

Les éoliennes

Du vent, des sciences et des technologies



Les éoliennes : but de cette conférence

- Origine de l'énergie éolienne
- La chaîne de conversion de l'énergie pour aboutir à l'énergie électrique
- Éléments d'optimisation des éoliennes

- Et l'EEA ?
 - la génératrice électrique, l'électronique de puissance
 - Système multi-disciplinaire



Les éoliennes

- Un constat pour commencer
- Energie éolienne : une chaîne de conversion de l'énergie
- Fonctionnement de l'éolienne
- Conclusion

Un constat pour commencer

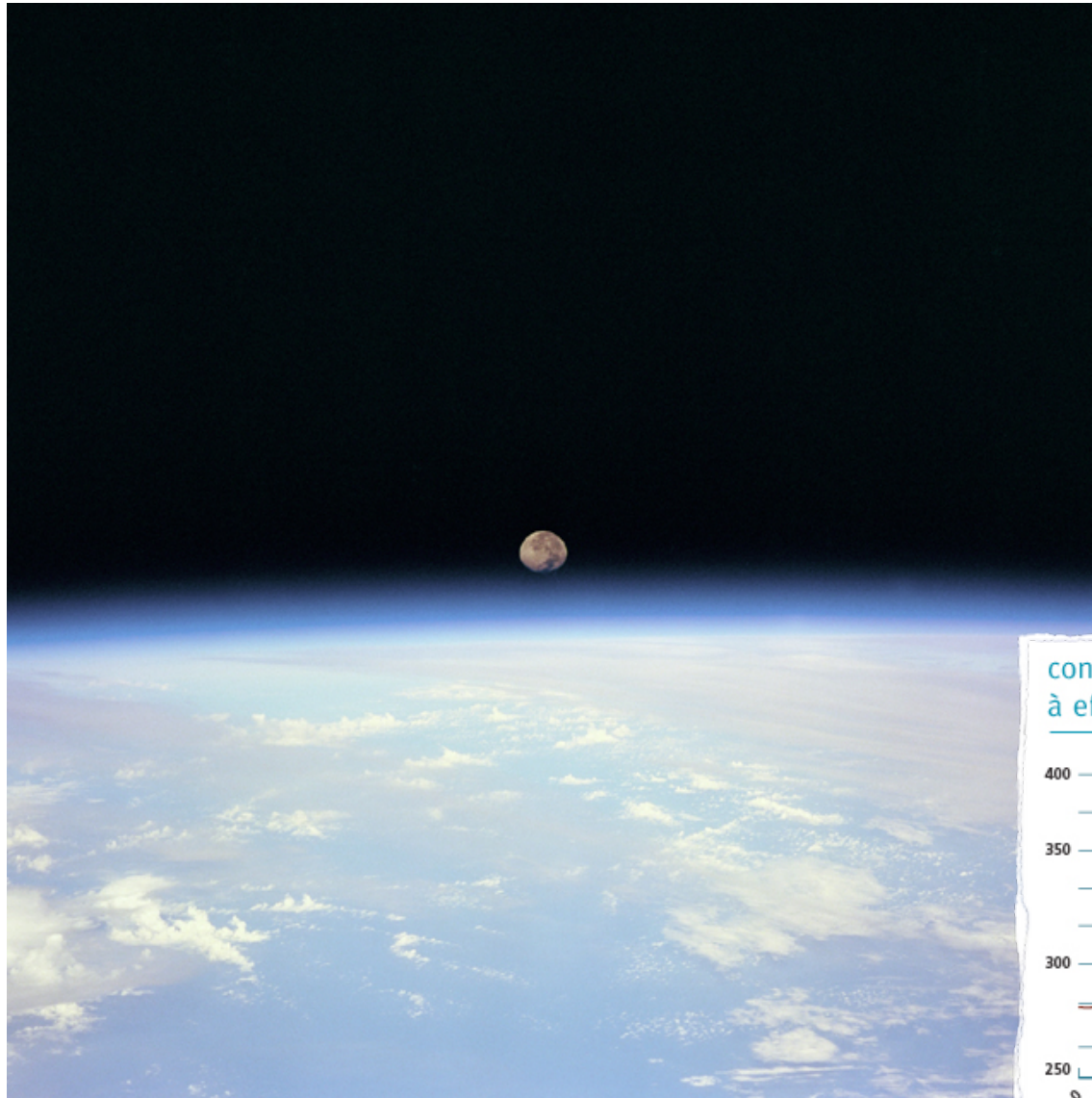
- Etat des ressources
- Production d'énergie électrique

Un état des ressources

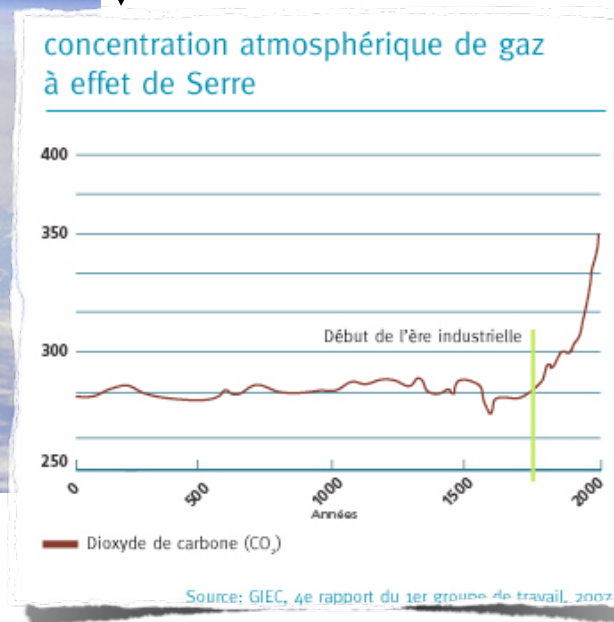
12700 km



Photo :NASA

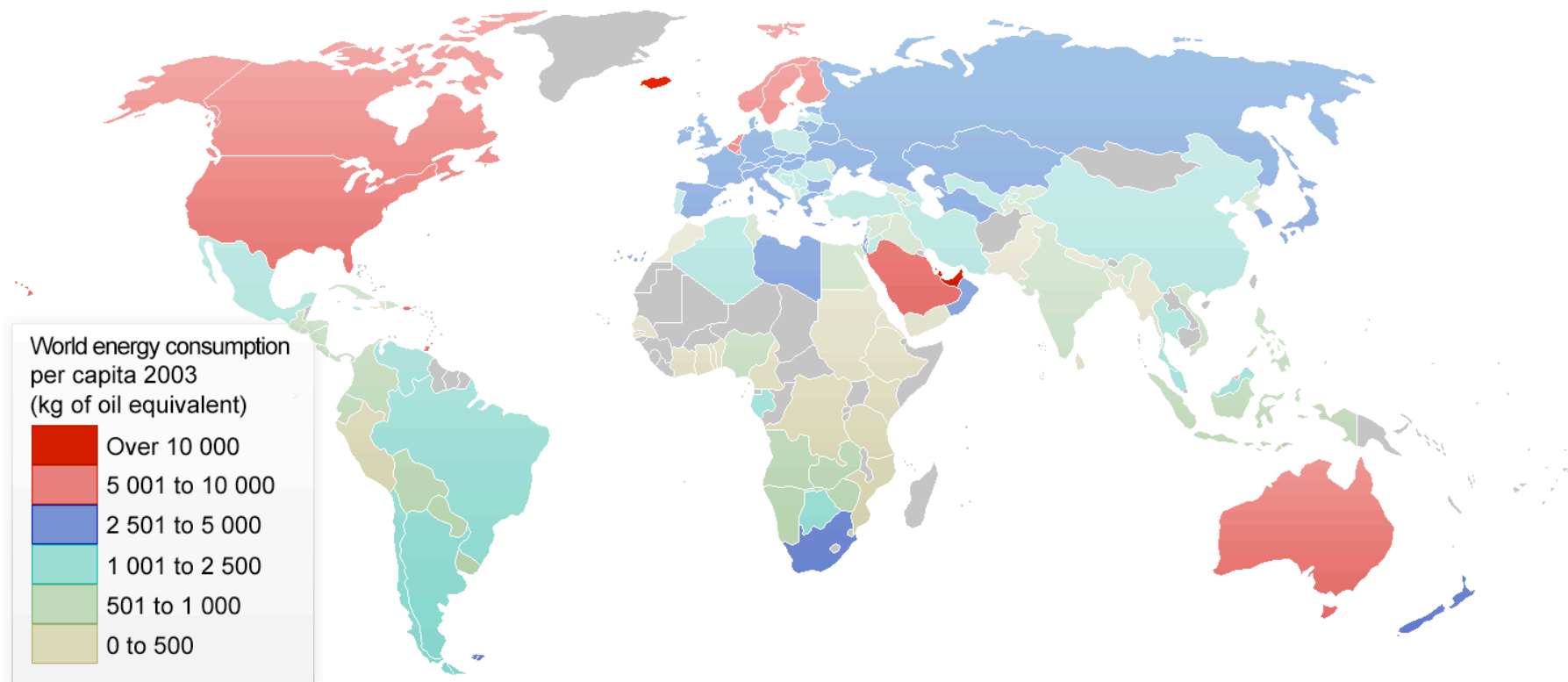


11 km



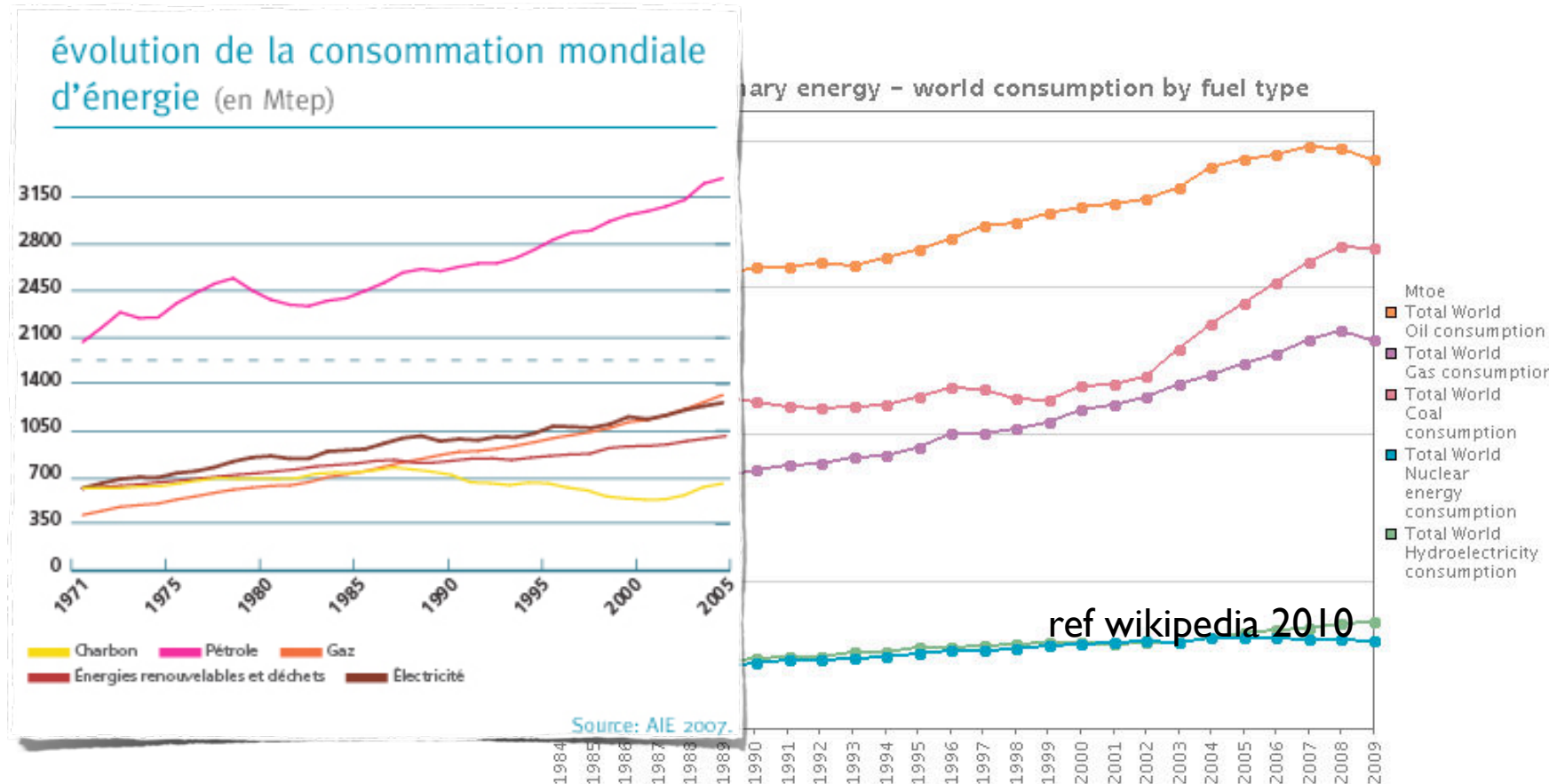
=> Un constat alarmant

Une consommation inégale !



ref wikipedia 2010

Des besoins en augmentation mais...



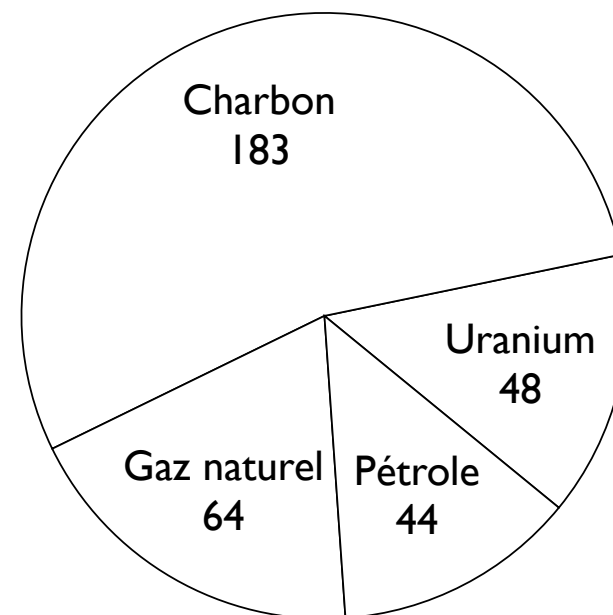
... des réserves limitées...

	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (en Gtep)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en Gtep)
Pétrole(1)	1 258 GBI	172	18%	3,9
Gaz naturel	185 Tm ³	185	19%	2,9
Charbon	826 Gt	578	60%	3,2
Uranium(3)	3,3 Mt	30	3%	0,62
Hydraulique(5)	12 Pwh	2,7		0,72
Eolien (6)(6a)	39 Pwh	8,8		0,03
Solaire (7)(7a)	1 070 000 Pwh	92 000		0,000 7
Biomasse⁶	3 10 ²¹ J	70		
Pétrole (2)	3 000 GBI	410	33%	3,9
Uranium (4)	7,2 Mt	65	5%	0,62
Total conventionnel		965		11,3
Total non conventionnel		1 228		11,3

Source : [BP Statistical Review of World Energy 2009 \(chiffres 2008\)](#), sauf réserves d'uranium et réserves (o renouvelable).

Pour les **énergies renouvelables**, les réserves correspondent au potentiel **annuel** de production.

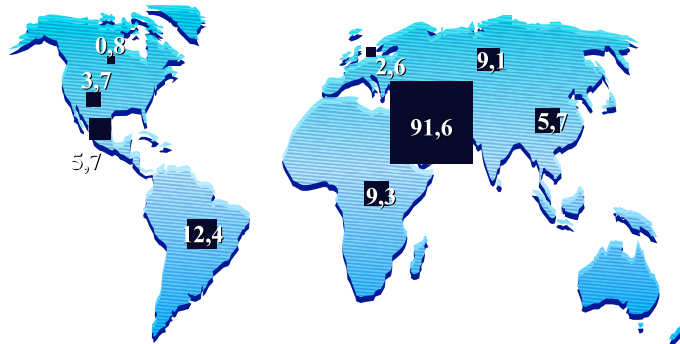
Années de production



... inégalement réparties

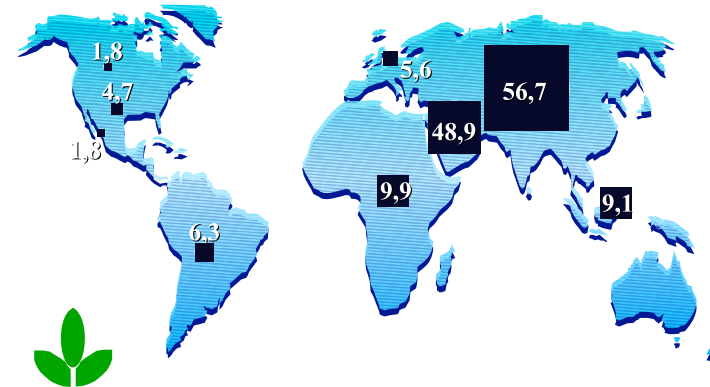


Réserves mondiales d'énergie
• pétrole



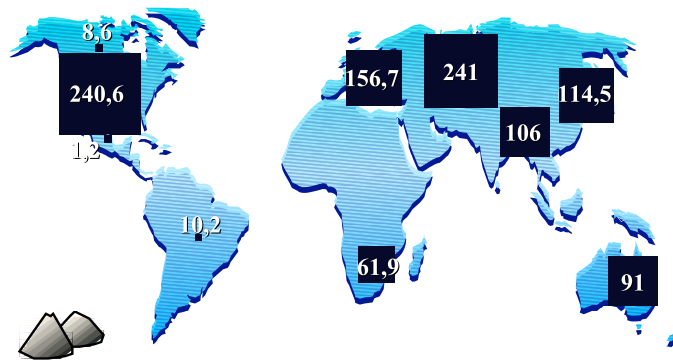
réserves:
43 ans à utilisation constante (milliards de tonnes)

Réserves mondiales d'énergie
• gaz naturel



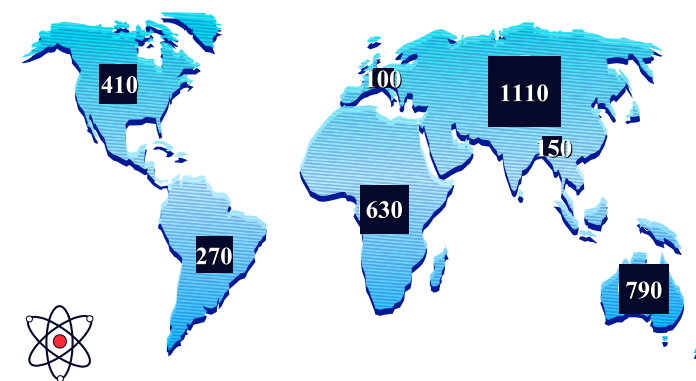
réserves: 66 ans à utilisation constante (milliards de m³)

Réserves mondiales d'énergie
• charbon



réserves:
228 ans à utilisation constante (milliards de tonnes)

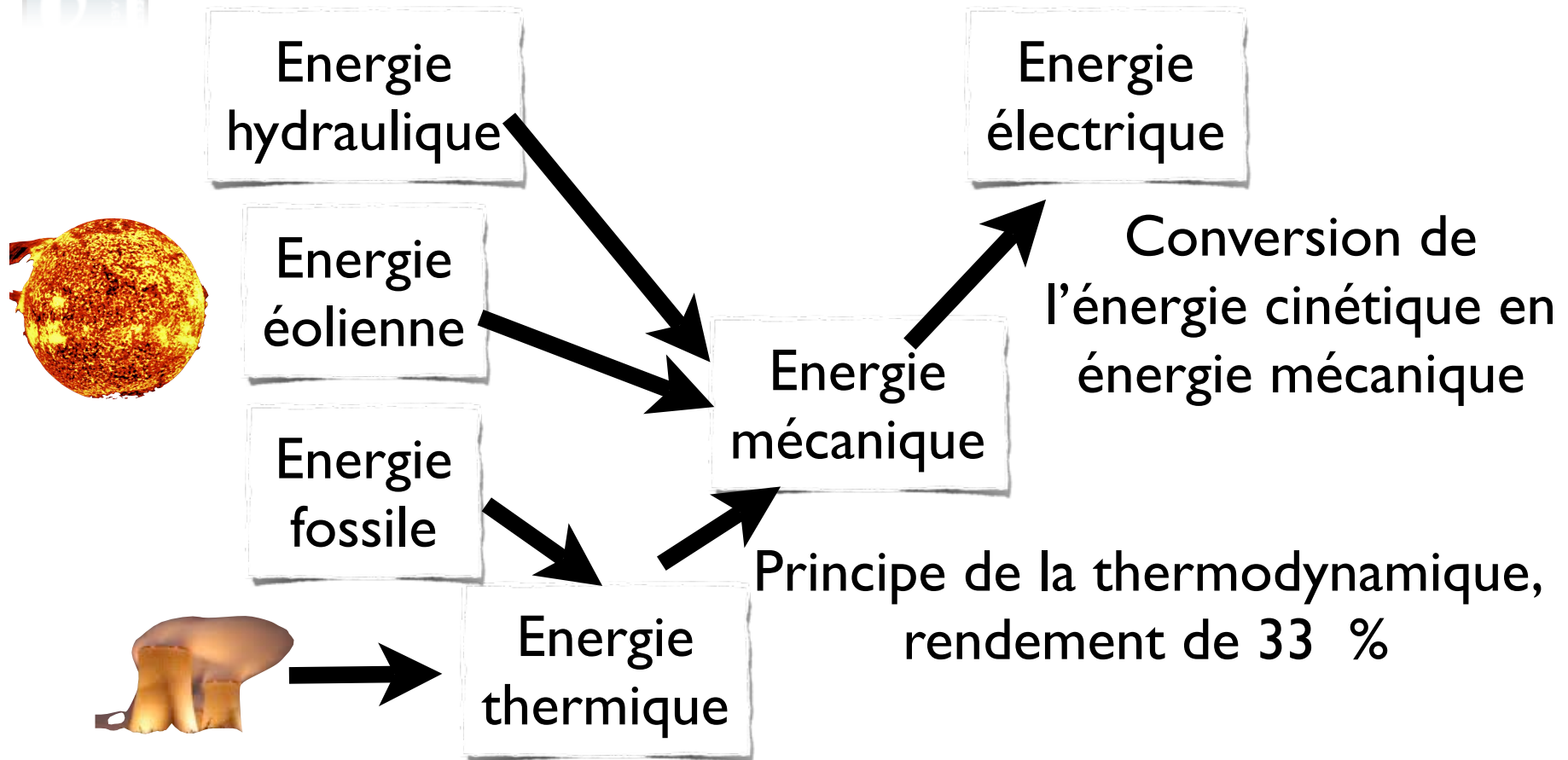
Réserves mondiales d'énergie
• uranium



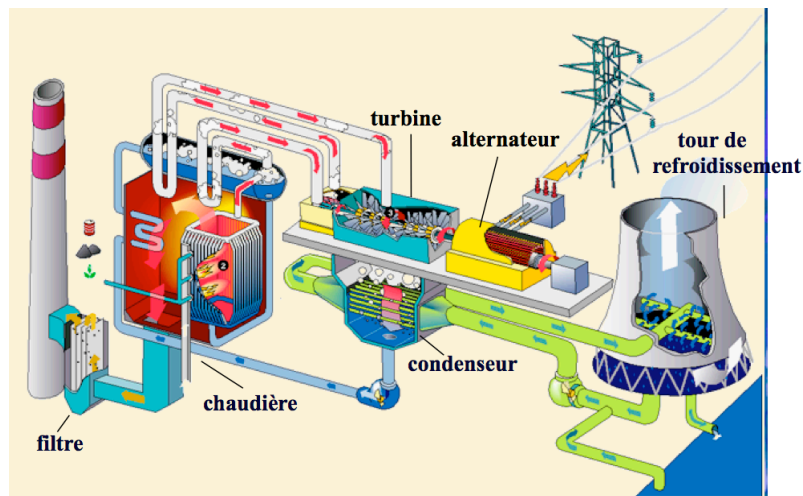
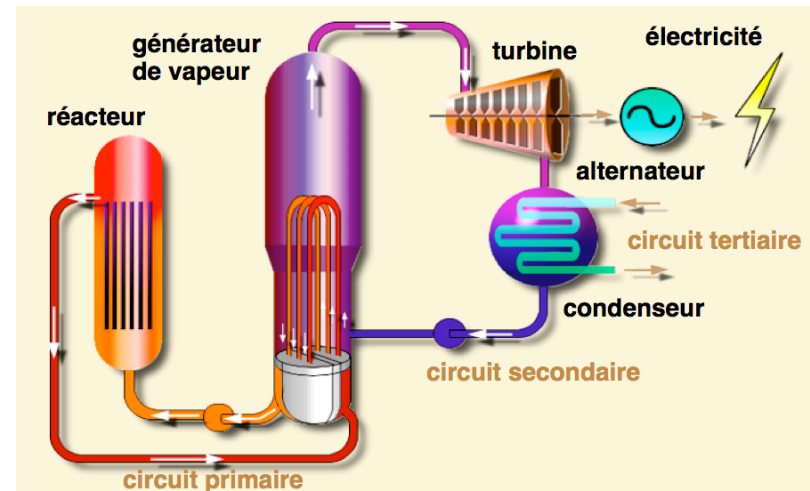
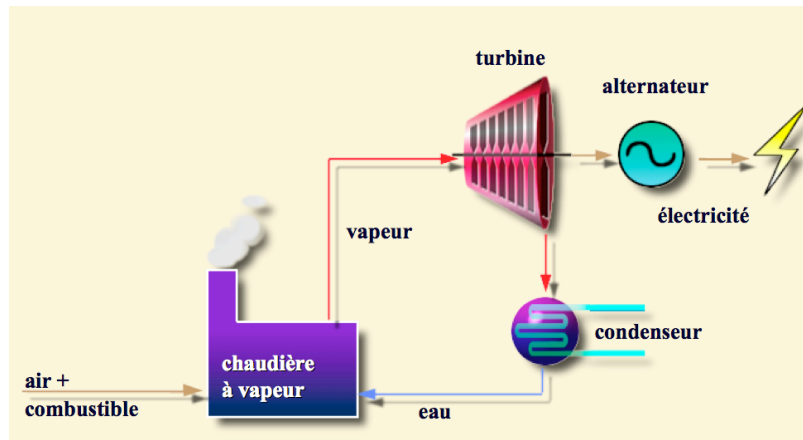
réserves: 60 ans à utilisation constante (milliers de tonnes)

Production d'énergie électrique

Chaine de production électrique

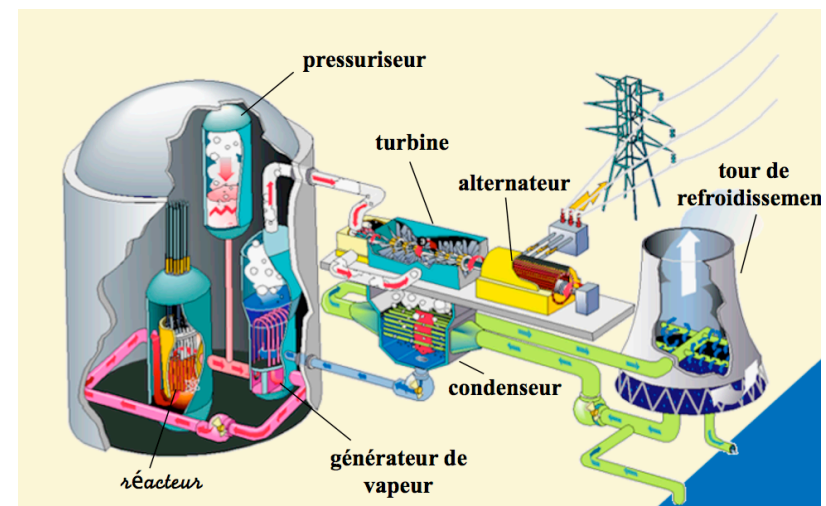


Types de centrale utilisant l'énergie thermique



Centrale thermique

JM Routoure : les éoliennes. Université de Caen Basse-Normandie. 2010



Ref : electrabel

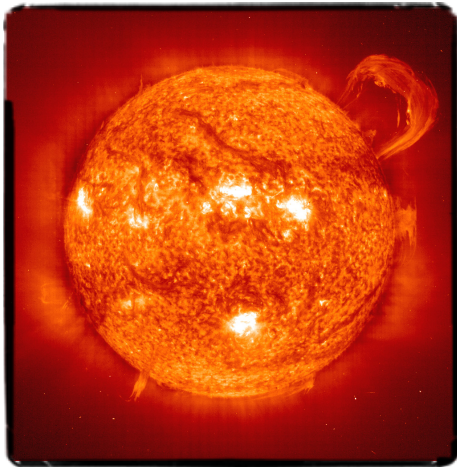
Energie éolienne : une chaîne de conversion de l'énergie

Principe d'une éolienne



- Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique
- Mais d'où vient le vent ?

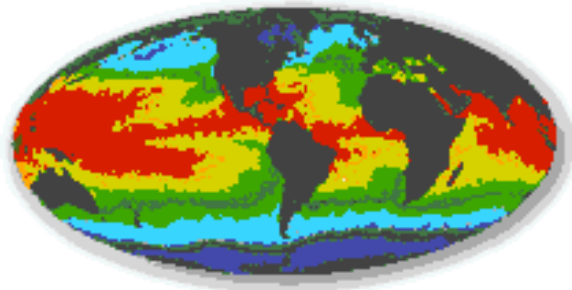
Energie primaire = énergie solaire



- Puissance émise par le soleil
 $P = 1,37 \text{ kW/m}^2$
- Rayon de la terre $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$

Rayon de la terre R	Surface de la terre $S = \pi \cdot R^2$	Puissance solaire captée : $P \cdot S$
$6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$		

Conversion énergie solaire → vent



© 1998 www.WINDPOWER.org

- Différence de température entre l'équateur et les pôles.
- La terre = machine thermique avec un fluide (l'atmosphère) se déplaçant des sources chaudes vers les sources froides
- Le flux de fluide = le vent (énergie cinétique)
- 1% de l'énergie solaire est ainsi convertie en énergie éolienne. Potentiel éolien = 1/1000 de l'énergie éolienne

Conversion énergie solaire → vent

Energie solaire	Energie éolienne = $1/100 \cdot$ Energie solaire	Potentiel éolien = $1/1000 \cdot$ Energie éolienne
$1,74 \cdot 10^{17} \text{ W}$		

$$1,74 \cdot 10^{12} \text{ W} = 1,74 \text{ million de mégawatt}$$

Pour comparaison : consommation électrique moyenne en
France en 2004 : 54 mégawatt

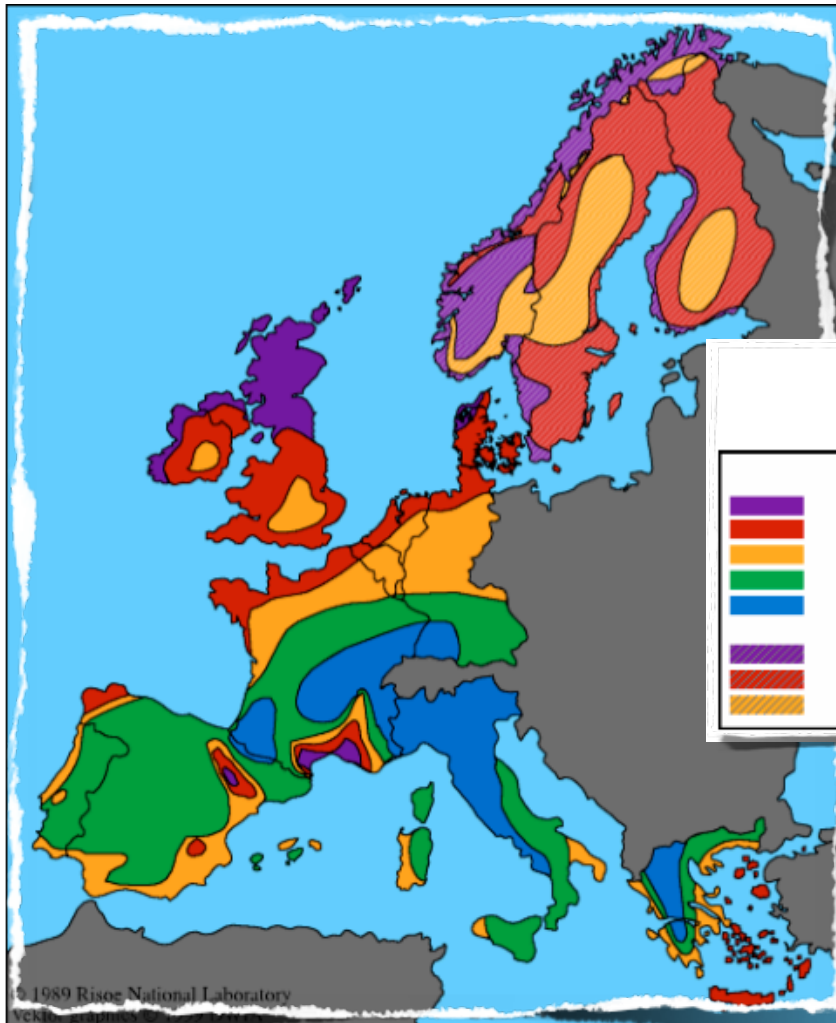
Energie éolienne











- Placement du système de conversion en hauteur pour s'affranchir de la rugosité de l'écoulement à proximité du sol
- Effet venturi en haut de colline
- Ensemble off-shore pour limiter l'impact visuel



Carte des vents d'Europe



	Avec obstacles		Terrain dégagé		Bord de mer		Mer ouverte		Collines et crêtes	
	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							

Energie éolienne

- Energie cinétique de la masse d'air m se déplaçant à une vitesse v $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
- Par unité de temps, la masse dm/dt s'écrit avec ρ (le calcul à revoir ! moyen pour l'explication) l'air S la surface couverte par l'éolienne) $dm/dt = \rho \cdot v \cdot S$
- La puissance = énergie par unité de temps $P_{\text{éolien}} =$



Energie éolienne

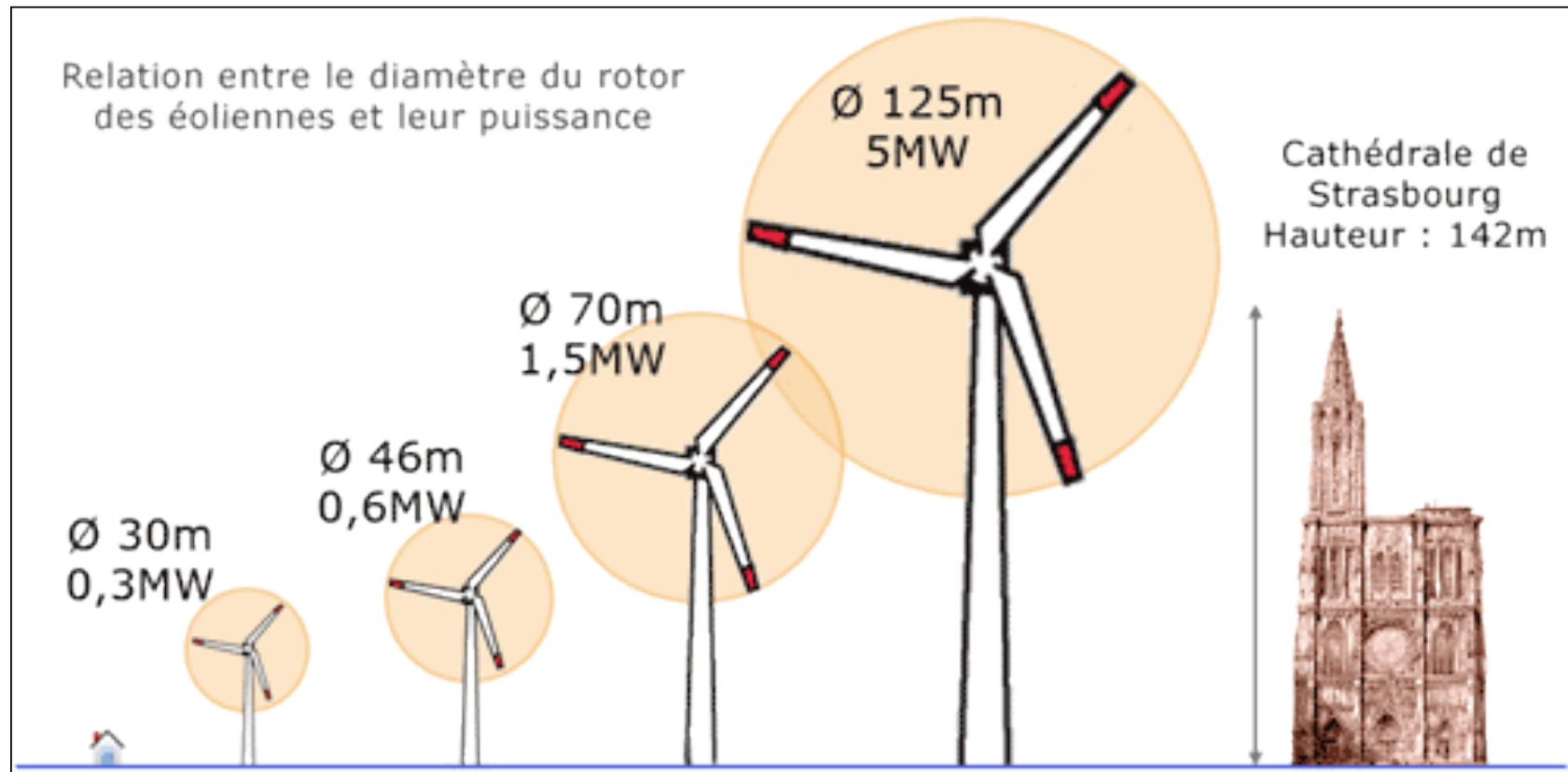
- Quelques données numériques :
 - air sec à 15°C $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$
 - $v=10 \text{ m/s}$
 - rayon des pales = 20 m



$$S=$$

$$P=1/2 \cdot S \cdot \rho \cdot v^3$$

Energie éolienne



Réf. image : <http://domsweb.org/ecolo/eole/>

Des machines de plus en plus imposantes !!!!



Energie mécanique

- Seule une fraction de la puissance cinétique peut être récupérée en puissance mécanique par l'hélice
- Le vent est freiné lors de la conversion énergie éolienne → énergie mécanique
- Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1919, formula la loi de Betz pour la première fois. Son livre "Wind-Energie" (Energie éolienne) publié en 1926 donne une bonne idée de l'état des connaissances en énergie éolienne et des aérogénérateurs de l'époque.

Loi de Betz

- Travaux issus de la mécanique des fluides
- Description simplifiée à l'adresse
<http://www.windpower.org/fr/stat/betzpro.htm>
- Résultat : rendement maximum d'une éolienne

$$P_{\text{mécanique}}/P_{\text{éolien}} = 16/27 \text{ soit } 59\%$$

NB : Il faut également tenir compte du coefficient de puissance de l'hélice (cf. plus loin) !!

Energie mécanique

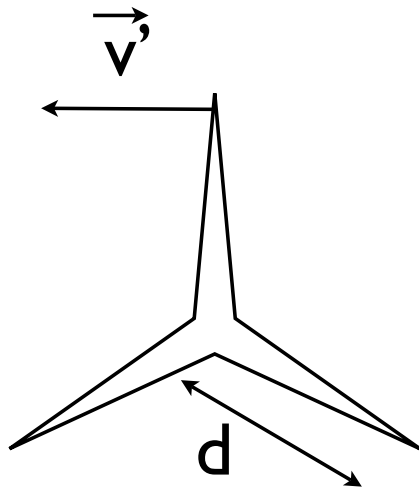


- La puissance mécanique fait tourner les pales de l'hélice

$$P_{\text{mécanique}} = C \cdot \Omega$$

- C couple (somme des moments des force/axe du rotor)
- Ω vitesse de rotation angulaire (rd/s)

Vitesse linéaire de l'extrémité des pales



$$\Omega/(2\pi)=0,5 \text{ tr/s}$$

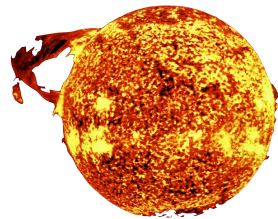
$$v'=\Omega \cdot d$$

$$v'=15,7 \text{ m/s}=56 \text{ km/h}$$

$$P_{\text{mécanique}}=C \cdot \Omega$$

=> Vitesse de rotation **faible** mais couple élevé

Rendement de la chaîne



Energie
Solaire



Energie
Eolienne



Energie
Mécanique



Energie
Electrique

0,1 %

max 59 %

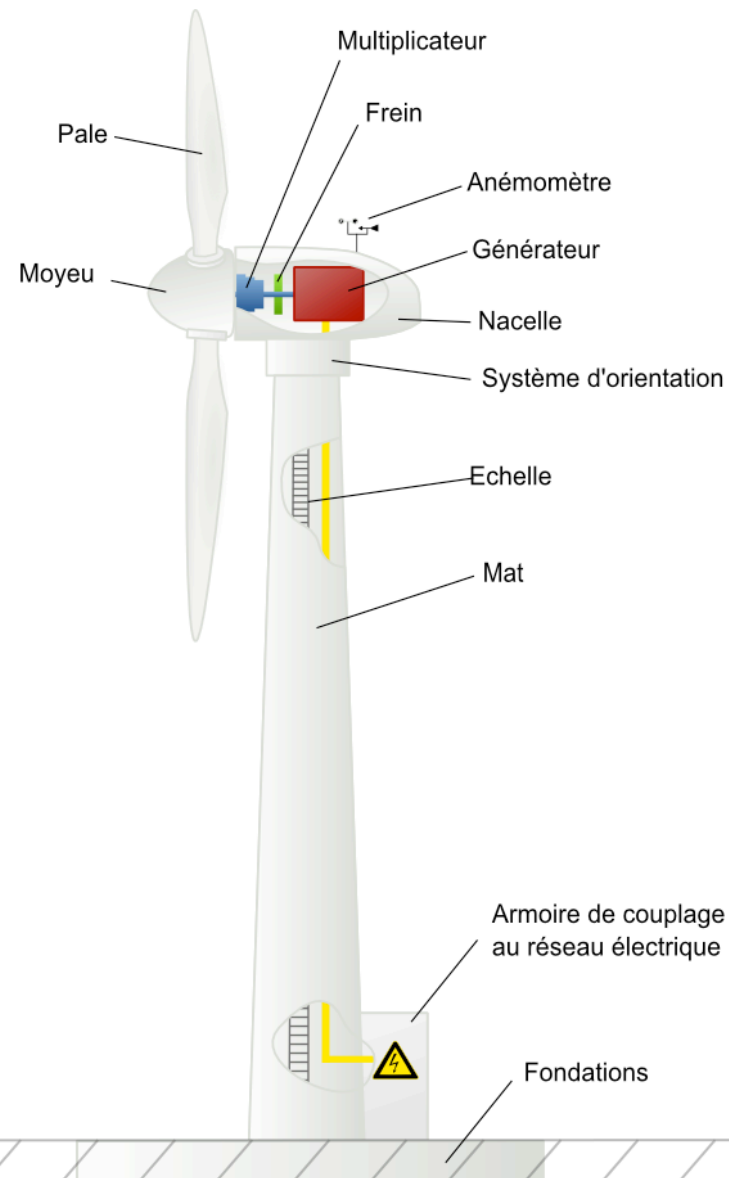
> 80 %

Rendement >

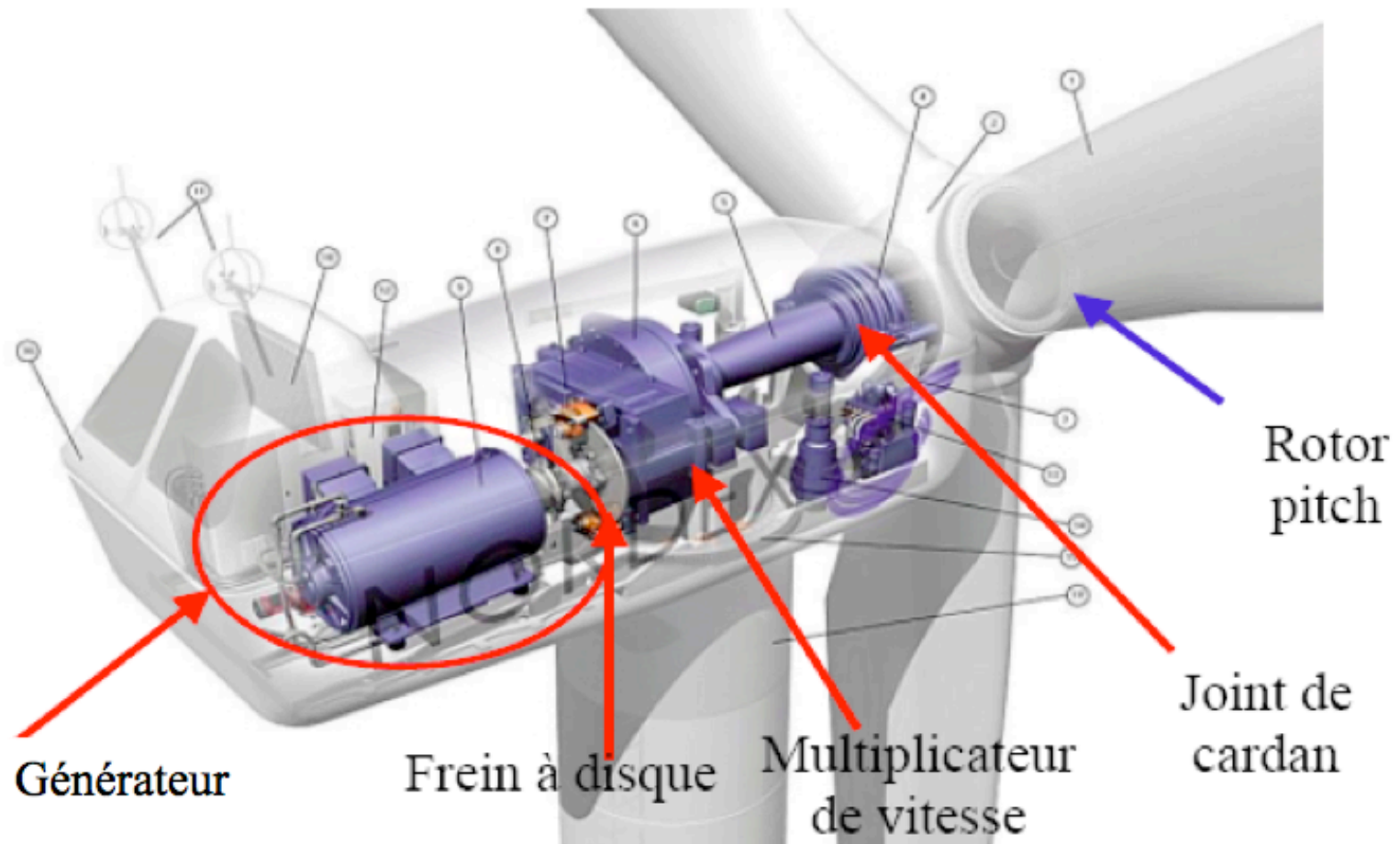
Fonctionnement d'une éolienne

Principes généraux, principaux éléments

Eléments d'une éolienne



Détail de la nacelle



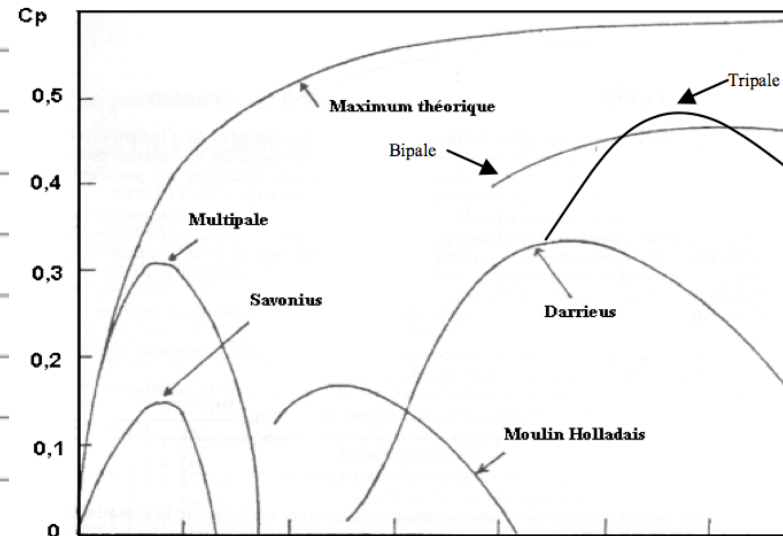
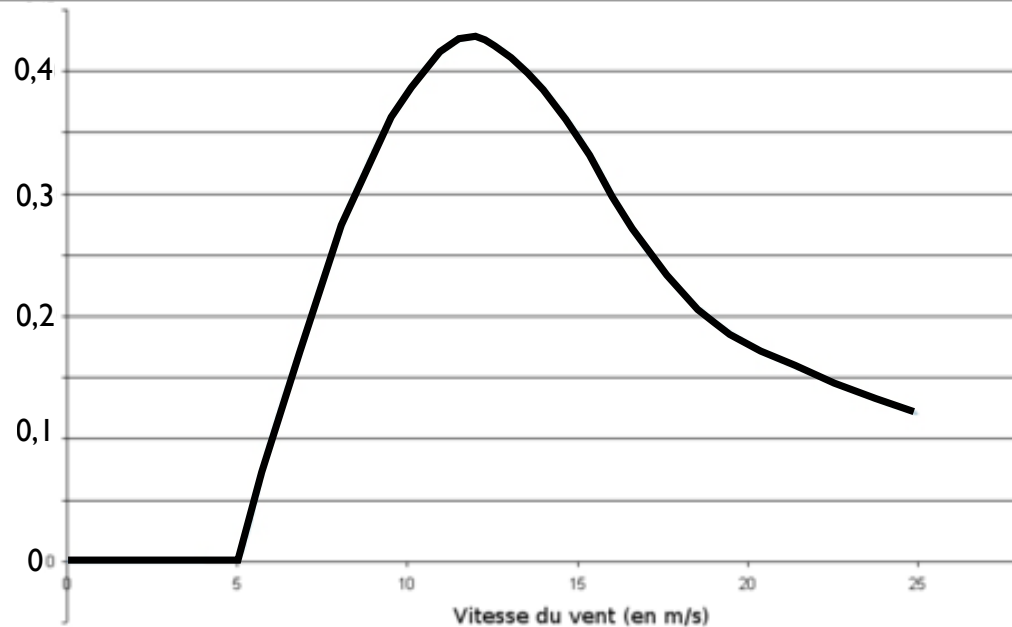
Référence image : G. Barackat, université du Havre

Prise en compte du rendement de l'hélice

- En fonction du type d'hélice utilisé, la conversion “énergie cinétique du vent -> énergie mécanique” à un rendement compris entre 0 et la limite théorique évaluée par la loi de Betz.
- Pour quantifier ce rendement, on définit un rendement de puissance C_p qui dépend de la vitesse du vent v !
- La formule précédente devient :

$$P_{\text{mécanique}}/P_{\text{éolien}} = C_p(v)$$

Coefficient de puissance pour différent type d'hélice :



cf thèse Mirecki. Univ Toulouse 2005

cf. <http://eolienne.f4jr.org/>

cf. <http://domsweb.org/ecolo/>

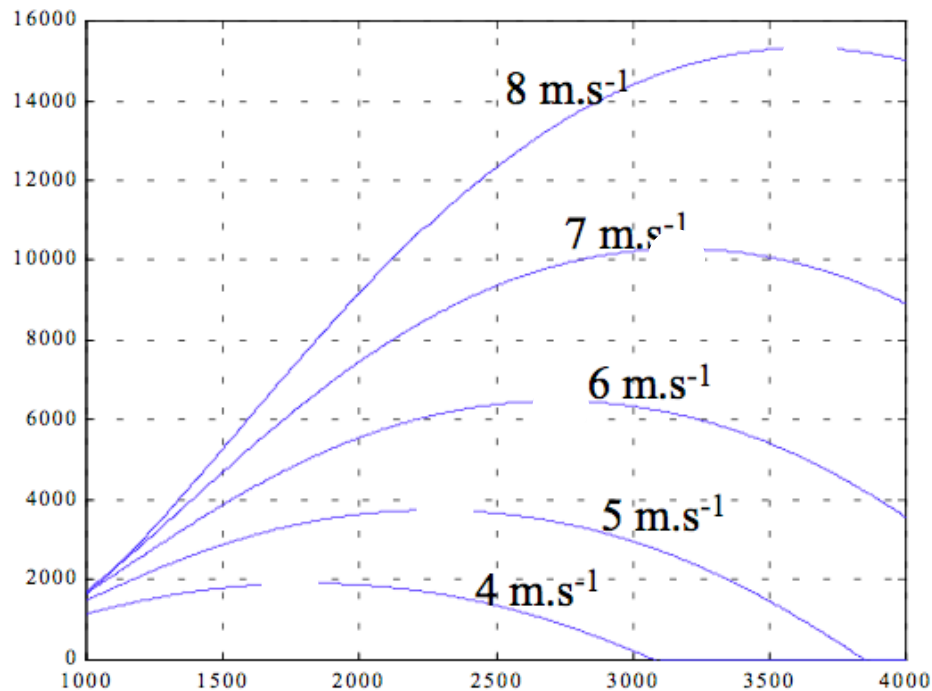


La valeur maximale de C_p est fixée par la loi de Betz = 0,59

Conclusion sur l'hélice

La vitesse de rotation de l'hélice Ω dépend de v

P méca (W)

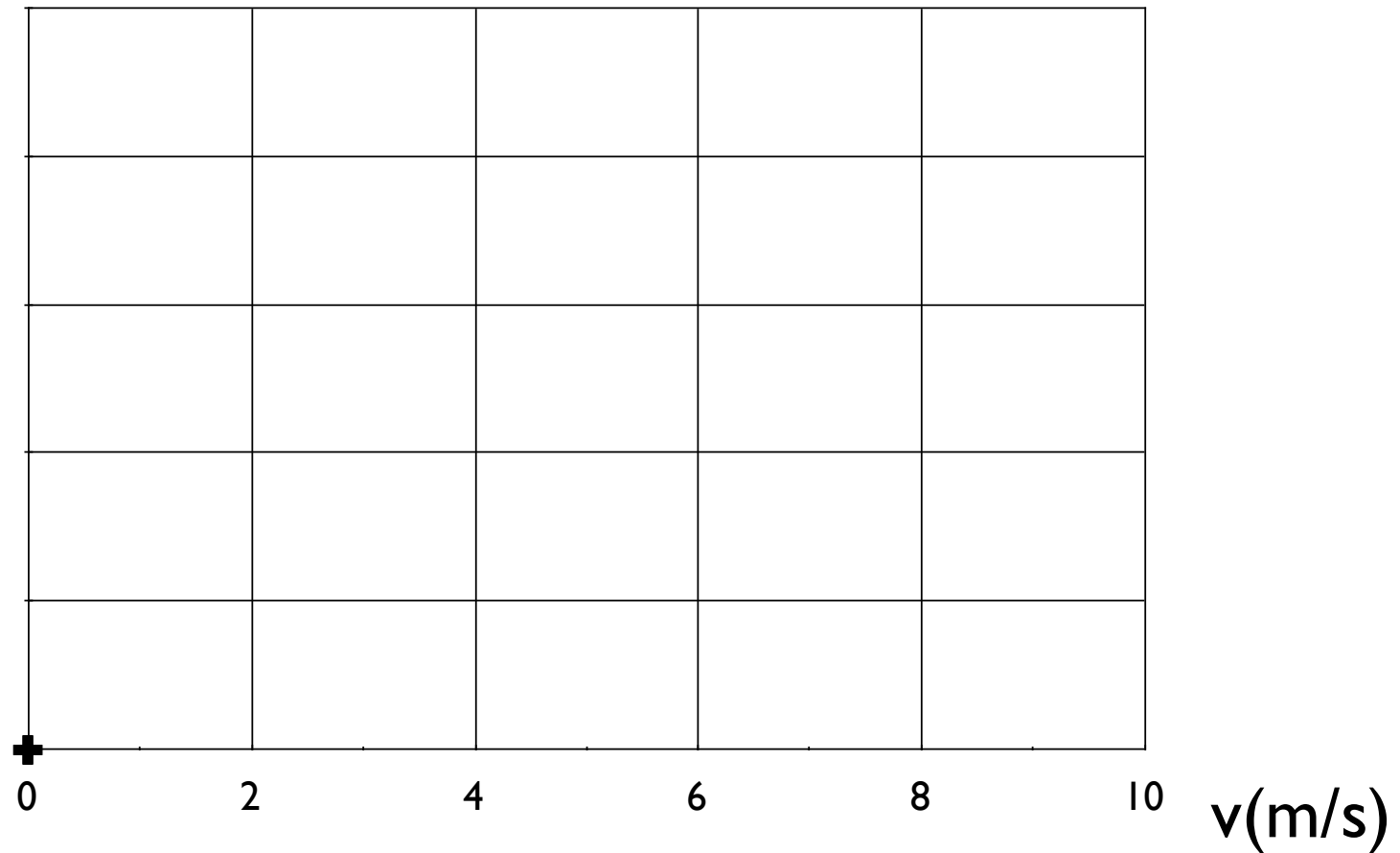


=> nécessité du multiplicateur de vitesse pour “obtenir” la valeur maximale de la puissance pour une vitesse de vent donnée

Ω (rad/s)

Exercice : construire la courbe $P_{\text{méca}}=f(v)$

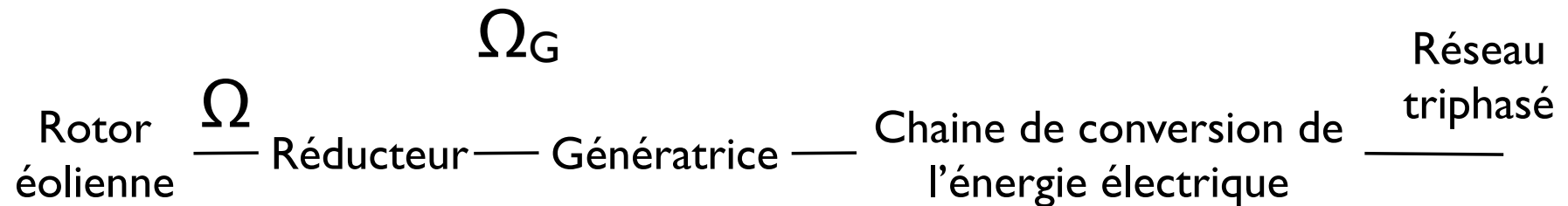
$P_{\text{méca}}$
(W)



Chaîne de conversion electromécanique

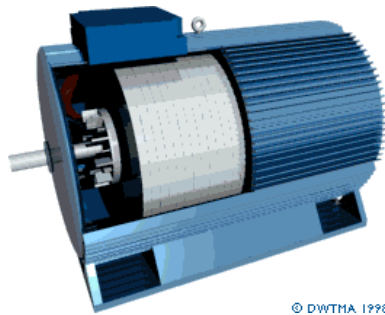


Les étapes de la conversion électrique



- Réducteur : adaptation de la vitesse de rotation à la génératrice
- Génératrice : conversion $P_{\text{mécanique}} \rightarrow P_{\text{électrique}}$
- Chaîne de conversion de l'énergie électrique : l'éolienne est connectée au réseau d'alimentation EDF : nécessité "d'adapter" la nature des signaux

Exemples de génératrice



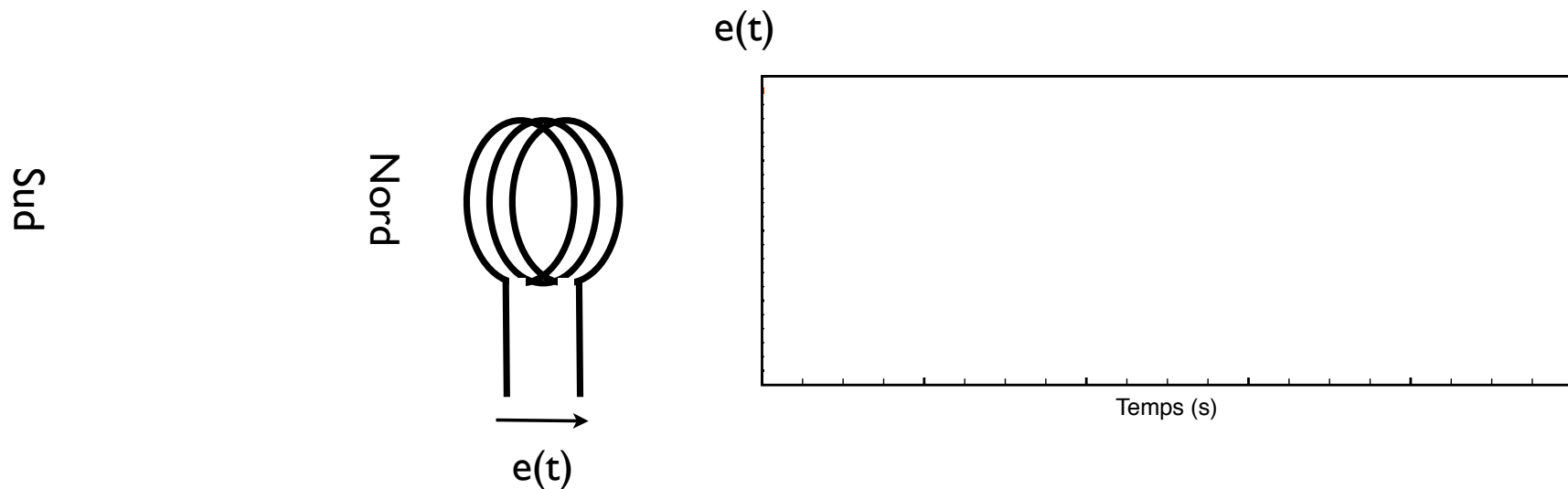
© DWTHA 1998



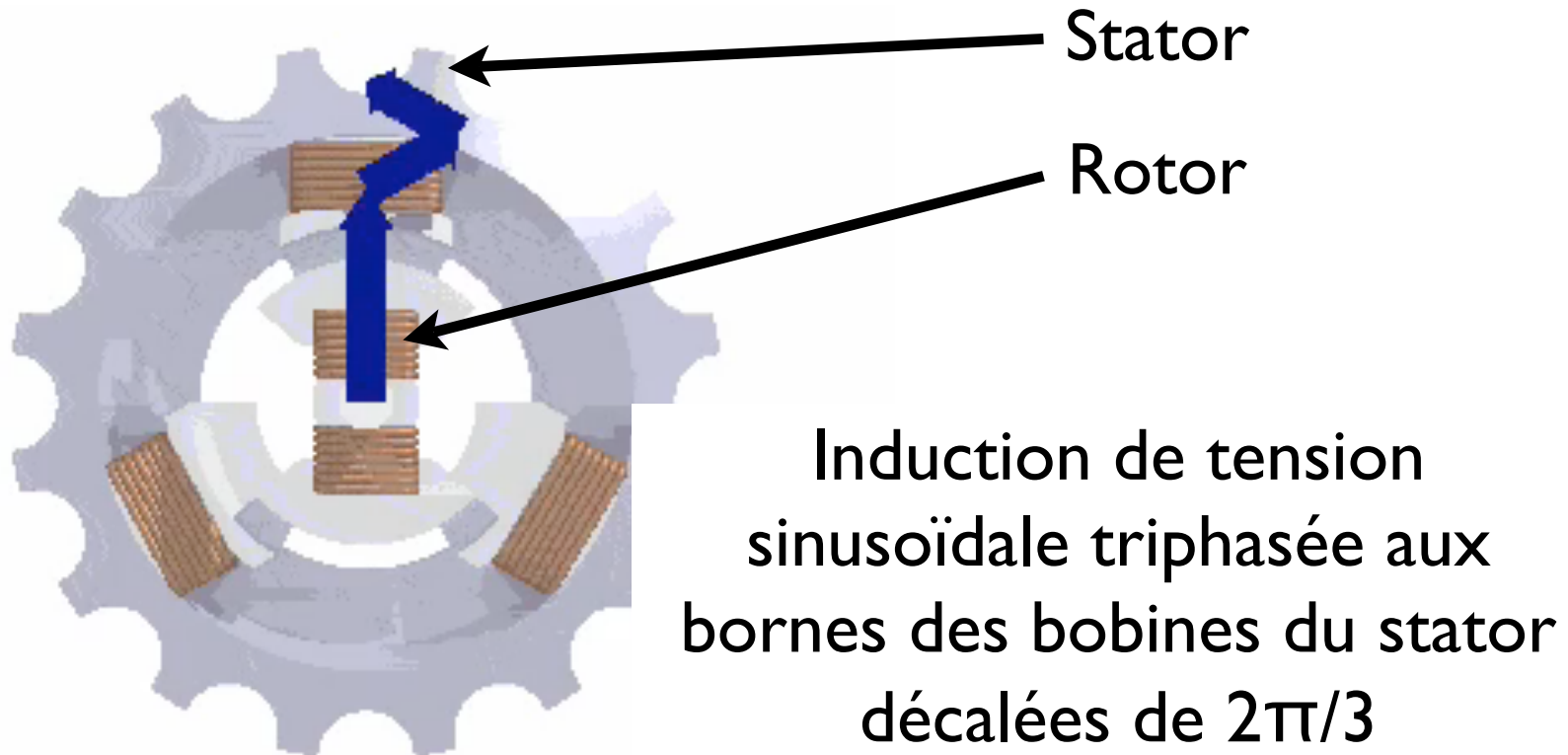
Doc. Alstom

Comment se fait la conversion ?

Utilisation de phénomène d'induction : dans une spire, une variation du flux magnétique crée une fem induite.
Un flux est crée par un aimant permanent ou non



Fonctionnement d'une génératrice



En pratique, on utilise une génératrice asynchrone triphasée mieux adaptée à l'éolienne (changement de configuration du stator en fonction de la vitesse du vent...)

Systeme de tension triphasé

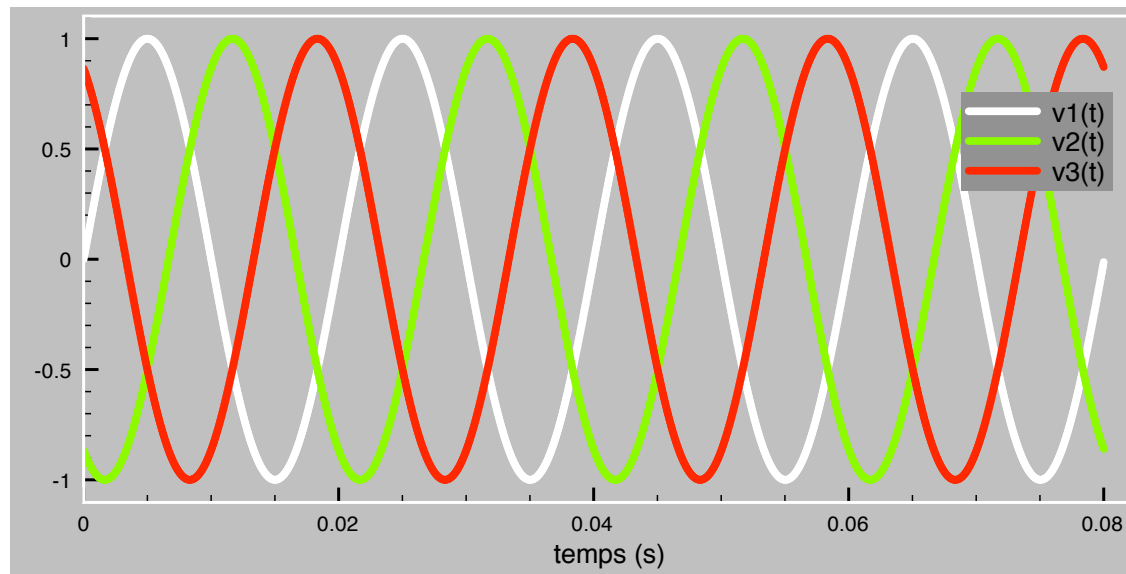
- 3 phases et un neutre
- $v_1(t) = V \cdot \cos(\omega \cdot t)$
- $v_2(t) = V \cdot \cos(\omega \cdot t - 2 \cdot \pi/3)$
- $v_3(t) = V \cdot \cos(\omega \cdot t - 4 \cdot \pi/3)$

ω : pulsation

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

f : fréquence

$f = 50$ Hz en France





Chaîne de conversion de l'énergie électrique

- Raccordement aux réseaux triphasés EDF : utilisation une chaîne de conversion de l'énergie : triphasé → continue → réseau
- Conversion triphasé → continu = **redresseur**
- Conversion continu → réseau = **onduleur**

Tension
triphasée
génératrice

—

Redresseur

—

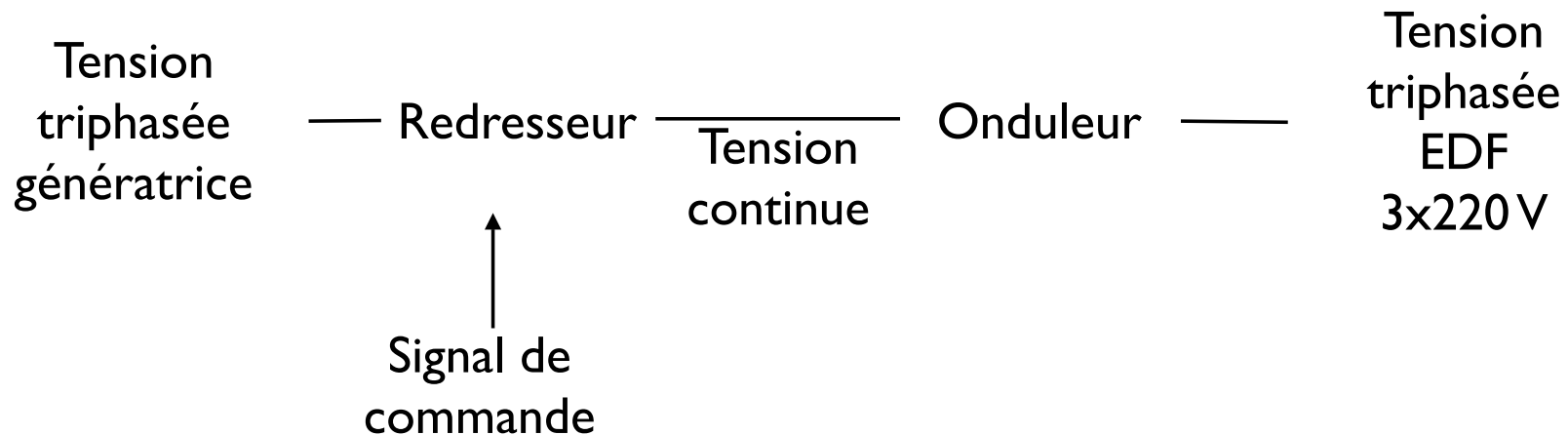
Tension
continue

Onduleur

—

Tension
triphasée
EDF
3x220V

Chaîne de conversion de l'énergie électrique



Une commande sur le redresseur est nécessaire pour adapter le courant débité par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent (la tension du réseau est fixe).

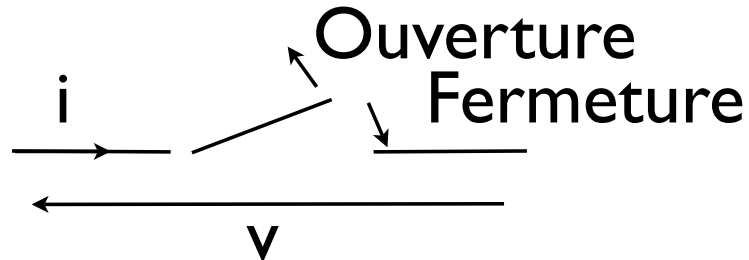
=> ajustement nécessaire de la **tension continue**.

Un peu de génie électrique

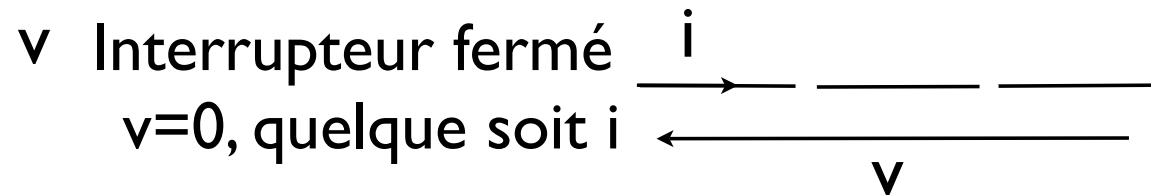
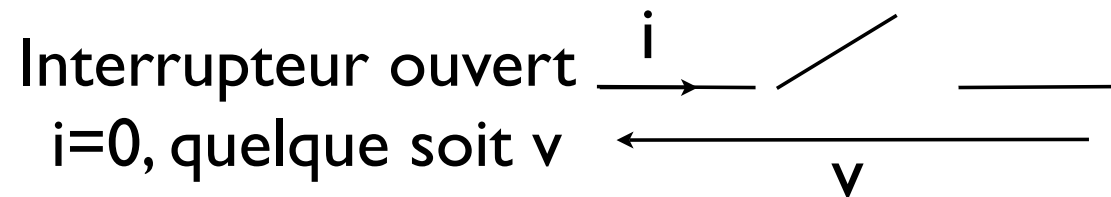
- Les interrupteurs de l'électronique de puissance : la diode et le thyristor
- Redresseur simple alternance, double alternance et double alternance commandée

Interrupteur commandé

Fonction de base de l'électronique de puissance



i

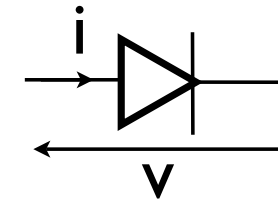


Dans tous les cas produit Puissance= $i \cdot v=0$
 \Rightarrow rendement **élevé**

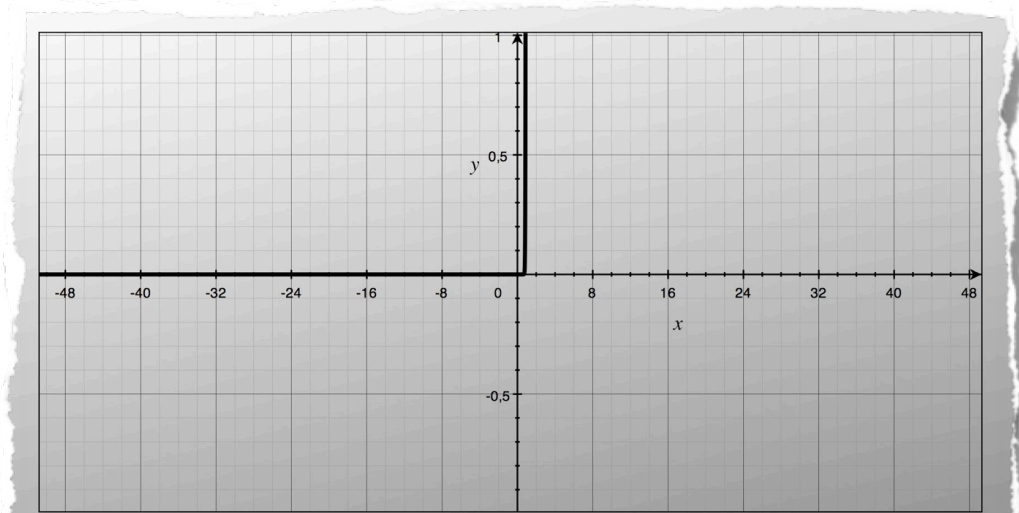
Interrupteur commandé un exemple : la diode

$$i = I_S \cdot \left(e^{\left(\frac{q \cdot v}{k \cdot T} \right)} - 1 \right)$$

- I_S : courant inverse (A)
- k : constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- T : température
- q : charge élémentaire $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C
- $k \cdot T / q = U_T = 25$ mV



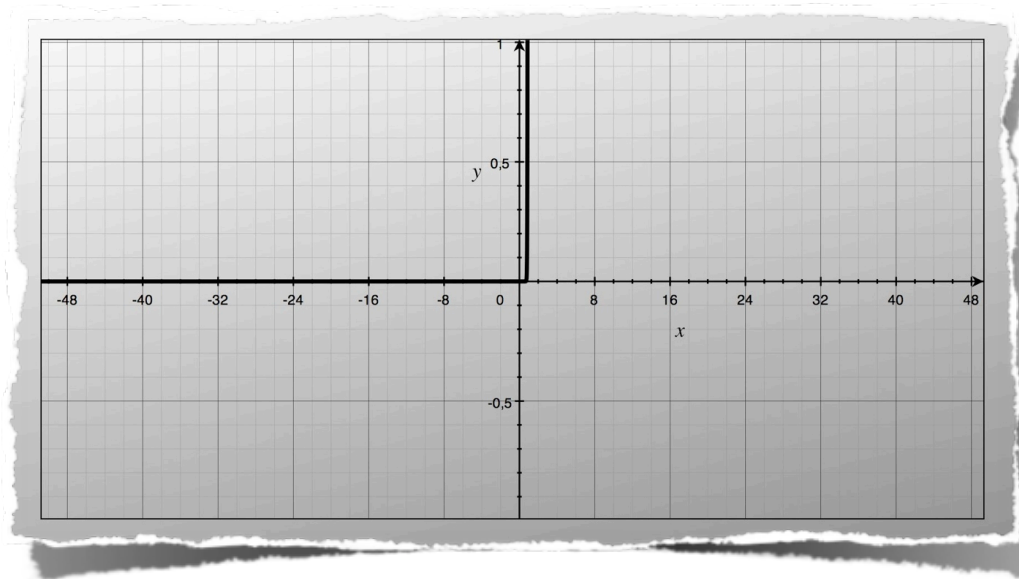
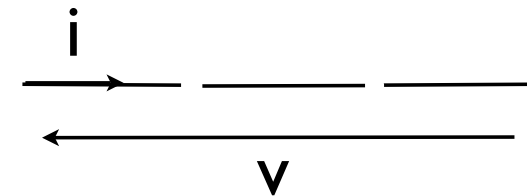
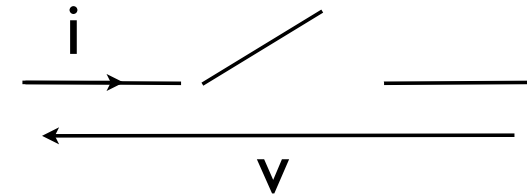
i



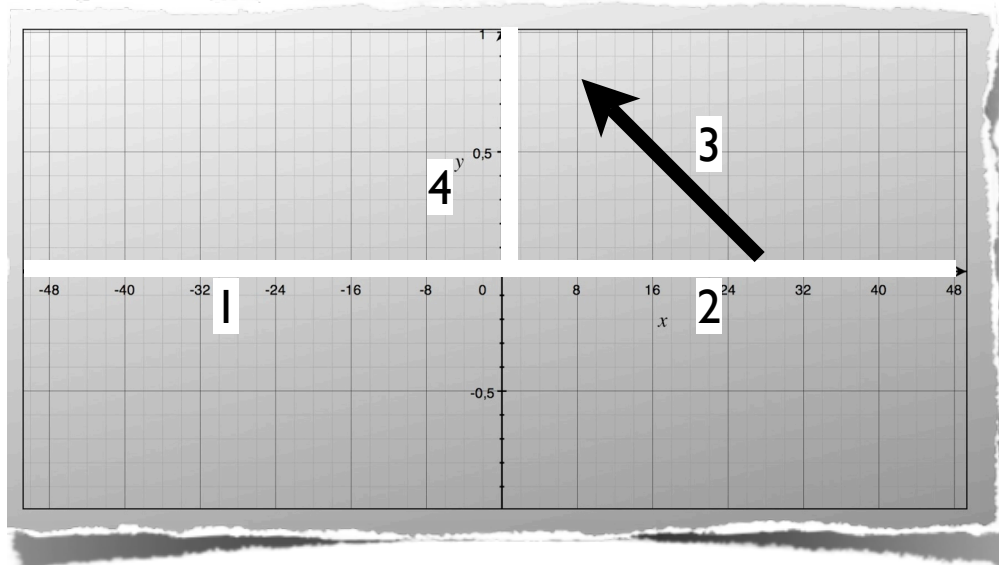
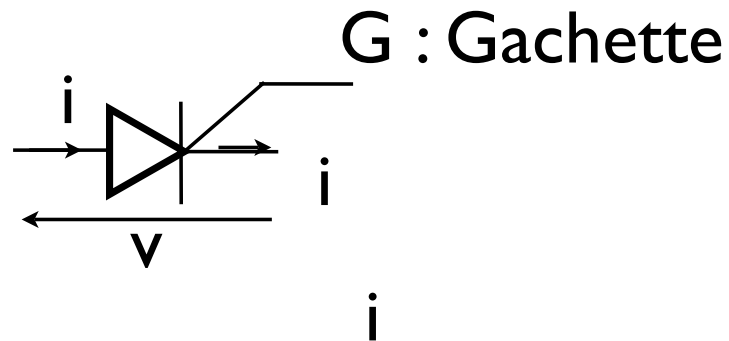
- si $v > 0$ diode passante
- si $v < 0$ et $i < 0$ diode bloquée

Interrupteur commandé : la diode

Approximation



Interrupteur commandé à la fermeture : le thyristor



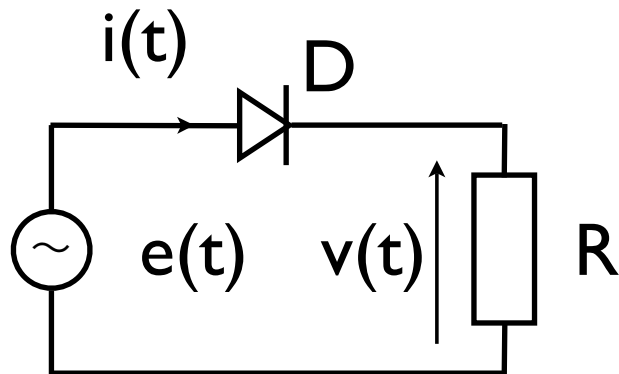
- 1 : $v < 0$: interrupteur bloqué
- 2 : passage de $v < 0$ à $v > 0$: interrupteur reste bloqué
- 3 : $v > 0$ et impulsion sur la gachette \Rightarrow fermeture de l'interrupteur
- 4 : $i < 0$ ouverture de

Redressement avec des diodes et des thyristors

Cas des tensions monophasées pour simplifier

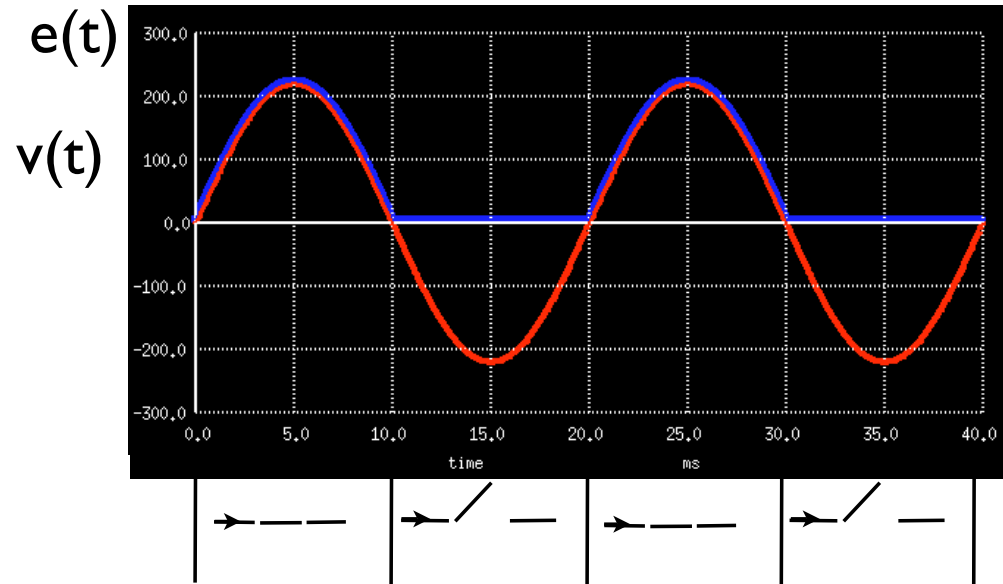
Un exemple de montage

Redressement simple alternance en monophasé



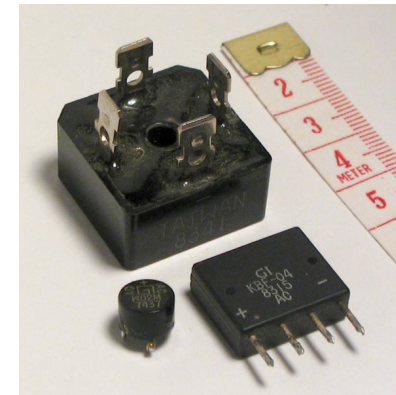
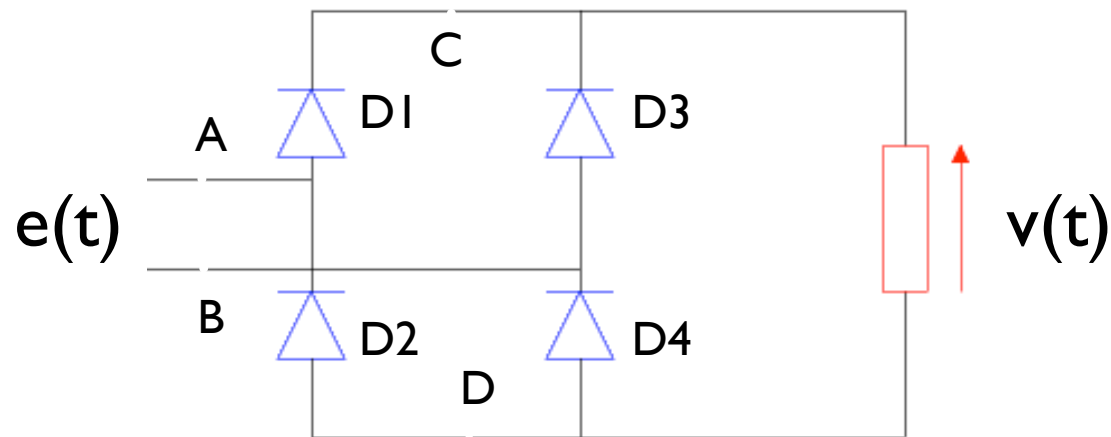
$$i(t) = (e(t) - v(t)) / R$$

$$i(t) = 0 \text{ dès que } e(t) < 0$$



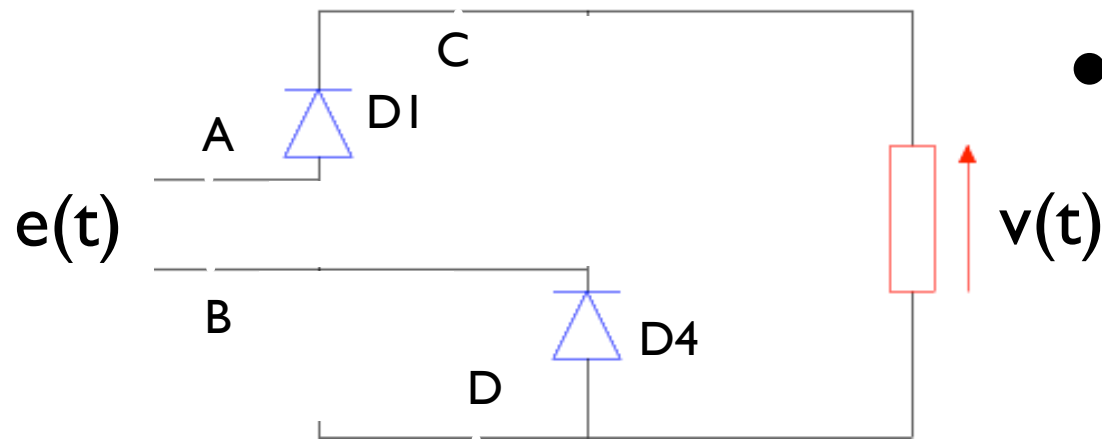
Exercice : calcul de la valeur moyenne de $v(t)$ en posant $e(t) = E \cdot \cos(\omega \cdot t)$

Redressement double alternance



- $e(t) > 0$ D1 et D4 passante, D2 et D3 bloquée
- $e(t) < 0$ D3 et D2 passante, D1 et D4 bloquée

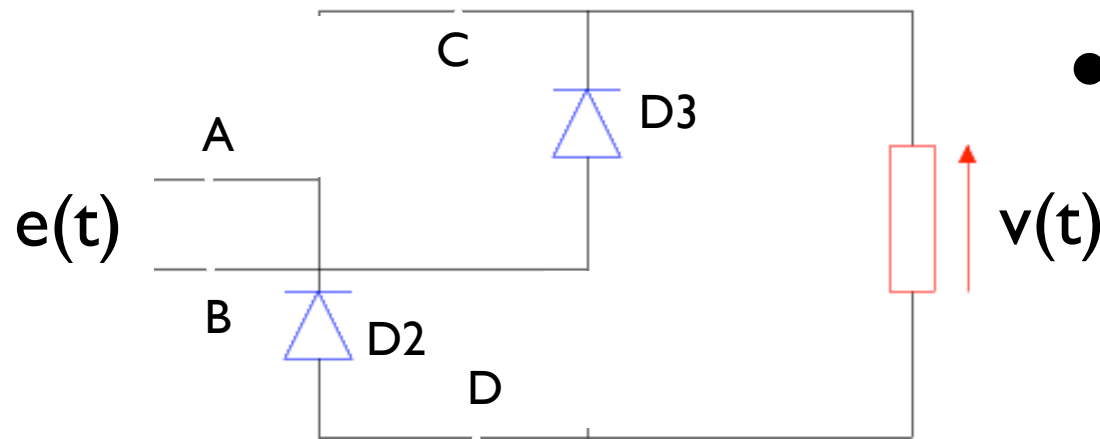
Redressement double alternance $e(t) > 0$



- D1 et D4 passante,
D2 et D3 bloquée

$$\Rightarrow v(t) = V_{CD} = V_{AB} = e(t)$$

Redressement double alternance $e(t) < 0$

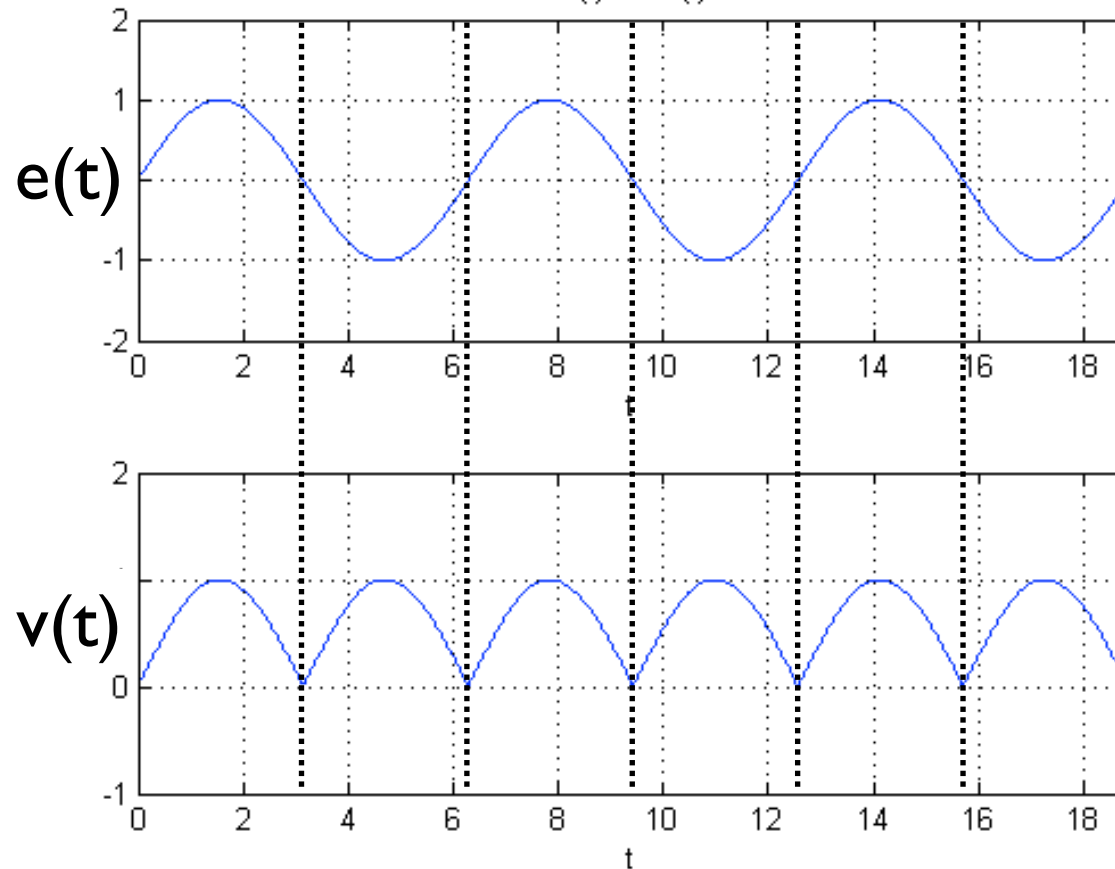


- D2 et D3 passante,
D1 et D4 bloquée

$$\Rightarrow v(t) = V_{CD} = V_{BA} = -V_{AB} = -e(t)$$

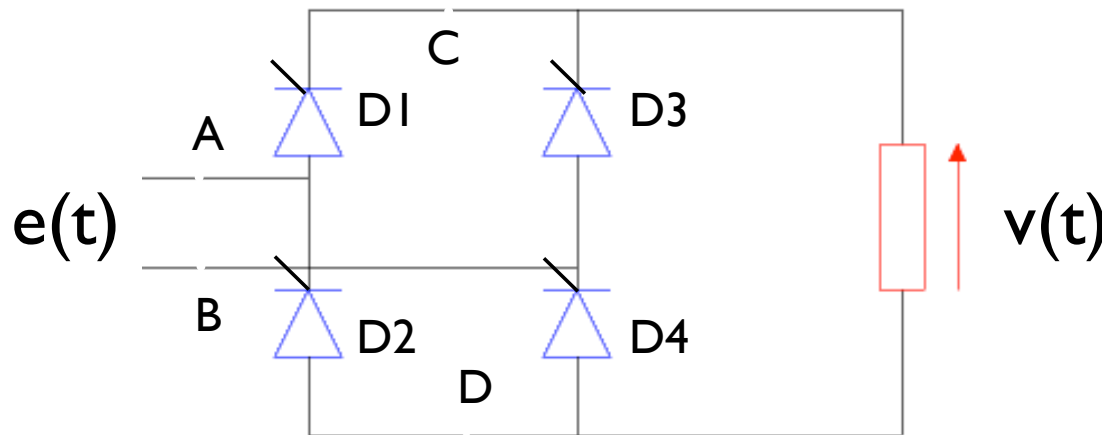
Redressement double alternance : résultat

$$e(t) = E \cdot \cos(\omega \cdot t)$$



Exercice : calcul
de la valeur
moyenne de $v(t)$

Redressement double alternance commandée

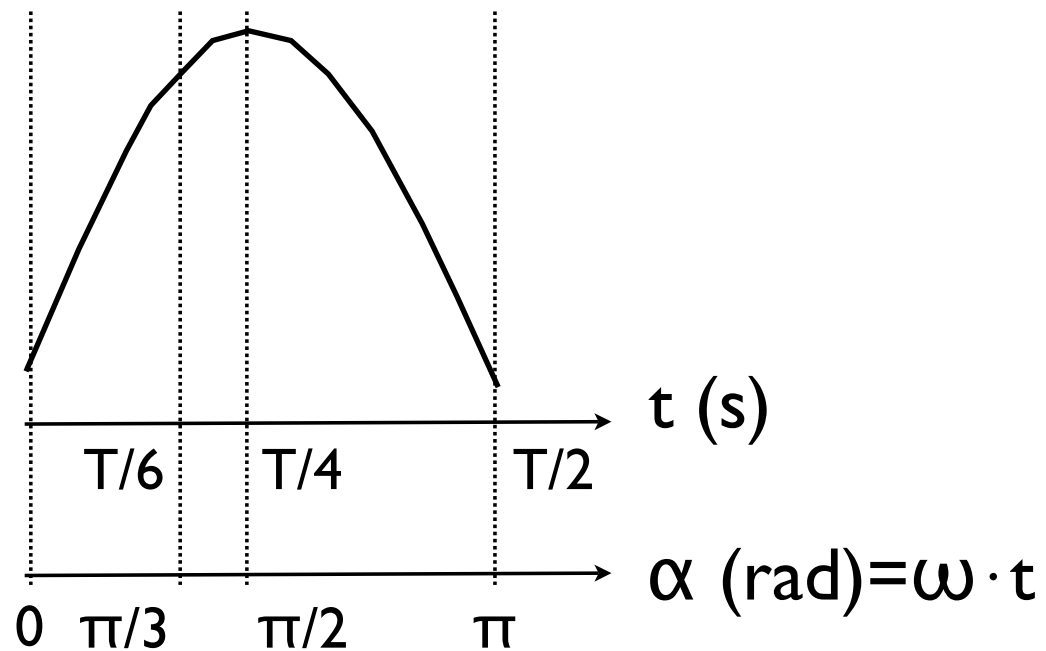


- Remplacement des diodes par des thyristors

- Rappel thyristor : se comporte comme une diode à condition d'appliquer une tension sur la gachette pour fermer l'interrupteur. Se bloque dès que le courant est négatif.
- on note α l'angle de retard par rapport à la conduction naturelle de la diode

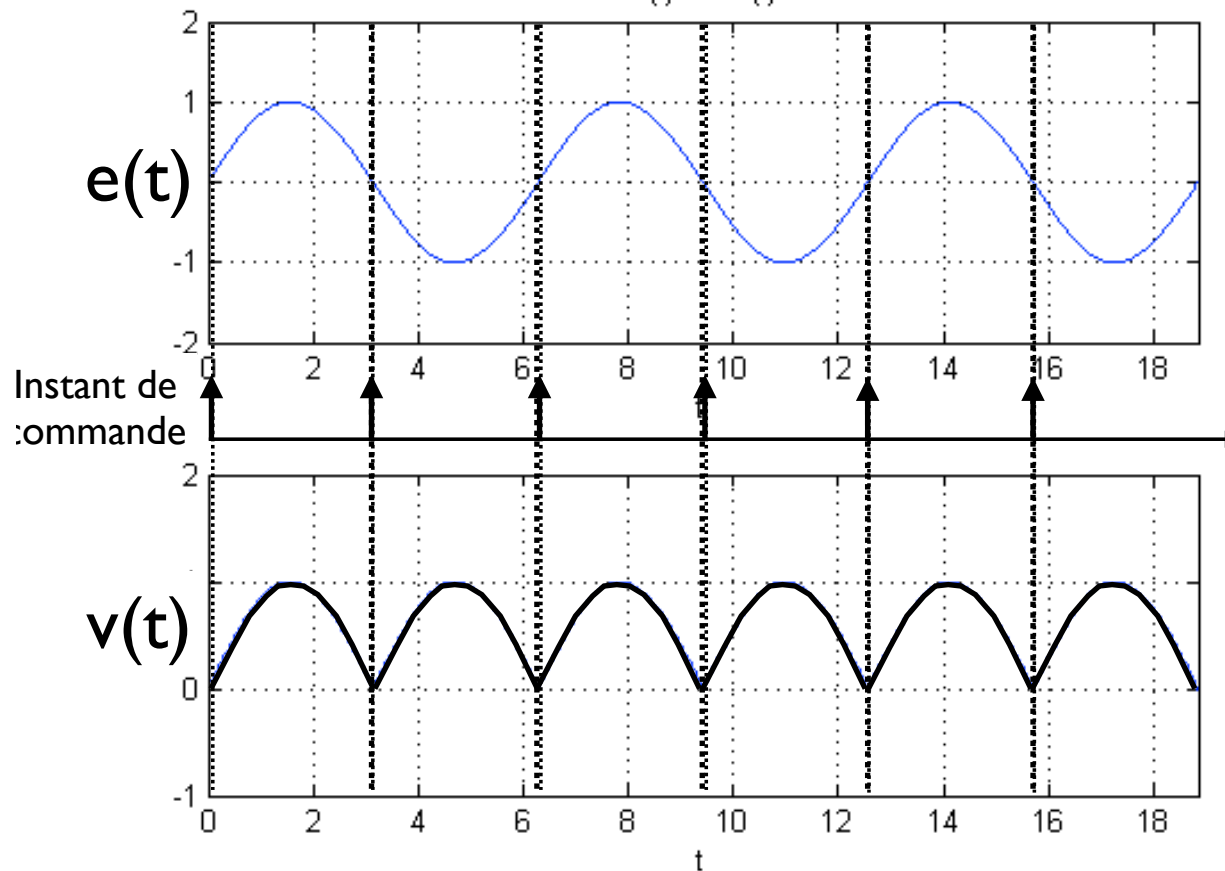
Précision sur α

- Sur une période



Redressement double alternance : résultat

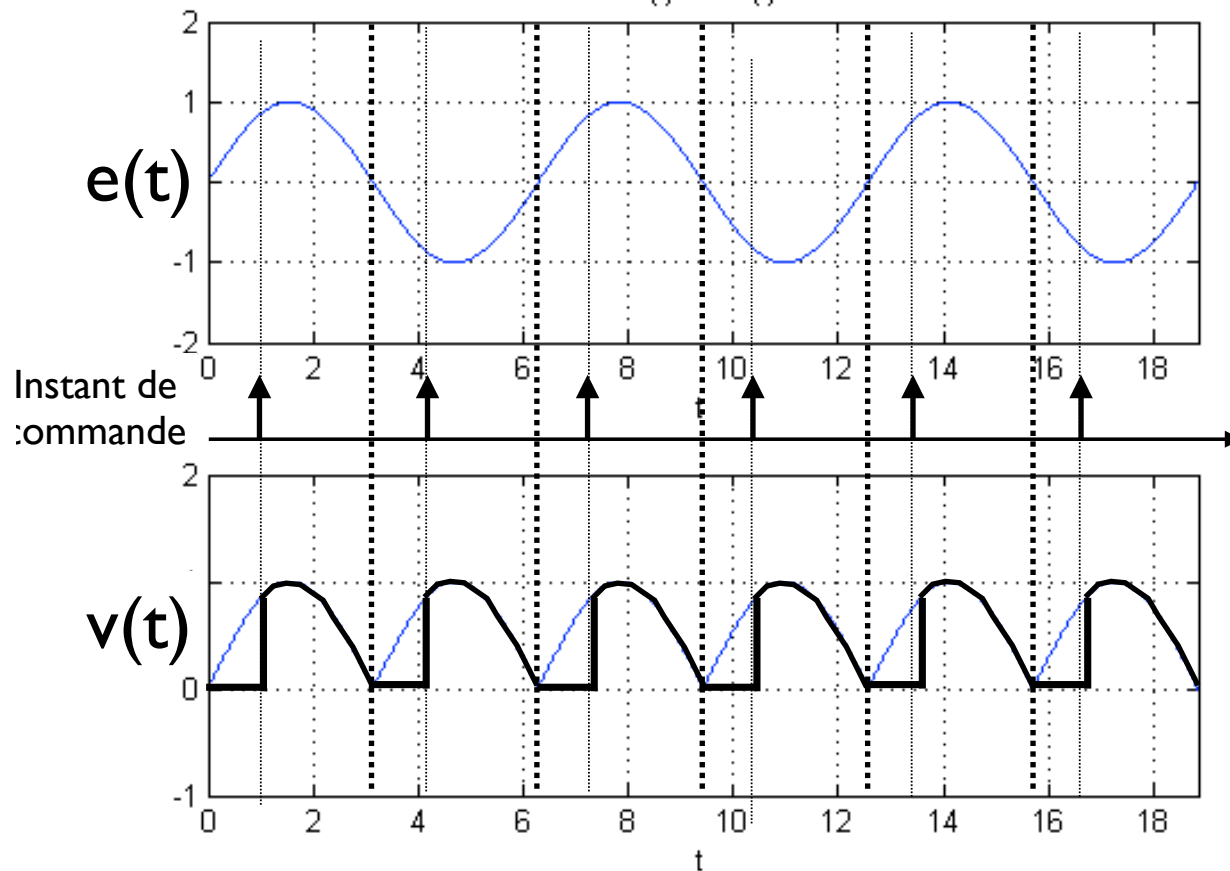
$$e(t) = E \cdot \cos(\omega \cdot t)$$



• $\alpha = 0$

Redressement double alternance : résultat

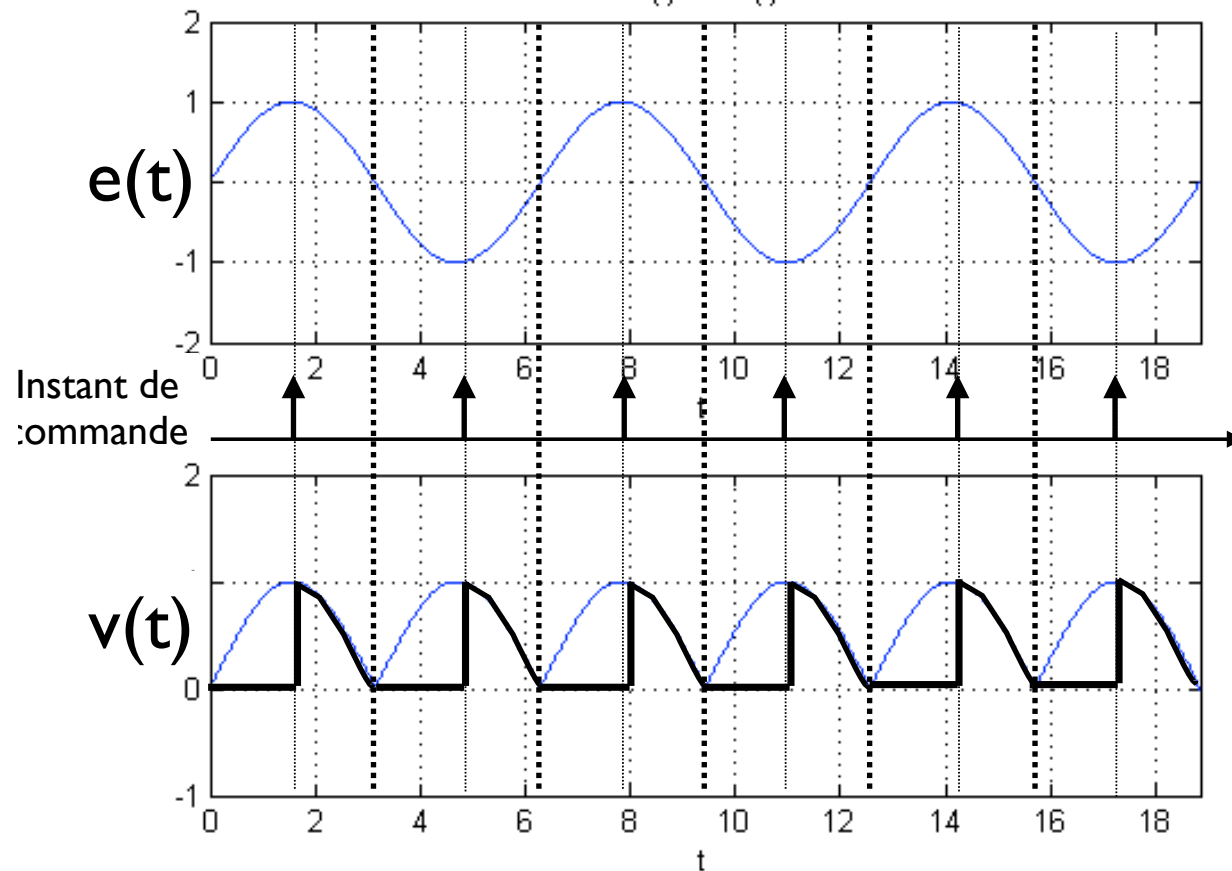
$$e(t) = E \cdot \cos(\omega \cdot t)$$



- $\alpha = \pi/3$

Redressement double alternance : résultat

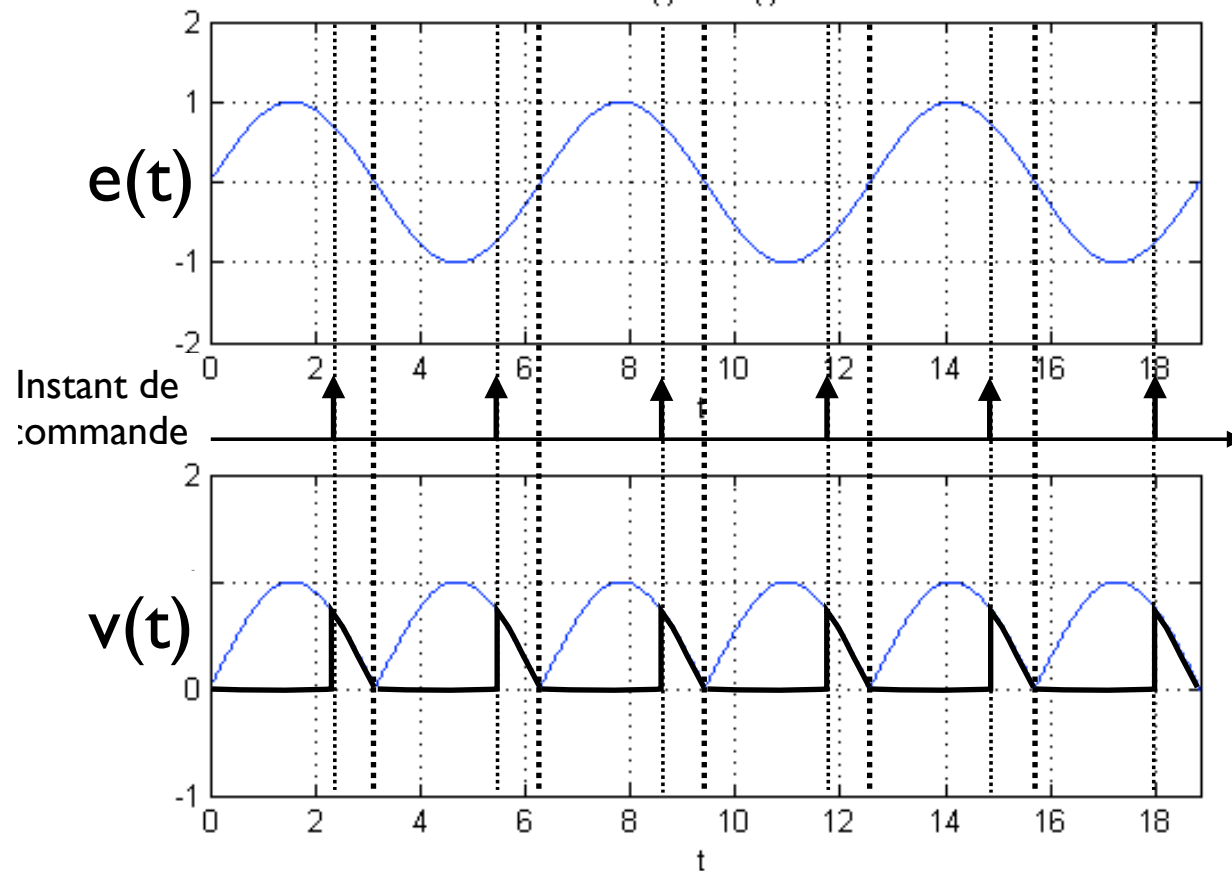
$$e(t) = E \cdot \cos(\omega \cdot t)$$



- $\alpha = \pi/2$

Redressement double alternance : résultat

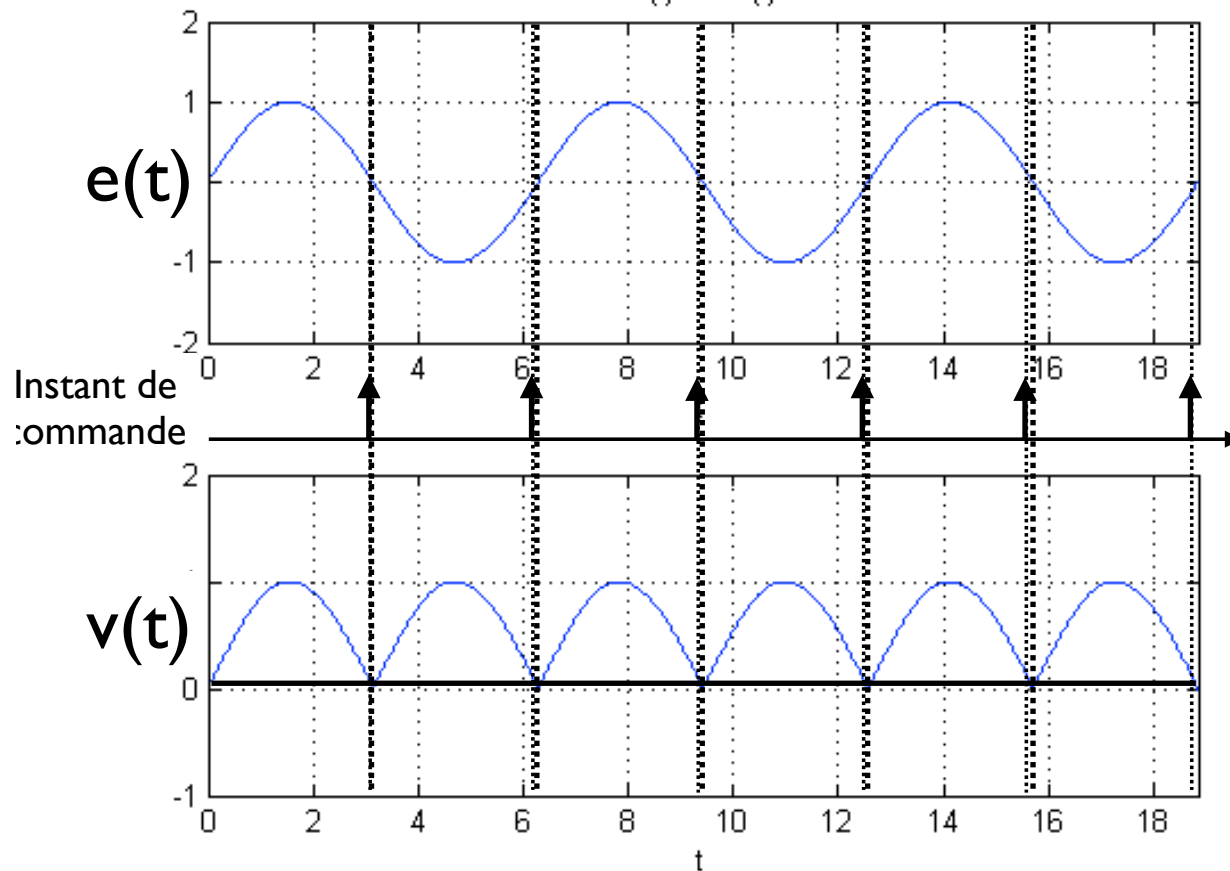
$$e(t) = E \cdot \cos(\omega \cdot t)$$



- $\alpha = 2\pi/3$

Redressement double alternance : résultat

$$e(t) = E \cdot \cos(\omega \cdot t)$$



- $\alpha = \pi$

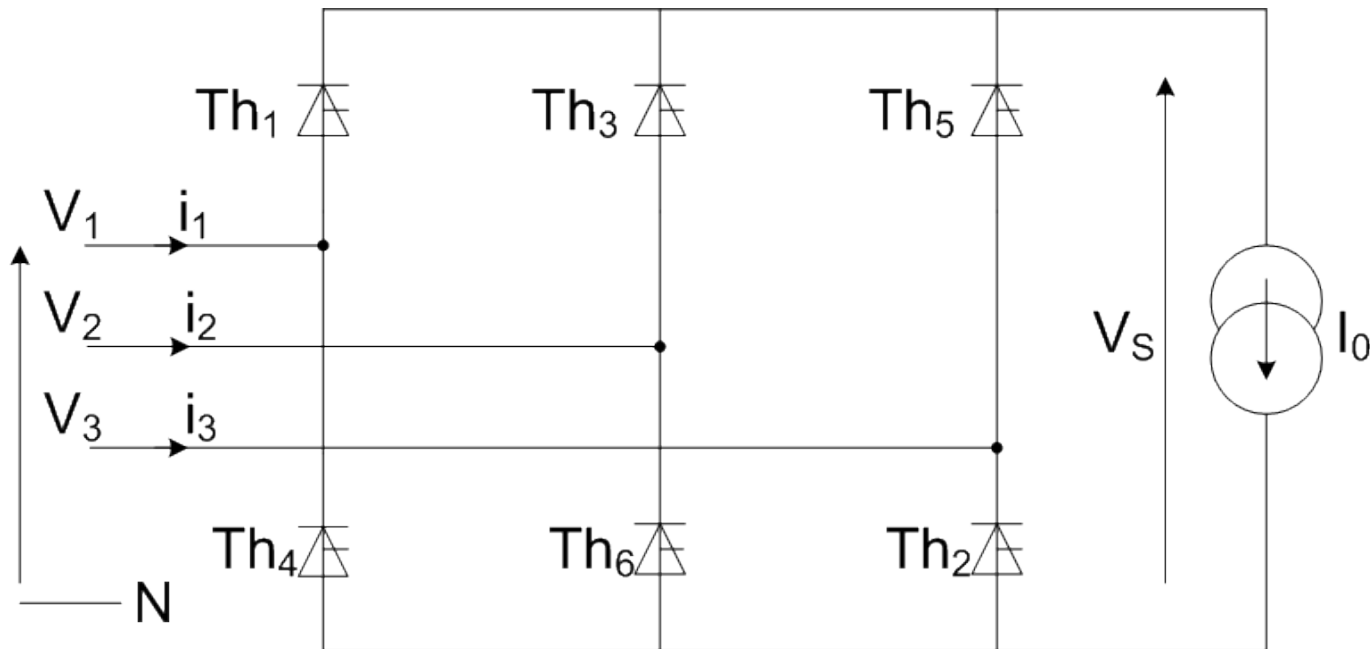
Exercice : calcul
de la valeur
moyenne de $v(t)$

Conclusion

Type de montage	Valeur moyenne de la tension de sortie
Simple alternance	
Double alternance	
Double alternance commandée	

Seul le montage “commandé” peut être utilisé dans une éolienne pour ajuster la puissance électrique en fonction de la vitesse du vent.

Et en triphasé ?

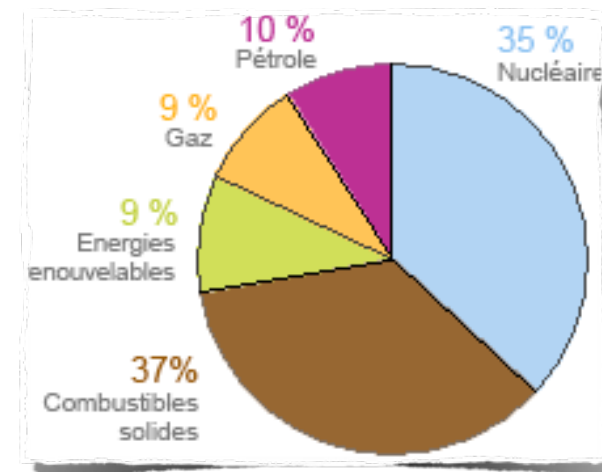
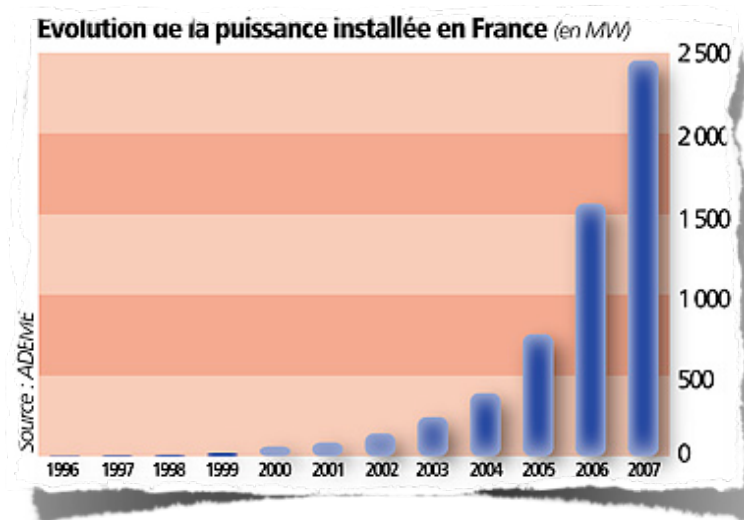
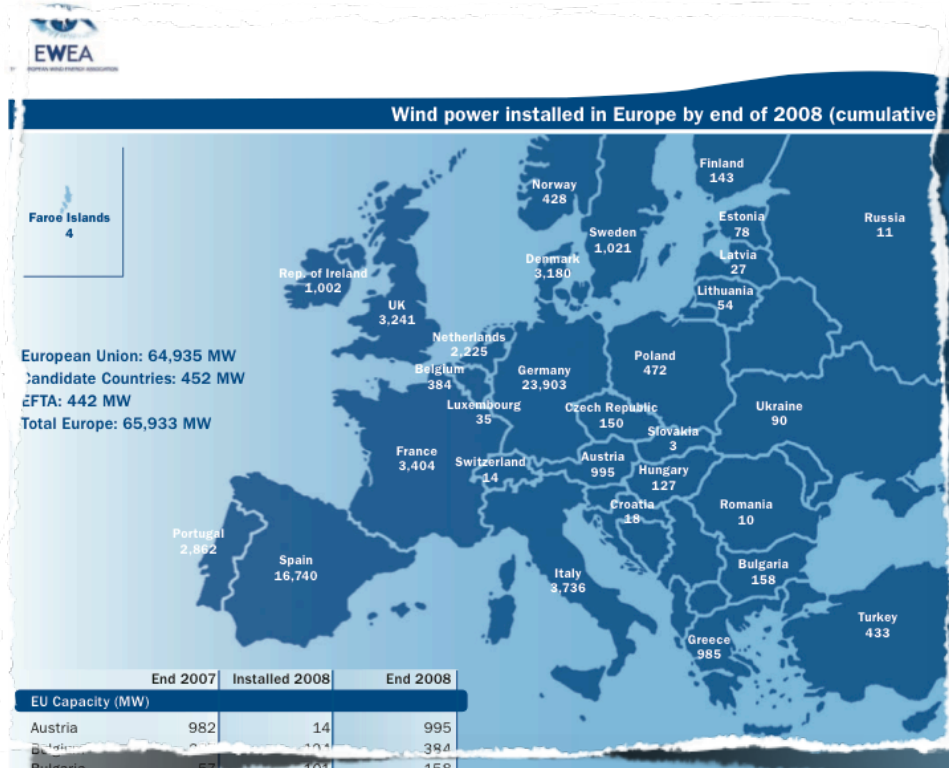


Il suffit d'ajouter deux thyristors pour une des phases !!!

En guise de conclusion

- sur l'éolien
- sur le génie électrique à l'UFR de sciences
- sur le génie électrique dans la société

Conclusions sur l'éolien





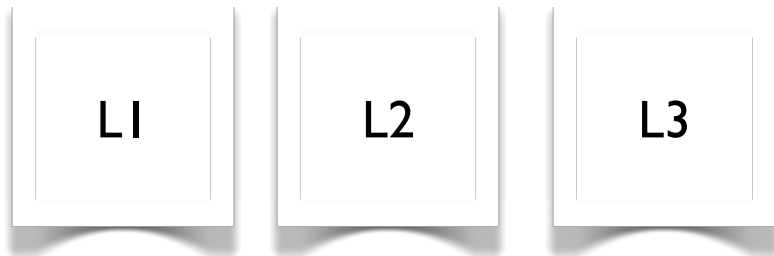
Pluridisciplinarité

Notion abordée dans cette conférence et rassemblée dans un système complexe :

- Thermodynamique
 - Mécanique
 - Mécanique des fluides
 - Magnétisme
 - Electricité
 - Electronique de puissance
 - Mathématique
-
- Une formation doit d'être la plus multidisciplinaire possible !!!!!



Génie électrique à l'UFR de sciences



Parcours
sciences pour l'ingénieur

- L3 : sous parcours EEA : génie électrique + électronique de puissance : 30h CM, 20hTD, 21h TP
- L2 sous parcours SPIM : électrotechnique : 13 h CM 13 hTD 3 hTP
- L1 : CSB : 1,5 h sur l'éolienne



Génie électrique à l'UFR de sciences

MI
EEA

M2 Pro
AEII

Parcours
professionnel

- M2 Pro AEII : électronique de puissance 20h CM, 13hTD, 21h TP
- MI EEA : Electronique de puissance 20hCM, 13h TD, 21h TP

Génie électrique dans la société

- Société de l'information et de la communication : porteur de l'information = l'électron => besoin d'énergie électrique !

- Société des transports => essor du transport électrique : métro, tram, voiture



train

- ...



Pour toutes questions :
Jean-Marc Routoure
02.31.45.27.22
routoure@greyc.ensicaen.fr

Retrouver ce document mis à jour à l'adresse :
www.greyc.ensicaen.fr/~routoure/Enseignement
ou taper routoure sous google :-)

Site de "référence" : www.windpower.org