiale des frequences des reseaux

Structure des grands reseaux electriques

-Niveaux de tension :

Les reseaux electriques sont organises a partir de quelques niveaux de tension normalises.

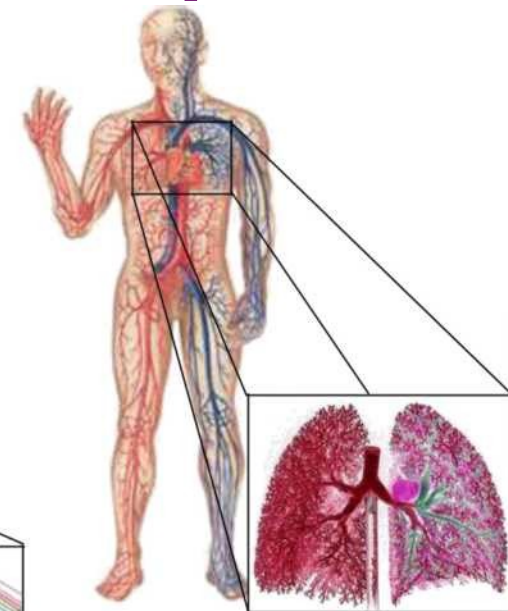
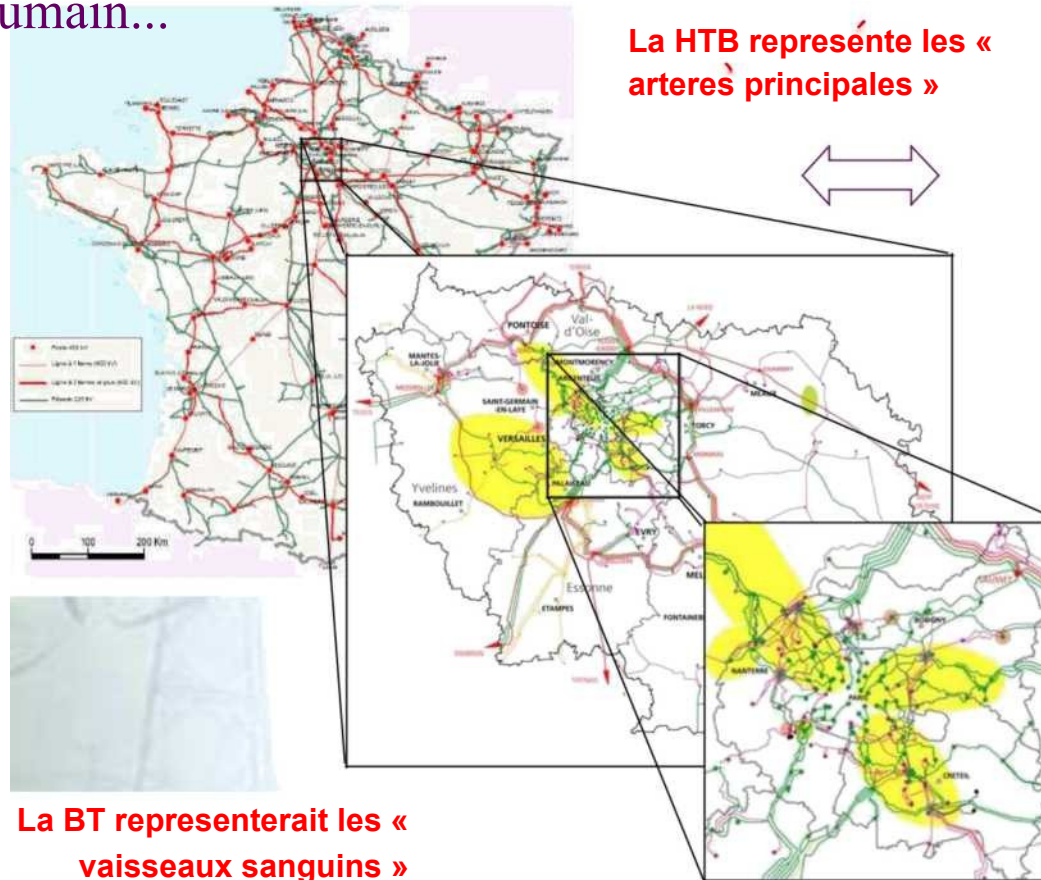


Le respect de ces niveaux garantit la surete des installations.

Structure des grands reseaux electriques -

Maillage territorial :

Les reseaux « maillent » les territoires a partir de grandes lignes qui se ramifient, a l'image des veines et des arteres du corps humain...



La HTA représente les « artères secondaires »

tONU Ot HUMIti (ucnuouts AVAMT KMM OAICINI	mm (t UMSOMS
a<wrm dJlUmMUUOA	V 460 kV
mAInti«o »n (oraMton op<«t>on/v"lle	V 73% k V
HBortmwnl (HfM	V 33 kV
p«(form*m" lldwKju* *1 Konomiqu* du lyittlM	V < 63 kV

Structure des grands reseaux electriques

- Interconnexion :

Les reseaux fonctionnent actuellement en « interconnexion generalisee » internationale. Cela permet essentiellement des echanges commerciaux mais a la base etait necessaire afin de ne pas sur-dimensionner le parc de production de chacun.

A titre d'exemple, le MAROC est inter-connectee a ses voisins

Tous ces pays forment ainsi un seul et meme reseau...

1

Principes fondateurs des reseaux electriques

\ - Transport en haute tension et facteur de puissance :

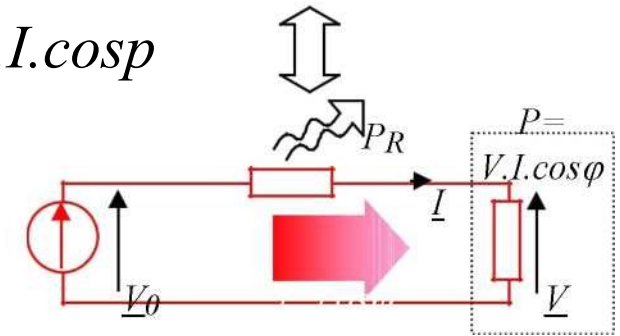
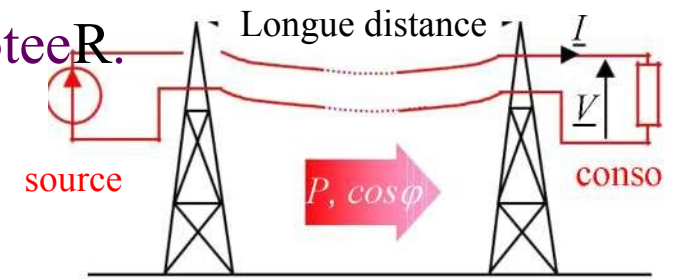
- Tout conducteur electrique presente une « impedance » dont la partie « resistive » est notee R .

- Le transport de l'energie de la source vers la consommation

revient à l'acheminement de la puissance : $P = V \cdot I \cdot \cos \phi$

- La puissance perdue dans la resistance ^

s'ecrit : $P_R = R \cdot I^2$, ou : $P_R = R \cdot \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \phi}$



Pour acheminer la puissance P avec un

minimum de pertes : La tension V doit etre la plus grande possible, le facteur de puissance doit etre le plus proche possible de 1.

NB : en Russie, il existe des lignes a 1MV...

Principes fondateurs des reseaux electriques

Utilisation du regime sinusoidal :

- En dehors du contexte historique, les raisons qui conduisent au choix definitif du regime alternatif sont diverses et complexes.
- Une comparaison des systemes continu et alternatifs s'impose :

Regime alternatif

- Permet l'utilisation de transformateurs pour elever et abaisser la tension.
- Facilite la coupure des courants par le passage naturel par zero 2 fois par periode c'est a dire 100 fois par seconde.
- Production directe par alternateurs.
- Implique des effets inductifs et capacitifs penalisants pour un certain nombre de raisons (facteur de puissance < 1 principalement).
- Difficulte d'interconnexion de plusieurs reseaux (il faut garantir l'identite de la tension, de la frequence et de la phase).
- Implique un effet « de peau » (voir partie sur les *lignes et cables*), d'ou la necessite de cables et lignes adaptes et donc plus chers.

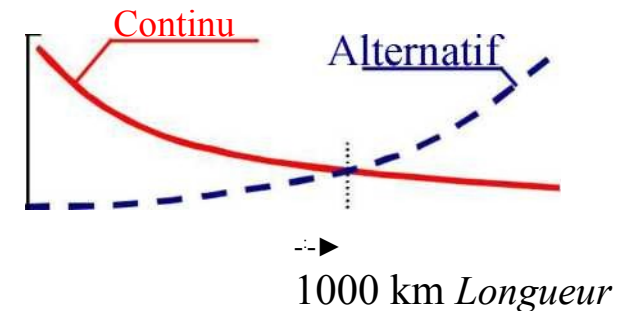
Regime continu

- Pas d'effet reactifs, le facteur de puissance est unitaire (en dehors de deformations).
- Pas d'effet de peau, les cables et les lignes sont plus simples et moins chers.
- Facilite l'interconnexion de des reseaux, il sont plus simples et moins chers.
- Difficulte de couper les courants continus, d'ou des dispositifs de coupure plus performants et plus chers.
- Terminaisons tres couteuses .
- Impossibilite de produire ou d'elever la tension dans le domaine des tres hautes tensions d'ou des pertes importantes sur les lignes.

Principes fondateurs des reseaux electriques

- Il semble qu'à chaque défaut du continu corresponde un avantage de l'alternatif.. .et vice versa.
- L'utilisation massive du transformateur pour elever et rabaisser les tensions se degage tout de meme comme un argument de grand poids.
- Sur le plan economique, le cout au kilometre evolue en fonction de la distance suivant la courbe ci contre : *Cout au km*

- L'alternatif reste plus economique sur des distances de l'ordre de 1000 km, et s'impose de toute fa9on au dela pour l'utilisation du transformateur.



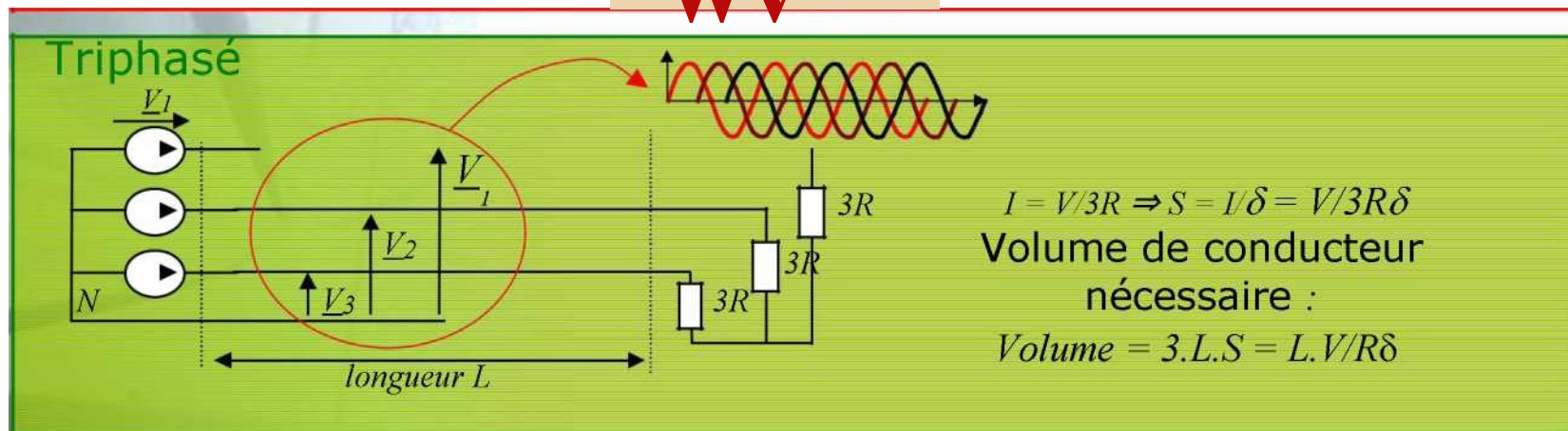
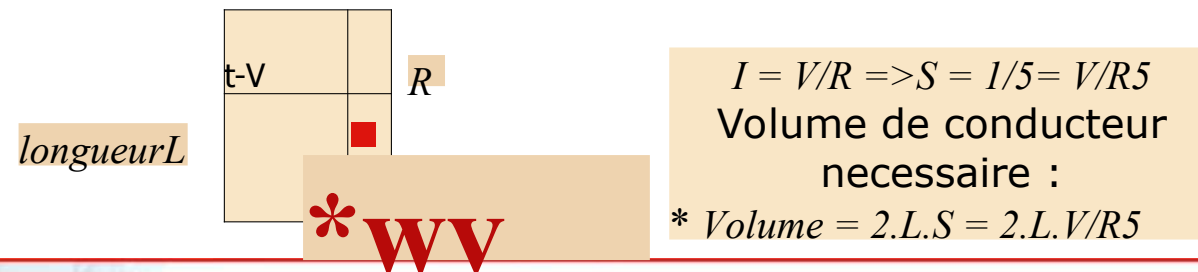
- Par ailleurs, la nature sinusoidale s'impose de par le fait que toute autre forme de tension alternative presente inevitablement un « contenu harmonique » qui n'a que des consequences nefastes sur les pertes et le facteur de puissance.

Principes fondateurs des reseaux electriques

- Utilisation de systemes triphases :

- Un systeme triphase correspond a l'utilisation, non pas d'une, mais de trois tensions sinusoi'dales. Ces tensions sont identiques mais dephasees entre elles de 120° . Comparons ces deux systeme :

Monophase



NB : δ est la « densite de courant » admissible par le conducteur electrique

Principes fondateurs des reseaux electriques

- A puissance constante, un systeme triphase « trois fils » requiert **deux fois moins de volume de conducteurs** electriques qu'un systeme monophasé^ « Facteur 2 » sur l'ensemble du poids, du cout, du gabarit de pylones, etc.

- La **puissance massique** des machines triphasees (notamment des alternateurs) est **superieure** a la puissance massique des equivalents monophases.

- Les alternateurs, pour des raisons d'optimisation ont interet a etre triphases et **Equilibrés**. L'equilibration d'un reseau et de charges triphasees est directement adapte a cet objectif.



- La « **puissance fluctuante** », dans un systeme triphase equilibre, **est nulle**. L'apport d'energie electrique est parfaitement continu. Cette particularite, dans le fonctionnement de tous les actionneurs electriques triphases, permet d'eviter les vibrations et le « balourd » qui sont causes des couples « vibratoires » lies a la puissance fluctuante.

Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels

Il existe un certain nombre de phenomenes caracteristiques du fonctionnement normal des reseaux:

- Puissance maximale :

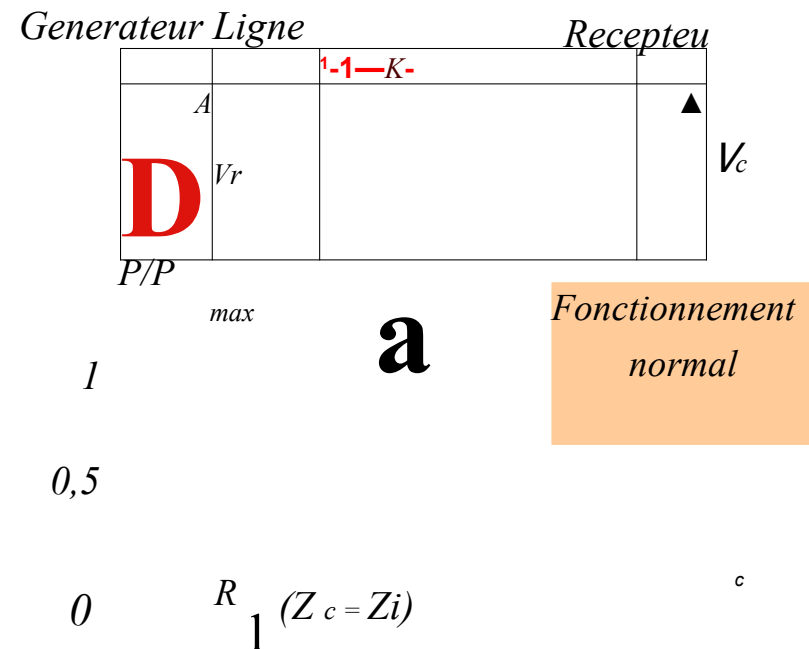
Chaque tronçon de reseau, comme chaque association « generateur / recepteur » presente une « puissance maximale transmissible ».

Cette puissance s'ecrit :

$$P_{\max} = \frac{V_r^2}{4 \cdot Z_i}$$

Elle depend enormement de l'impedance de la ligne (Z_i).

A cette valeur de puissance le rendement η peut etre faible (50%), c'est alors un cas limite.

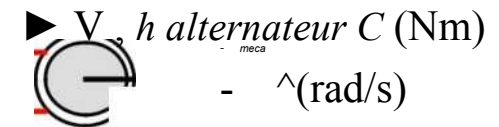
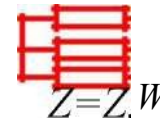


Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels -

Couplage Puissance / Frequence:

Les tensions du reseau sont produites par des « alternateurs ». Pour ces machines, la frequence des tensions produites est proportionnelle a la vitesse de rotation : $Q=2n.f/p$

Par ailleurs, une difference entre consommation et production ou une acceleration des machines.



$$V - V_y$$

$$P_{elec} = 3VI \cos \phi$$

Consommation

$$P_{meca} = 111 \text{ mca}$$

Production

La loi fondamentale de la dynamique apporte :

Lorsque la consommation evolue a la hausse : $P_{elec} > P_{meca}$

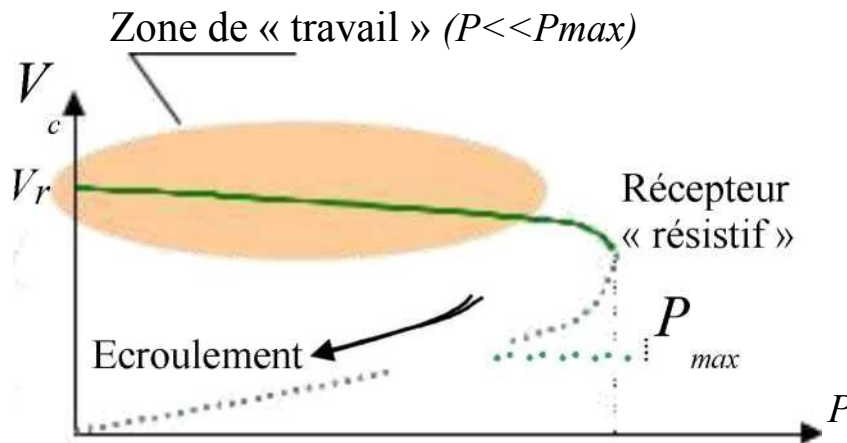
Lorsque la consommation evolue a la baisse : $P_{elec} < P_{meca}$

Les variations de la frequence representent donc LAmesure de l'equilibre « production / consommation ».

- *Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels -*

Couplage Tension / Puissance :

Les tensions en chaque point du reseau dependent fortement des transferts de puissance et de la nature des lignes et des charges.



Il est alors possible que :

- les valeurs de tension sortent des plages normalisees (endommagement du materiel, aspect contractuel, etc.)
- la tension « s'ecroule » si la puissance appelee depasse la puissance maximale transmissible (voir phenomenes exceptionnels).

Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels

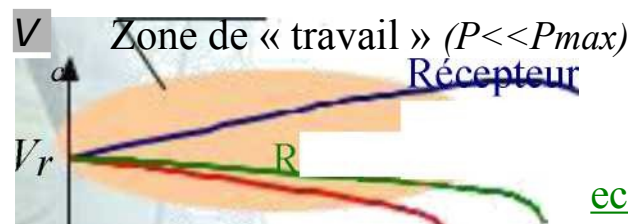
- Couplage Tension / Puissance reactive:

Il ne suffit pas de resistances pour modeliser le reseau.

- Les lignes aeriennes sont essentiellement « inductives »
- Les cables entrees sont essentiellement « capacitifs »



Les recepteurs etant egalement « reactifs » (inductifs u o capacitifs), il circule sur les reseaux une puissance dite « reactive » (appelee Q) qui perturbe les tensions.



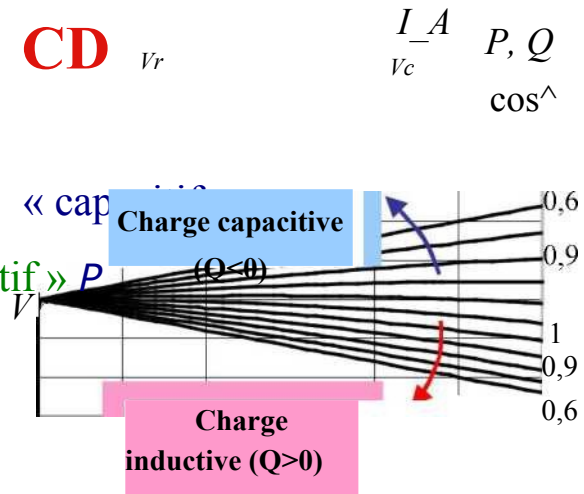
Recepteur « inductif »

Ecrroulement

..... $P_{\sim max}$

P_{max}

$>P$



- *Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels*

Dans le cas des lignes aeriennes, la puissance reactive (Q) tend a faire :

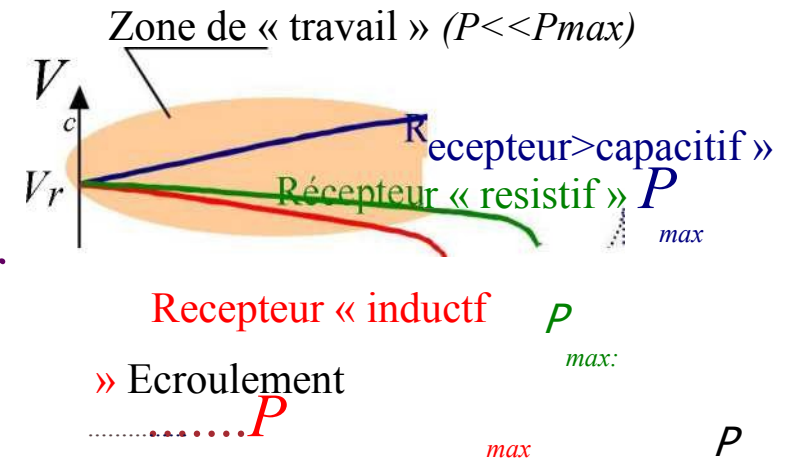
- chuter les tensions et diminuer

P_{max}

quand elle est positive (inductive)

- augmenter les tensions et P

Il est alors possible, en realisant des injections de puissance reactive; de jouer sur les valeurs des tensions et de contrer les tendances naturelles dues aux lignes et aux charges.



Cette façon d'agir s'appelle la « compensation », c'es t un moyen d'action important sur les reseaux, il revient a l'amelioration du facteur de puissance...

Plus un tronçon est long plus les effets reactifs sont importants, en consequence on retient que « le reactif se transportemal ».

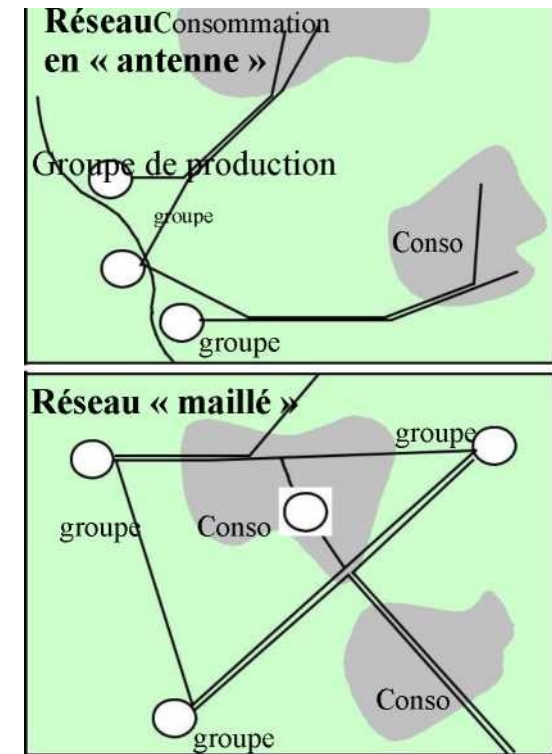
- *Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels*

- Influence de la structure du maillage :

Les realites geographiques ont aussi une influence nettsur le fonctionnement des reseaux.

Les reseaux dits « en antenne » presentent des impedances series qui s'ajoutent et font empirer reactif.

Les reseaux dits « mailles » presentent des impedances parallele qui rendent discretes la sensibilite au reactif et les chutes de tension.



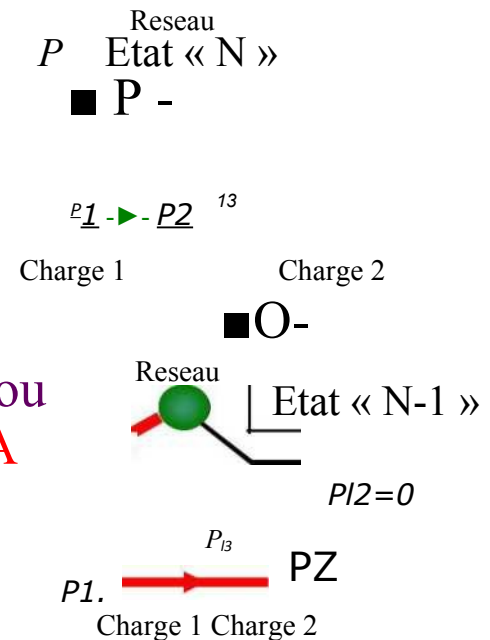
Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels

- Transits et reports de transits :

Les realites geographiques ont aussi une influence nettsur le fonctionnement des reseaux.

Dans un etat normal (etat « N »), les puissances s'ecoulent a travers les differentes « branches » des mailles d'un reseau.

Si une ligne est coupee (etat « N-1 ») (par avarie ou manipulation quelconque) il y a « report » des transits de puissance sur les lignes restantes.



Il est alors possible, a cause d'un report de transit, qu' une ligne soit surchargee ($P > P_{max}$) et qu'elle declenche a son tour

- *Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels* -Phenomenes

exceptionnels:

Il existe quatre phenomenes expliquant les grandes pannes sur les reseaux electriques :

- La cascade de surcharges se produit lorsqu'une ligne declenche et surcharge ses voisines par son report de ransit.
- L'ecroulement de la frequence traduit une surcharge generalisee et non prevue, il preconise une cascade coupures ou des delestages choisis ...
- L'ecroulement de la tension traduit un depassement des puissances maximales des lignes, il preconise aussi une cascade de coupures ou des delestages ...
- La rupture de synchronisme (d'interconnexion) entre les reseaux ou les groupes de production, souvent consequence des coupures des grands axes HTB.

- *nom e, p,, —s excels*

Exemples :

- Incident « Suisse / Italie » 28/09/2003, 3h du matin Origine : déclenchement de lignes 380kV très chargées à cause d'un contact avec la végétation.

Facteur aggravant : report de transit sur une deuxième ligne qui passe en surcharge et touche elle aussi la végétation (la chaleur de la surcharge fait « fléchir » la ligne).

Conséquence : l'Italie se déconnecte du reste de l'Europe. Sa fréquence chute à 49 Hz et sa tension s'effondre, les groupes de production déclenchent les uns après les autres.

C'est le « Black out » en 2 min 30, très bien visible du ciel cette nuit là :

Remise en marche : une vingtaine d'heures plus tard avec une coupure totalisée de 28 TW.



- *Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels* Exemples :

- Incident « Europe » 04/11/2006, 22h

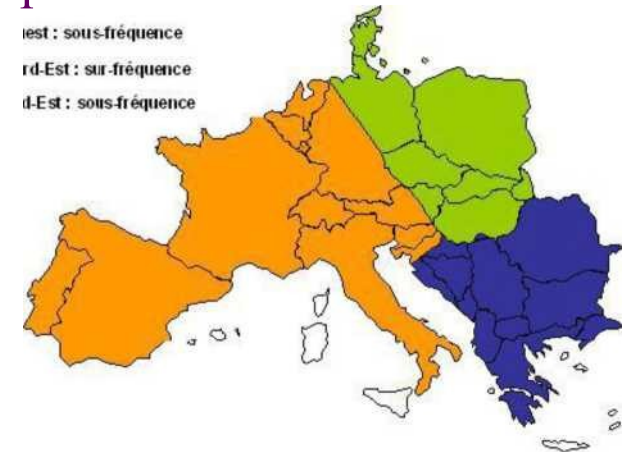
Origine : en Allemagne, ouverture de lignes 400kV en avance sur le planning pour laisser passer un gros navire.

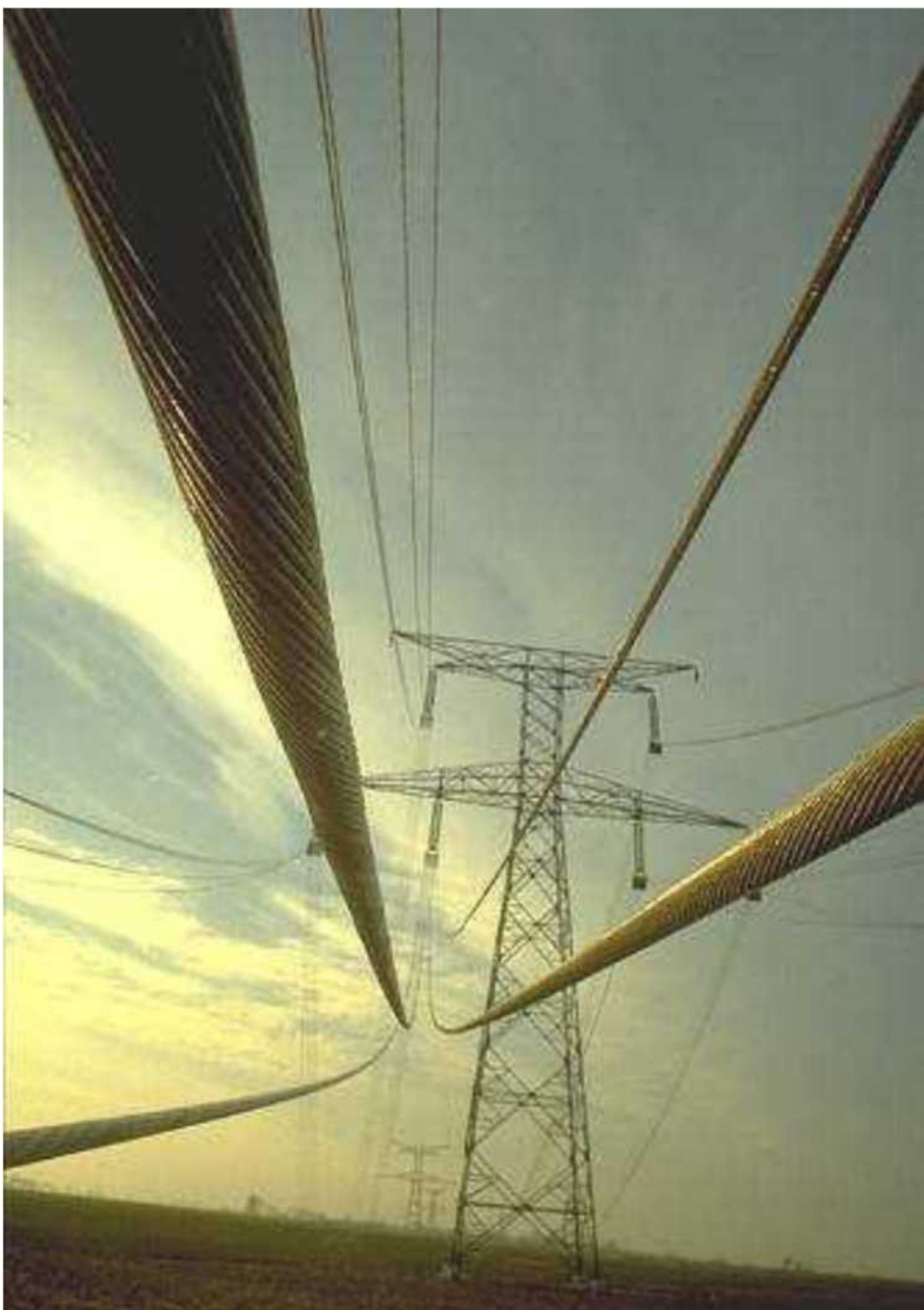
Facteur aggravant : reseau tres charge a cette heure la et mauvaises manipulations conduisant aux premiers declenchements pour surcharge.

Consequence: en 30 secondes, apres un declenchement par effet « domino » des interconnexions HTB, l'Europe se retrouve decoupee en trois zones deconnectees. ~

L'Ouest, en surcharge (49Hz), s'en sort par des delestages automatiques et une mobilisation de la part hydro-electrique. Remise en marche : en moins d'une heure en France, en quelques heures pour l'ensemble de l'Europe.

La reactivite des gestionnaires a permis d'eviter le Black out.





Les reseau electrique

S

- *Introduction*
- *Histoire de l'electrification*
- *Grandeurs importantes*
- *Structure des grands*
- *Principes fondateurs du fonctionnement*
- *Fonctionnement normal et phenomenes exceptionnels*
- *« Strategie » de pilotage des reseaux Europeens*

Departement

FFA

UNIVERSITE BORDEAUX 1

Luc LASNE: [lcisne\(a\)creea.u-bordeaux.fr](mailto:lcisne(a)creea.u-bordeaux.fr) 26/02/2008

• *Strategie de pilotage des reseaux Europeens*

Principe du pilotage :

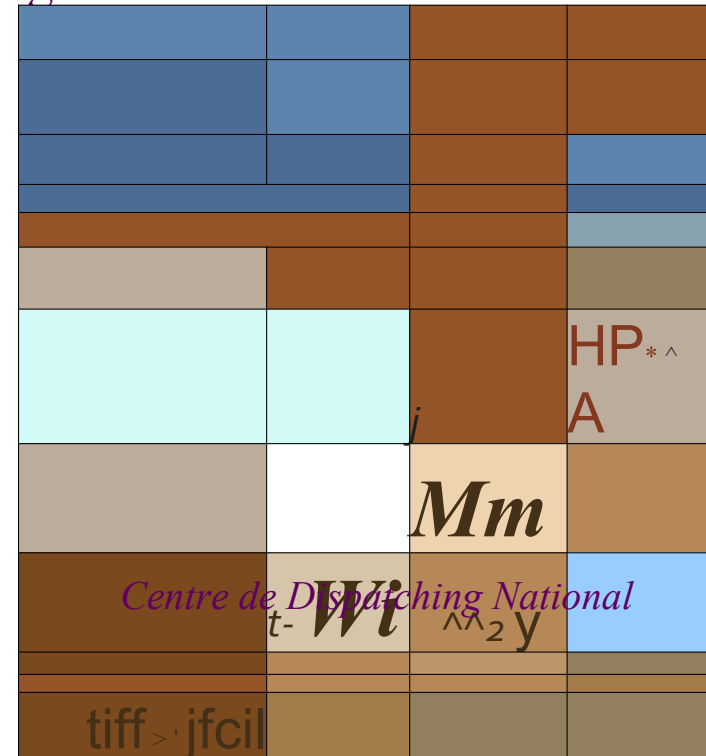
C'est un ensemble d'actions conjointes qui permet d'assurer a la fois l'équilibre « production / consommation » et la surete du systeme malgre les fluctuations de l'ensemble des grandeurs influentes.

On releve principalement :

- la prevision journaliere de la consommation
- la maitrise des transits et la regle du « N-K »
- le reglage de la frequence
- le reglage des tensions

Ces actions sont realisees par un plusieurs services associes.

Les manipulations les plus sensibles (en temps reel) ont lieu dans les centres « de dispatching ».

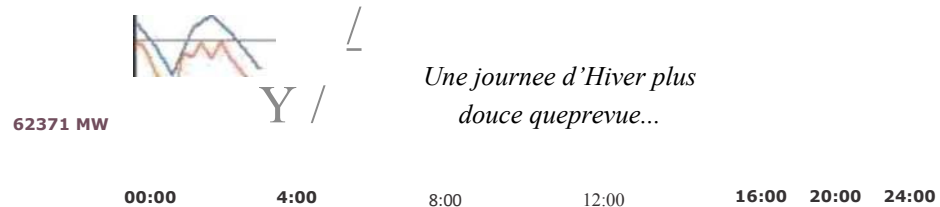
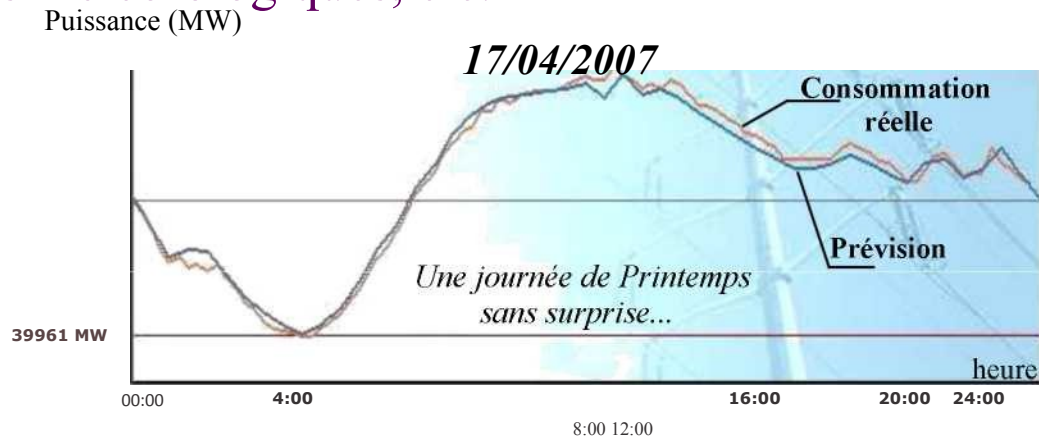


Strategic de pilotage des reseaux Europeens

La prévision journaliere:

De maniere a approcher au plus pres les variations de puissance consomrees par un pays, un service particulier procede a des previsions tres fines etablies a partir de statistiques, de donnees meteorologiques, etc.

Les ecart entre la prevision et la consommation traduisent une importante activite de regulation des dispatchers...
Avec ces previsions On peut travailler a «J-1», ou « J-7 »...



- *Strategie de pilotage des reseaux Europeens*

La maitrise des transits et la regie du « N-K » :

Les transits dependent principalement :

- de l'ensemble de la consommation et de l'architecture du reseau a chaque instant
- des impedances des lignes et des moyens de compensation a chaque instant
- des echanges internationaux (interconnexion commerciale) a chaque instant

Ces contraintes sont connues ou predictibles.

En revanche, des defauts imprevisibles surgissent tres frequemment (environ 10.000 courts circuits par an en France sur le reseau de transport). Pour eviter l'effet domino du aux reports de transits, il est necessaire que le reseau soit localement robuste a au moins un ou deux declenchement de ligne. Les dispatcheurs simulent, pour « N » lignes en fonction, la perte de « K » grandes lignes et determinent si cet etat « N-K » est dangereux ou pas. Si oui, ils interviennent en prevision du pire.



- *Strategic de pilotage des reseaux Europeens* Le reglage de la

frequence:

La frequence est l'indicateur de l'equilibre entre el « plan de consommation » (etabli a partir des previsions) et la consommation reelle. Le reglage de la frequence se itfa sur plusieurs niveaux :

- Reglage primaire : il est effectue dans les unites de production par les regulateurs automatiques.
- Reglage secondaire : il est effectue de maniere a menager les echanges internationaux malgre les ajustements du reglage primaire.
- Reglage tertiaire : il permet de menager des reserves de puissance pour que les reglages primaires et secondaires n'arrivent pas en butee. Il est correle aux prevision journalieres.

• *Strategie de pilotage des reseaux Europeens*

Le reglage des tensions:

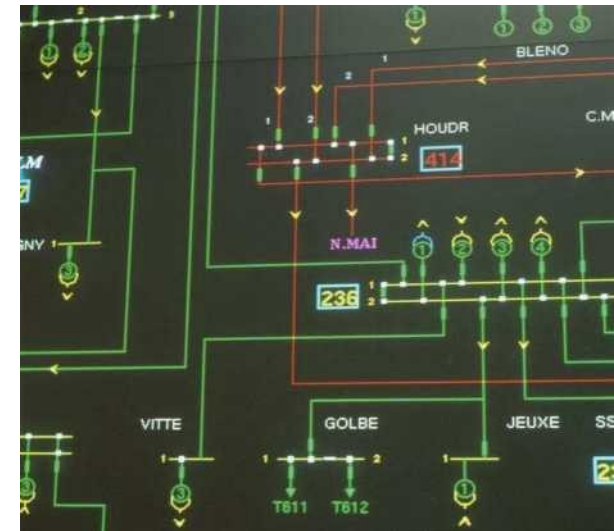
Le respect des plages de tensions normalisees est non seulement necessaire pour le materiel mais egalement contractuel.

Les moyens d'action sur les tensions sont tres diversifies et demandent une tres bonne connaissance des reseaux locaux.

Les tensions sont donc gereses par les « dispatcheurs regionaux », leur marge de manœuvre est environ de $\pm 5\%$.

Les moyens principaux (non detaillees ici) sont lies a la gestion de la puissance reactive qui est couplee a la tension de fa9on tres forte.

Mais il resterait beaucoup a dire...



Centre de Dispatching Regional

- *Pour en savoirplus ...*



Ce diaporama a été réalisé à partir du livre « Electrotechnique » (*Luc Lasne*, éditions Dunod).

Un complément en ligne à ce livre est dédié à la présentation des réseaux électriques et à leurs modélisations.

Telechargez gratuitement ce complément
sur : - www.dunod.com

Visitez également les sites web des acteurs principaux de l'électricité de France :

- www.rte-france.com
- www.edf.fr

Luc LASNE: lasne@creea.u-bordeaux.fr, département EEA, Université de Bordeaux I - Février 2008