

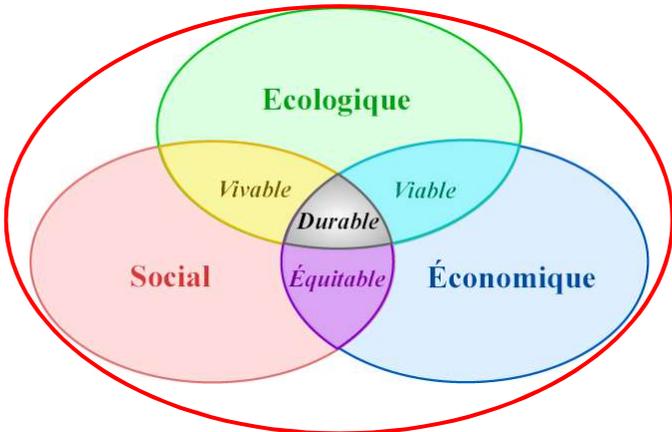
Energies Renouvelables

Yvan CUMINAL
Université Montpellier / IUT Montpellier
Département Mesures Physiques
2019-2020

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **1**

EnR et Développement Durable.



The diagram illustrates the three pillars of Sustainable Development: Ecologique (green), Social (pink), and Économique (blue). The overlapping areas are labeled: *Vivable* (Ecological and Social), *Viable* (Ecological and Economic), *Durable* (Ecological, Social, and Economic), and *Équitable* (Social and Economic). The entire set is enclosed in a red oval.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **2**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



Les Energies Renouvelables : pourquoi ?

Energies renouvelables (EnR) : toutes les énergies que la nature constitue ou reconstitue plus rapidement que l'Homme ne les utilise. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

- Lutter contre le changement climatique.
- Augmentation de la production énergétique.
- Réserves de combustibles fossiles limitées.
- Limiter la dépendance énergétique.

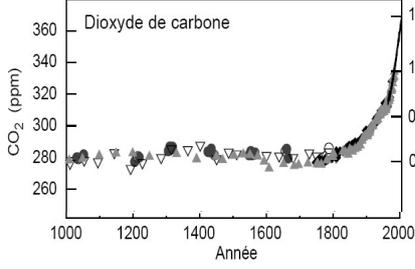
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 3

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



EnR contexte écologique

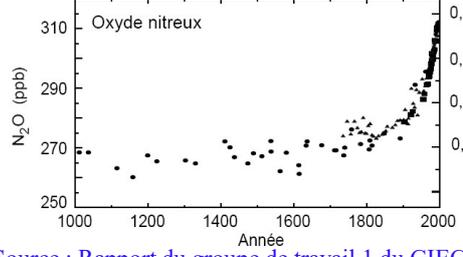
Données obtenues par analyse de carottes de glace sur plusieurs sites d'antarctique et du Groenland. Données complétées par des mesures directes dans l'atmosphère ces dernières décennies.



Dioxyde de carbone

CO₂ (ppm)

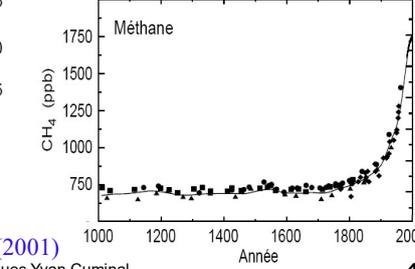
Année



Oxyde nitreux

N₂O (ppb)

Année



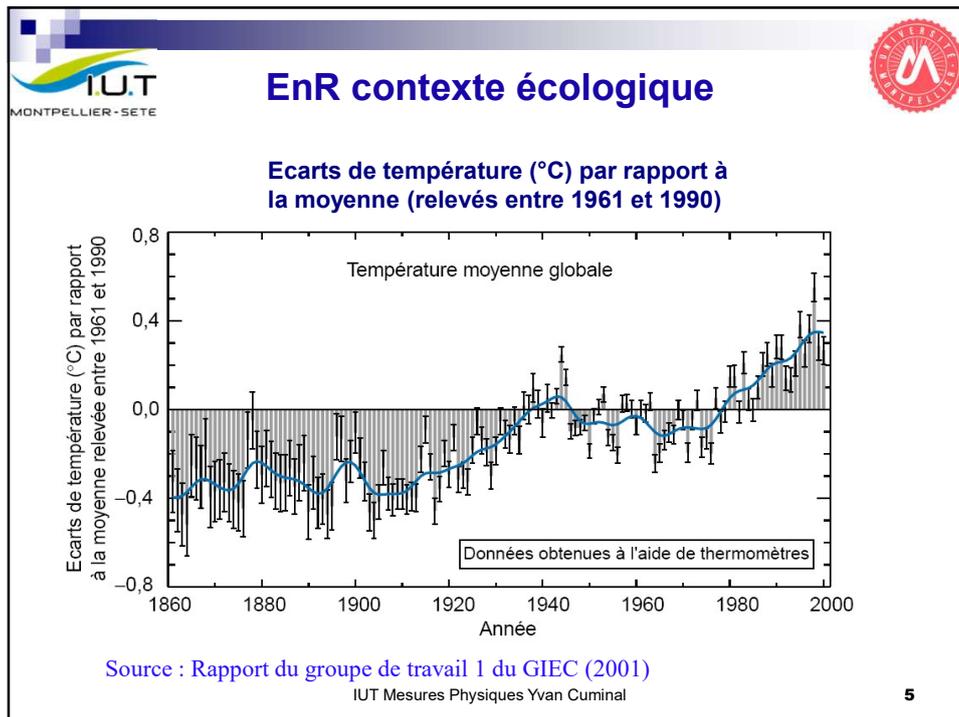
Méthane

CH₄ (ppb)

Année

Source : Rapport du groupe de travail 1 du GIEC (2001)

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 4



L'Énergie dans tous ses états :

Énergie primaire :
Une source d'**énergie primaire** est une forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. Si elle n'est pas utilisable directement, elle doit être transformée en une source d'énergie secondaire pour être mise en œuvre.

Énergie secondaire :
L'énergie secondaire est elle-même transformée en énergie finale au stade de l'utilisation.

Dans les statistiques de comparaison de la production et de l'utilisation de l'énergie, on a l'habitude de considérer comme énergie primaire, l'énergie qui résulte de la première transformation (ainsi la chaleur nucléaire, l'électricité éolienne ou l'électricité hydraulique est-elle considérée comme électricité primaire) et comme énergie finale la forme sous laquelle elle arrive chez l'utilisateur final (ainsi l'électricité mesurée au compteur de l'abonné quelle qu'en soit l'utilisation finale : éclairage, chauffage, machines...), parce que ce sont celles pour lesquelles on dispose de données chiffrées.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

6

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

L'Energie dans tous ses états :

The diagram illustrates the energy conversion process across four levels:

- Level 1 (Primary Energy):** URANIUM, SOLAIRE, HYDRAULIQUE, PETROLE BRUT, ELECTRICITE PRIMAIRE, GAZ NATUREL, CHARBON.
- Level 2 (Secondary Energy):** PRODUITS PETROLIERS (ESSENCE, GAS OIL, FUEL OIL DOM., FUELS LOURDS), ELECTRICITE SECONDAIRE, GAZ MANUFACTURE.
- Level 3 (Energy Carriers):** PRODUITS PETROLIERS, ELECTRICITE, GAZ, CHARBON.
- Level 4 (User Devices):** APPAREILS UTILISATEURS (industrie, secteur domestique, transports), which produce CHALEUR, FORCE MOTRICE, VAPEUR, and ECLAIRAGE.

* Extrait du cours de Jacques Percebois UM1
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **7**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

L'Energie dans tous ses états :

This diagram is identical to the one on slide 7, but with specific highlights:

- ELECTRICITE PRIMAIRE** is circled in red.
- ELECTRICITE SECONDAIRE** is outlined in blue.

* Extrait du cours de Jacques Percebois UM1
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **8**




L'Énergie dans tous ses états :

Le **Joule (J)** est l'unité de mesure de travail, d'énergie et de quantité de chaleur, équivalant au travail produit par une force de 1 Newton dont le point d'application se déplace de 1m dans la direction de la force.

- 1 kilojoule (kJ) = 1.000 J (10^3 J)
- 1 mégajoule (MJ) = 1.000 kJ (10^6 J)
- 1 gigajoule (GJ) = 1.000 MJ (10^9 J)
- 1 térajoule (TJ) = 1.000 GJ (10^{12} J)
- 1 petajoule (PJ) = 1.000 TJ (10^{15} J)
- 1 exajoule (EJ) = 1.000 PJ (10^{18} J)

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 9




L'Énergie dans tous ses états :

Le **kilowattheure (kWh)** est l'unité d'énergie ou de travail, équivalant au travail exécuté pendant une heure par une machine dont la puissance est de 1 kilowatt (1000 W).
1 kWh = 3,6 MJ
 1 **mégawattheure (MWh)** = 1.000 kWh
 L'unité officielle d'énergie est le Joule (J) mais, parce que le pétrole est l'énergie dominante, les énergéticiens utilisent la **tonne d'équivalent pétrole (tep)** ou quelquefois la **tonne d'équivalent charbon (tec)**.

Les **coefficients d'équivalence** permettent conventionnellement de comparer dans une unité commune (tep : tonne équivalent pétrole), des quantités d'énergie de natures diverses.
 1 Mtep : Million de tonnes équivalent pétrole, unité de mesure permettant de comparer les différentes énergies entre elles, il s'agit de l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole.

- 1 tonne de pétrole = 1,000 tep
- 1 tonne de charbon = 0,619 tep
- 1 tonne de charbon pauvre = 0,405 tep
- 1 tonne de bois = 0,300 tep (environ)
- 1 tonne de gaz butane ou propane = 1,095 tep
- 1 Mwh d'électricité = 0,086 tep (énergie finale)
- 1 Mwh de gaz naturel = 0,077 tep
- 1 000 litres de fuel lourd = 0,950 tep

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 10

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

L'Énergie dans tous ses états :

Les controverses sur les coefficients d'équivalence

- Problème avec l'électricité primaire d'origine nucléaire: 2 approches.
- Par convention 1kWh = 3,6 MJ ou 1 MWh=3,6 GJ.
- Par convention 1 tep = 42 GJ donc 1 MWh=3,6/42 =0,086 tep si l'on adopte le principe de « l'équivalence à la consommation » (cas de l'électricité secondaire issue des centrales thermiques classiques au charbon, gaz ou fuel).
- Par convention 1 MWh = 0,086 /0,33 = 0, 2606 tep si l'on adopte le principe de « l'équivalence à la production » (on calcule la quantité d'énergie fossile qu'il aurait fallu utiliser pour produire la même quantité d'électricité que celle obtenue avec l'uranium) (solution généralement retenue).
- Cela accroît le poids du nucléaire dans le bilan primaire et cela accroît le différentiel entre consommation primaire et consommation finale d'énergie.
- Pour le nucléaire : équivalence à la production.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 11

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

EnR contexte économique

Répartition de la consommation d'énergie primaire en France métropolitaine en 2013

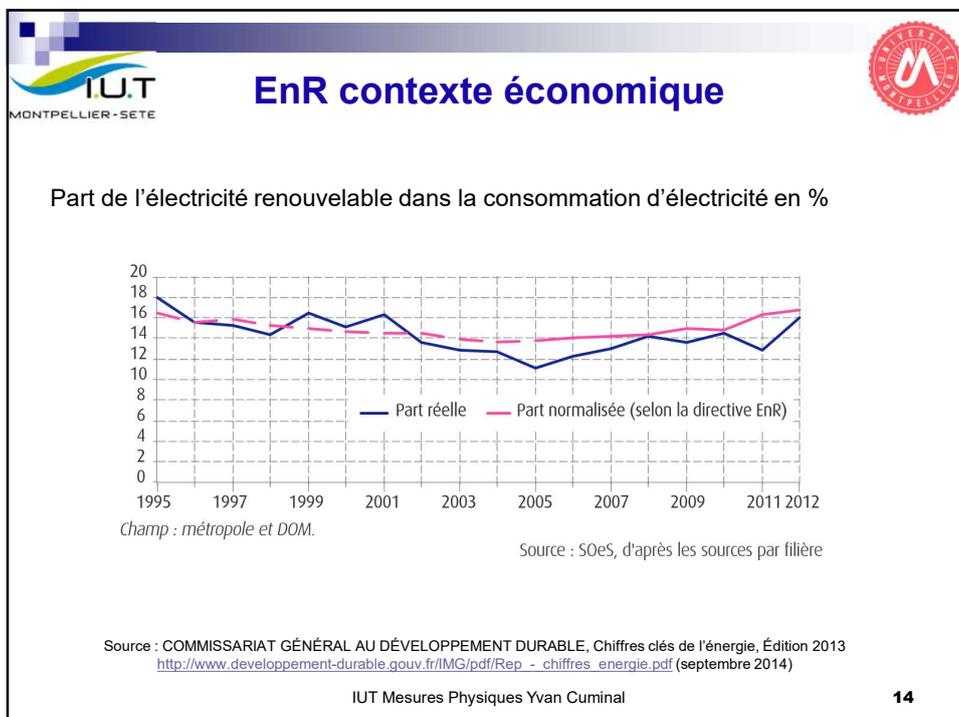
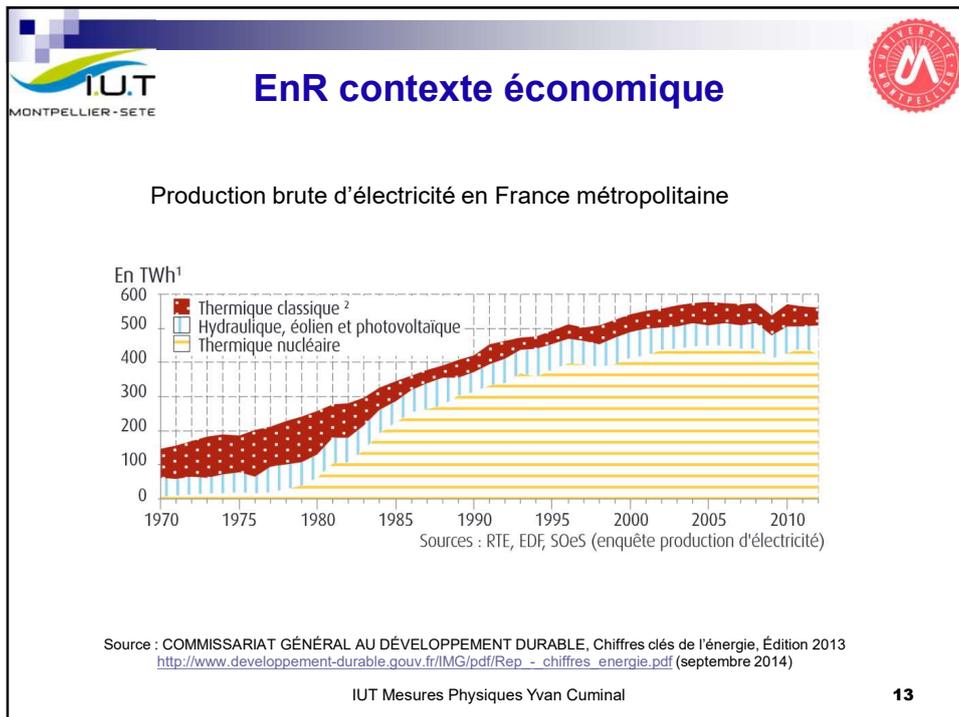
Catégorie	Valeur
Électricité primaire non renouvelable**	41,5
Pétrole	30,3
Gaz	14,8
Charbon	4,2
Déchets urbains non renouvelables****	0,4
EnR*	8,8
Bois-énergie	3,9
Hydraulique renouvelable***	1,9
Biocarburants	1,0
Déchets urbains renouvelables****	0,4
Autres	1,5

Notes :

* EnR : énergies renouvelables
 ** Comprend la production nucléaire, déduction faite du solde exportateur d'électricité (pour simplifier, le solde exportateur est retranché de l'électricité nucléaire) et la production hydraulique par pompage
 *** Hydraulique hors pompage
 **** Voir définitions p. 46

Source : COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE, Chiffres clés de l'énergie, Édition 2013
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_chiffres_energie.pdf (septembre 2014)

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 12






Les EnR dans ce contexte

- **Avantages :**
 - Réduction des émissions de gaz à effet de serre.
 - Diminution de la dépendance énergétique.
 - Anticipation de l'extinction des ressources fossiles.
 - Augmentation de la production énergétique mondiale.
- **Inconvénients:**
 - Utilisation de moyens de production qui pour certains dépendent des aléas météorologiques.
- **Solutions:**
 - Mix Energétique : "lissage" des aléas météorologiques.
 - Stockage à grande échelle.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 15




L'hydroélectrique



CHIFFRES CLÉS

- 25 388 MW**
Puissance installée reliée au réseau fin 2012

- 63 800 GWh**
Production d'électricité fin 2012

- + 3 000 MW**
par rapport à 2006
Objectif à fin 2020

- 10 790 emplois**
dans la filière fin 2012

- 4,06 milliards d'euros**
Chiffre d'affaires dans la filière fin 2012

Source : Baromètre 2013 des Energies renouvelables électroques en France (4eme édition).

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 16




Les atouts de l'hydroélectricité :

- Source d'énergie renouvelable et **nationale**.
- Elle permet un **stockage** de l'énergie et la **modulation** de la production électrique ; apportant ainsi une contribution appréciable à la stabilité du système électrique.
- Enfin, elle n'est **pas productrice de gaz à effet de serre**, ni d'autres gaz polluants.

Source : www.developpement-durable.gouv.fr.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 17




Trois formes de production d'énergie hydroélectrique :

- Les **centrales dites gravitaires** pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus de cours d'eau.
- les **stations de transfert d'énergie par pompage** (S-T-E-P) aussi connues sous l'appellation *centrales hydrauliques à réserve pompée* ou *centrale de pompage turbinage*, pour lesquelles un dispositif artificiel permet de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur.
- les **usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.

Source : Wikipédia (Novembre 2014)

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 18




L'Énergie hydraulique en France :

- L'énergie hydraulique constitue la seconde source de production d'électricité en France.
- Elle représente **12% de la production totale d'électricité**, avec une capacité de production de **70 TWh** en année moyenne.
- La production varie selon les aléas de l'hydraulicité ; en 2006, elle a été de 60,9 TWh.
- Sa contribution en terme de puissance installée est un peu plus importante : elle est de **25,4 GW**, soit **22% de l'ensemble des centrales** contribuant à l'alimentation des réseaux publics d'électricité.

Source : www.developpement-durable.gouv.fr.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 19




Le parc hydraulique français :

- **Les centrales gravitaires :**
 - Les centrales gravitaires mettent à profit l'écoulement de l'eau et un dénivelé. Il existe trois types de centrales gravitaires (ici énumérées par ordre d'importance dans le mix hydraulique) :
 - les **centrales au fil de l'eau** utilisent le débit d'un fleuve et fournissent une énergie de base produite « au fil de l'eau » et injectée immédiatement sur le réseau.
 - les **centrales éclusées** dans les grands fleuves à relativement forte pente comme le Rhin ou le Rhône, des barrages sur le fleuve ou sur un canal parallèle au fleuve.
 - les **centrales-lacs (ou centrales de hautes chutes)** sont également associées à une retenue d'eau créée par un barrage. Leur réservoir important (constante de vidage de plus de 200 heures) permet un stockage saisonnier de l'eau et une modulation de la production d'électricité.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 20

 **I.U.T**
MONTPELLIER - SETE



Le parc hydraulique français :

- **Les centrales de pompage-turbinage (STEP) :**

Utilisent un réservoir amont et un réservoir aval entre lesquels l'eau est pompée vers l'amont en période de basse consommation quand l'électricité est peu chère et turbinée vers l'aval en période de pointe de consommation.

Source : www.developpement-durable.gouv.fr.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 21

 **I.U.T**
MONTPELLIER - SETE



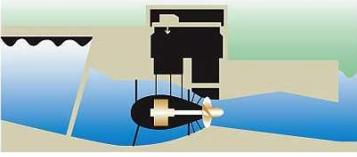
Le parc hydraulique français :

➤ La grande application de l'énergie hydraulique en France est la production d'électricité .

- **Les centrales au fil de l'eau :**



Centrale au fil de l'eau à axe vertical



Centrale au fil de l'eau à axe horizontal

Source : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique>

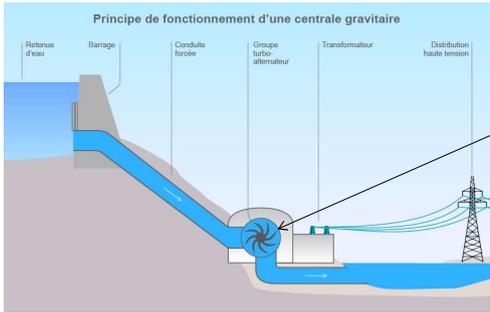
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 22

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Le parc hydraulique français :

➤ La grande application de l'énergie hydraulique en France est la production d'électricité .

- **Les centrales de lacs ou fonctionnant par éclusées :**



Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire

Retenue d'eau, Barrage, Conduite forcée, Groupe turbo-alternateur, Transformateur, Distribution haute tension

Pour les fortes puissances : génératrices synchrones à rotor bobiné.

Source : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique>

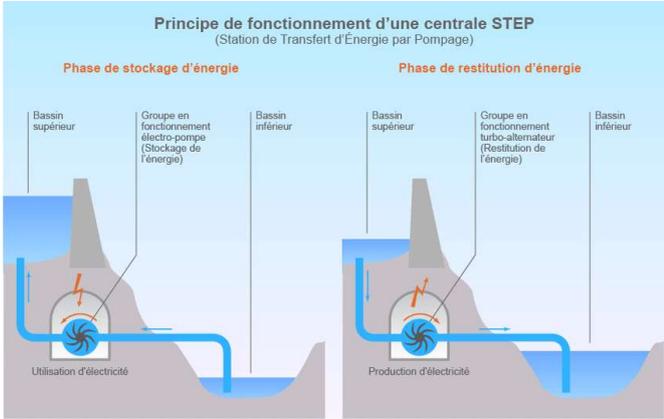
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **23**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Le parc hydraulique français :

➤ La grande application de l'énergie hydraulique en France est la production d'électricité .

- **Les centrales de pompage-turbinage (STEP)**



Principe de fonctionnement d'une centrale STEP
(Station de Transfert d'Énergie par Pompage)

Phase de stockage d'énergie Phase de restitution d'énergie

Bassin supérieur, Groupe en fonctionnement électro-pompe (Stockage de l'énergie), Bassin inférieur, Bassin supérieur, Groupe en fonctionnement turbo-alternateur (Restitution de l'énergie), Bassin inférieur

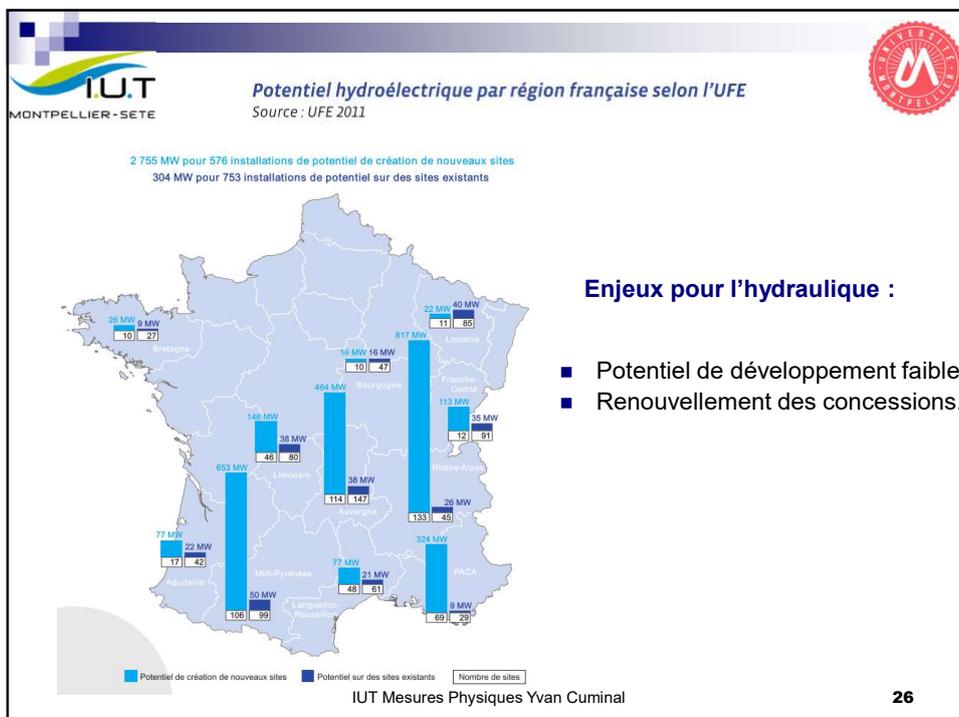
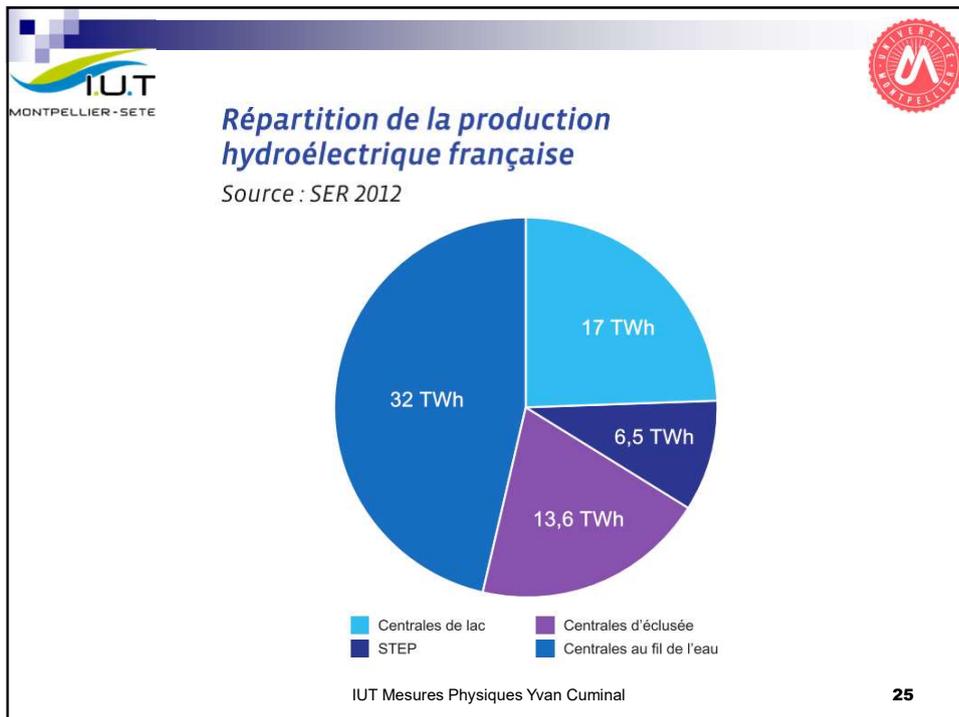
Utilisation d'électricité Production d'électricité

STEP « pures » fonctionnant en circuit fermé avec un apport extérieur d'eau nul ou négligeable.

les STEP « mixtes » qui reçoivent des flux naturels d'eau provenant de l'extérieur

Source : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique>

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **24**






L'Eolien



CHIFFRES CLÉS

Puissance installée à fin septembre 2015

10 013 MW

Production électrique en 2014

17 243 GWh

Objectif PPE 2018

Scénario 1

14 300 MW

Scénario 2

15 000 MW

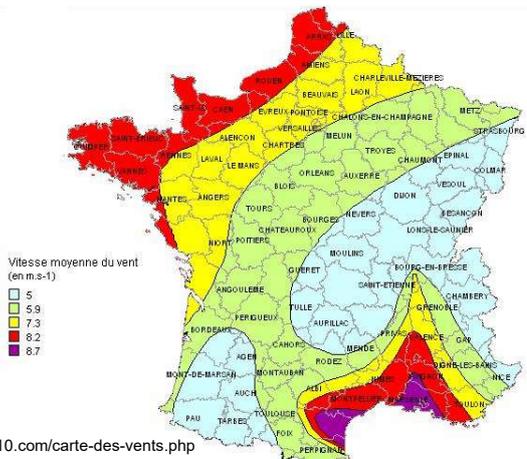
Source : Baromètre 2015 des Energies renouvelables électroques en France (6eme édition).

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 27



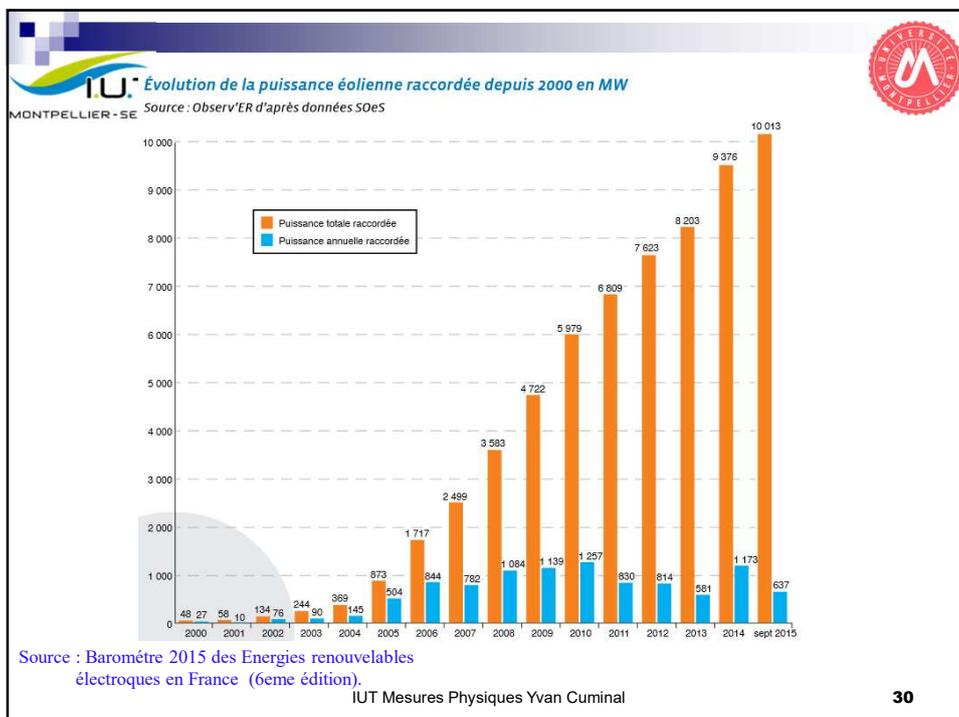
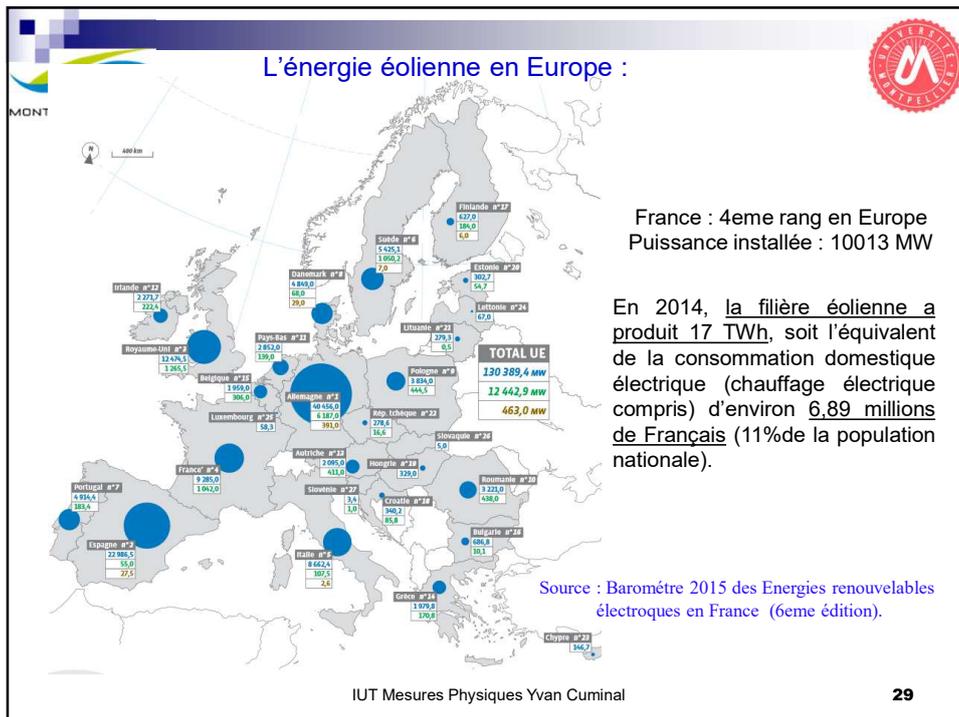

La ressource :

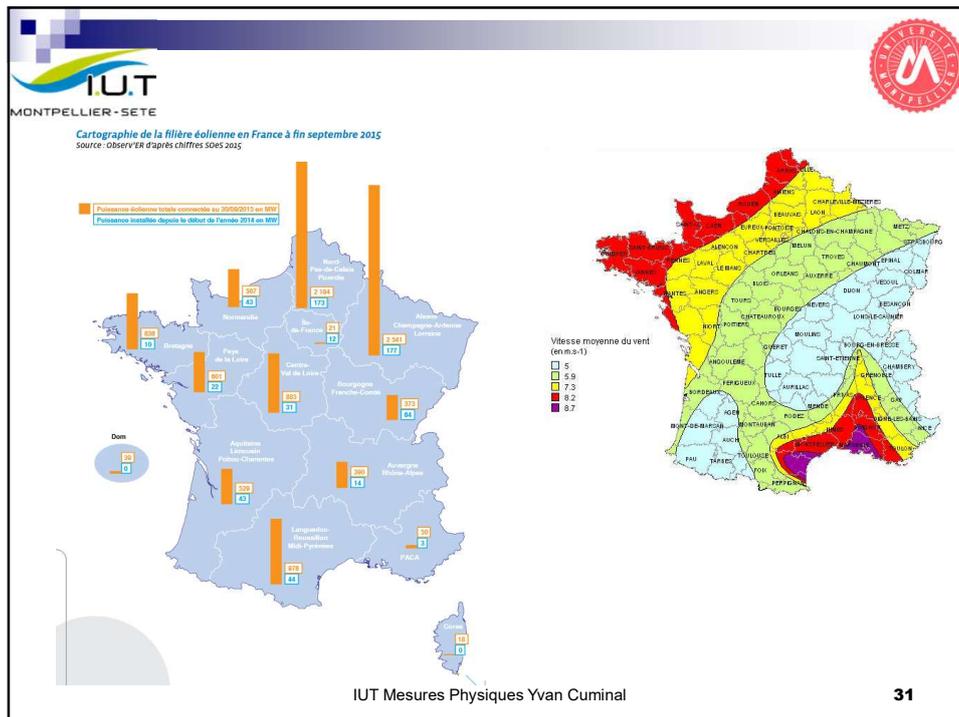
Ressource : L'Energie des vents représente 25 à 30 fois le consommation d'énergie de l'Humanité **Activité humaine : 140 10¹² kWh/an = 11059 Mtep (2004).**



http://www.meteo10.com/carte-des-vents.php

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 28





I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Caractéristiques techniques des éoliennes :

- Une éolienne tourne pour une $V_{ent} > 15\text{km/h}$ (**4m/s**) et $< 90\text{km/h}$ (**25m/s**, inclinaison des pales, blocage du rotor par des freins mécaniques ou aérodynamiques pour des raisons de sécurité) pour une vitesse optimale de 40-50km/h (**12m/s**).
- On distingue notamment **4 types d'installation**:
 - **Mini-micro-éoliennes** (souvent intégrées au bâtiment) : production **~100kW/an** (faible) rotor **~1,75m**, Puissance crête **~70W**.
 - **Éoliennes sur un terrain individuel**: rotor **~10m** de diamètre, mat de **15m (max)**, production **~40MWh/an**, puissance crête de **15kW**. Cahier des charges exigeant: performante dans des écoulements perturbés, acceptée du public, faible nuisance sonore, esthétique...
 - **Fermes éoliennes ou parcs éoliens** (3 à 10 machines distantes de 200m sur 10ha) qui constitue l'essentiel des installations avec une production **~5GWh/an**, puissance crête de **2MW**, nacelle **~72 tonnes** située à **80-100m** de haut comprenant des pales (automatiquement orientables pour s'adapter à la vitesse du vent, stabiliser la vitesse de rotation du rotor et améliorer le rendement du générateur électrique) de **45-70m** de diamètres, pour un poids total **~250 tonnes**. On trouve de plus « lourdes éoliennes » en Allemagne (6MW, rotor de 126m de diamètre, 131m de haut)
 - **Fermes éoliennes en mer** (10km des côtes, 25 à 30m de profondeur).

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

32

I.U.T. MONTPELLIER - SETE **Caractéristiques techniques des éoliennes :**

Exemples d'éoliennes pour installations domestiques :

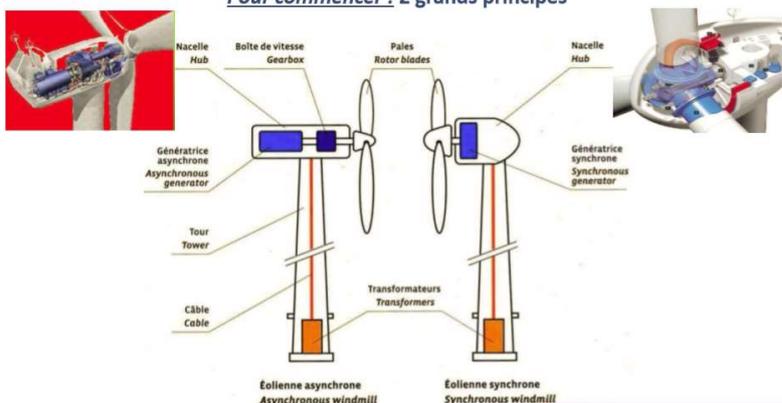
Fortis Passaat	AWP 3.6	Westwind 2,5kW	Proven WT6000	JIMP 20
				
Garantie 2 ans	Garantie 3 ans	Garantie 2 ans	Garantie 2 ans	Garantie 2 ans
Génératrice à aimants permanents	Génératrice à aimants permanents			
1.650 kWh/an à 5 m/s 2.250 kWh/an à 6 m/s 2.950 kWh/an à 7 m/s	2.970 kWh/an à 5 m/s 4.020 kWh/an à 6 m/s 4.980 kWh/an à 7 m/s	3.010 kWh/an à 5 m/s 4.790 kWh/an à 6 m/s 6.500 kWh/an à 7 m/s	7.700 kWh/an à 5 m/s 12.100 kWh/an à 6 m/s 16.500 kWh/an à 7 m/s	24.960 kWh/an à 5 m/s 38.990 kWh/an à 6 m/s 53.040 kWh/an à 7 m/s
Budget fourniture et pose : 11250 €HT	Budget fourniture et pose : 12000 €HT	Budget fourniture et pose : 25000 €HT	Budget fourniture et pose : 35000 €HT	Budget fourniture et pose : 55000 €HT
Injection en 230V	Injection en 230V	Injection en 230V	Injection en 230V	Injection en 380V
3,0 m de diamètre	3,60 m de diamètre	3,5 m de diamètre	5,5 m de diamètre	8,0 m de diamètre

En contexte domestique, les éoliennes mettent principalement en œuvre des générateurs synchrones dont le rotor comporte des aimants permanents.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **33**

I.U.T. MONTPELLIER - SETE **Caractéristiques techniques des éoliennes :**

Pour commencer : 2 grands principes



Pâles à pas fixe avec contrôle Stall

Machine asynchrone

Rotor à vitesse constante

Vitesse rotation élevée

Multiplicateur mécanique

Pâles à pas variable avec contrôle Pitch

Machine synchrone

Rotor à vitesse variable (faible)

Suppression multiplicateur

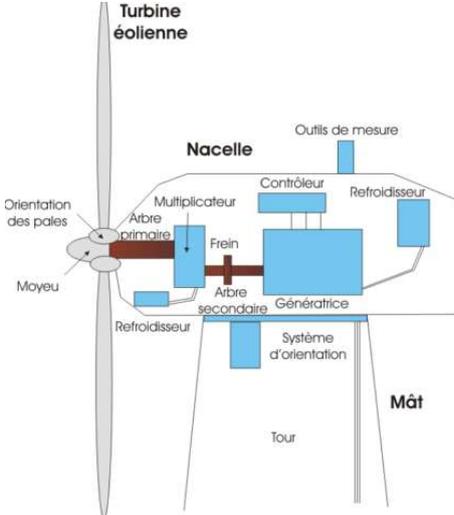
Maintenance et bruit diminués

Rendement mécanique augmenté

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **34**

I.U.T **Caractéristiques techniques des éoliennes :** 

MONTPELLIER - SETE



- Arbre primaire : 20-40 tr / min.
- Multiplicateur : il permet de faire passer la vitesse de rotation de 20-40 tr / min à 1500 tr / min.
- Génératrice : jusqu'à 7,5 MW de puissance.
Machine asynchrone (Multiplieur).
Machine synchrone (sans multiplieur).
- Contrôleur : permet de contrôler le fonctionnement général de l'éolienne.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 35

I.U.T **Caractéristiques techniques des éoliennes :** 

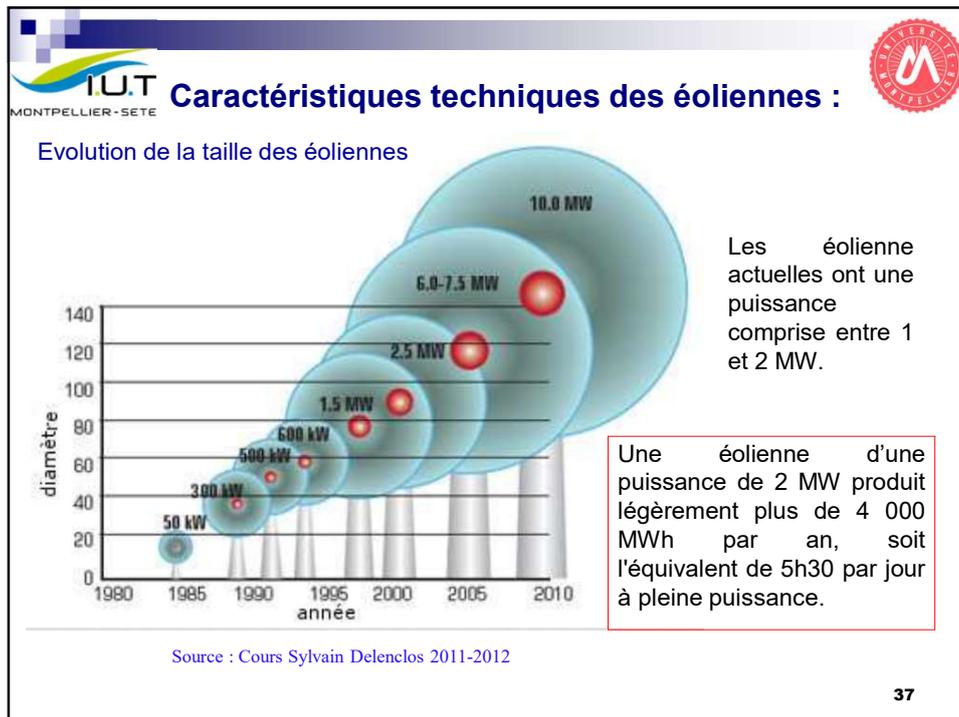
MONTPELLIER - SETE

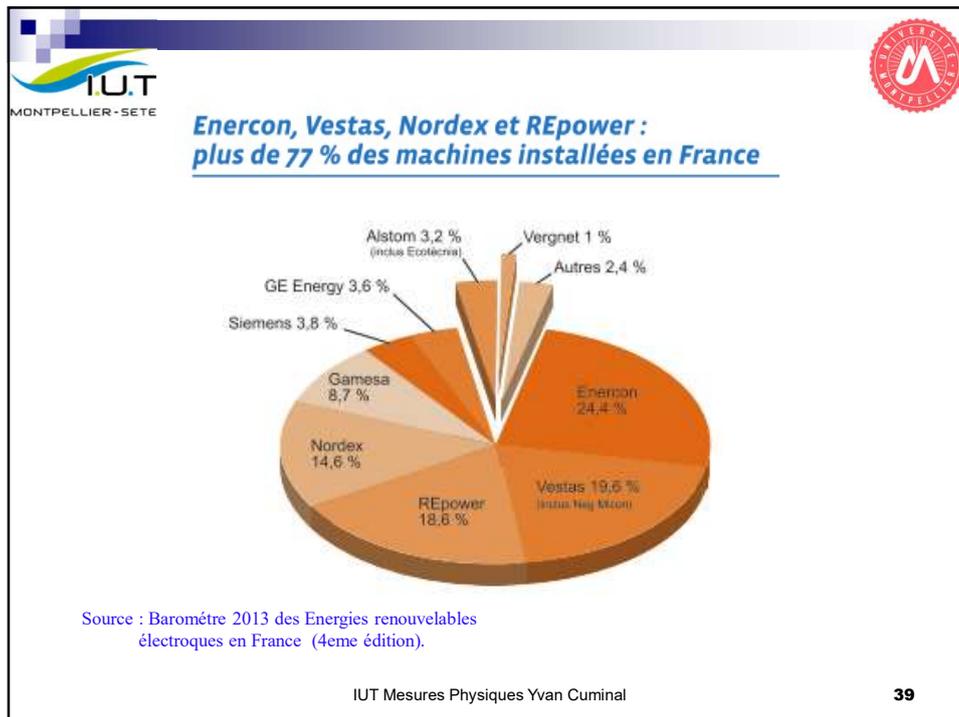
La Machine Asynchrone (MAS) est utilisée dans la plupart des cas car cette génératrice peut supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales.

La génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une vitesse nominale de plusieurs centaines de tours par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor et la génératrice (arbre rapide).

La machine asynchrone est peu utilisée sur site isolé car elle nécessite des batteries de condensateurs pour la fourniture d'énergie réactive.

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 36





I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Enjeux pour l'éolien :

Conflit radar/éolienne :

La cohabitation difficile entre les éoliennes et les radars est un sujet important pour la filière. Que ce soit avec les radars de Météo France ou avec ceux de l'armée, les éoliennes peuvent gêner leur bon fonctionnement en émettant des échos perturbateurs. Ces problèmes ne sont pas récents, mais si les années de cohabitation s'étaient déroulées sans trop de heurts, l'accroissement du parc national a changé quelque peu la situation. Météo France et l'armée française ont pris des positions plus radicales et font désormais jouer leur droit de véto au point de bloquer des volumes très significatifs de projets (entre 4000 et 6000MW selon les deux syndicats de la filière). Un problème qui n'est d'ailleurs absolument pas l'apanage du territoire français puisque Vestas estime qu'en Europe 20GW sont bloqués pour des raisons similaires

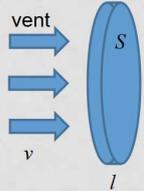
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **40**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

L'énergie Eolienne :

- Energie des vents = 25 à 30 fois la consommation d'énergie de l'humanité
- $E_c = \frac{1}{2} m_{air} v^2$ avec $m_{air} = \rho V$ (V étant le volume d'air)

Surface de section S traversée par un vent de vitesse v pendant un temps t



$V = Sl$ et $l = vt$ d'où $E_c = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3 t$

Puissance du vent : $P = \frac{1}{2} \rho S v^3$

Source : « L'énergie éolienne » Syvain Delenclos 2016-2017

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **41**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

L'énergie Eolienne :

Puissance du vent : $P = \frac{1}{2} \rho S v^3$

- La puissance est **proportionnelle à la densité de l'air** → à vitesse égale, la puissance du vent est plus faible en montagne qu'au niveau de la mer
- La puissance est **proportionnelle à la surface balayée** → construction de rotors de plus en plus grands (pales de 70 m)
- La puissance est **proportionnelle à la vitesse du vent au cube** → importance du choix du lieu d'implantation (études de vent)

Source : « L'énergie éolienne » Syvain Delenclos 2016-2017

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **42**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

L'énergie Eolienne :

Pour rappel : $P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v^3$

La puissance en sortie de génératrice s'écrit :

$$P_{géné} = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p$$

où C_p est le coefficient de performance (0,4 pour les éoliennes actuelles)

<http://fee.asso.fr>

Puissance d'une éolienne en fonction du vent
source : REpower Systems AG
Puissance électrique (LW)

La puissance dépend de la vitesse du vent au cube
Puissance nominale atteinte à 45 km/h (12 m/s) pour l'exemple ci-dessus
Vitesse de démarrage : 4 m/s

Source : « L'énergie éolienne » Syvain Delenclos 2016-2017

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **43**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

L'énergie Eolienne :

Limite de Betz : puissance maximale théorique récupérable

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{vent} = 0,59 P_{vent} = 0,59 \left(\frac{1}{2} \rho S v^3 \right)$$

Pertes :

- Multiplicateur – réducteur
- Génératrice
- Transformateur
- Redresseur
- Batteries
- Lignes

$C_p = 0,4$ à $0,5$ maxi
(dépend de la vitesse du vent)

Source : « L'énergie éolienne » Syvain Delenclos 2016-2017

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **44**



L'énergie Eolienne :



- Une éolienne ne produit pas 24h/24 et 365 jours par an comme pourrait (presque) le faire une centrale classique (nucléaire ou thermique) mais uniquement lorsque le vent est suffisant.
- Généralement, la durée de fonctionnement est de 2 à 3000 heures à puissance nominale (on parle d'heures équivalent pleine puissance)
- Taux de charge $T_c = \frac{\text{Energie annuelle produite}}{8760 \times \text{puissance nominale}}$
- $T_c = 20 \%$ (onshore) à 30% (offshore)

Source : « L'énergie éolienne » Syvain Delenclos 2016-2017

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal
45



L'Energie Photovoltaïque

CHIFFRES CLÉS





4 478 MWc
Puissance connectée au réseau à fin septembre 2013

4 446 GWh
Production d'électricité en 2012

5 400 MWc
Objectif à fin 2020

17 980 emplois
dans la filière en 2012

4,04 milliards d'euros
Chiffre d'affaires dans la filière en 2012

Source : Baromètre 2013 des Energies renouvelables électroques en France (4eme édition).

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal
46

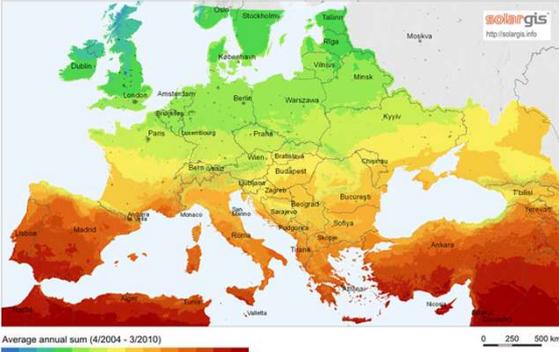
I.U.T
MONTPELLIER - SETE



Irradiation solaire moyenne dans le monde

L'irradiance solaire moyenne hors atmosphère est $1\,367\text{ W/m}^2$.
En moyenne dans le monde chaque m^2 reçoit $1\,700\text{ kWh}$ par an, elle varie de 750 à 2550 kWh/m^2 par an.

Global horizontal irradiation Europe



Average annual sum (4/2004 - 3/2010)
 < 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 > kWh/m²

© 2011 GeoModel Solar s.r.o.

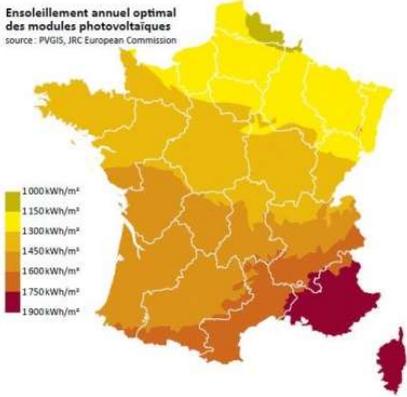
47 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



Irradiation solaire moyenne en France

Ensoleillement annuel optimal des modules photovoltaïques
source : PVGIS, IRC European Commission



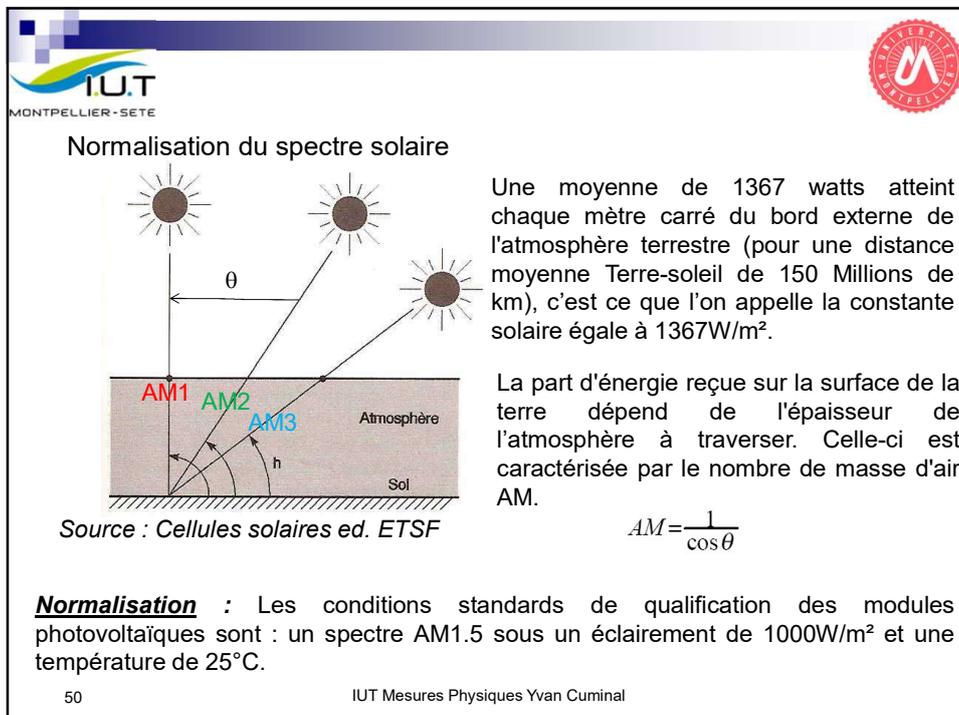
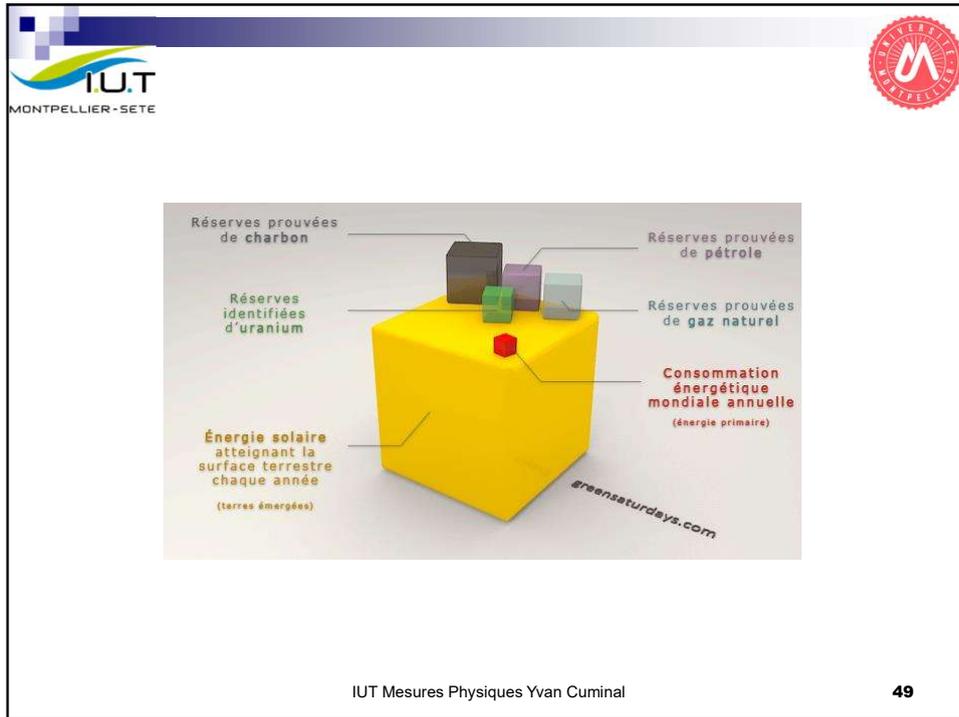
1000 kWh/m²
1150 kWh/m²
1300 kWh/m²
1450 kWh/m²
1600 kWh/m²
1750 kWh/m²
1900 kWh/m²

Source : Syndicat des énergies renouvelables

Carte de France de l'irradiation moyenne:
Énergie reçue sur une surface orientée au sud et inclinée d'un angle égal à la latitude (49° à Paris, 43° à Nice) en $\text{kWh/m}^2/\text{jour}$.

Energie moyenne reçue : $4,5\text{ kWh/m}^2/\text{jour}$.

48 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal





Normalisation du spectre solaire



- AM0 irradiance mesurée hors-atmosphère (masse d'air nulle), et à incidence normale.
- AM1 correspond au spectre solaire mesuré au niveau de la mer et lorsque le soleil est au zénith.
- AM1,5G et AM1,5D (respectivement « Global » et « Direct ») sont les plus couramment utilisés, et correspondent à un angle d'incidence de 48,2° par rapport au zénith. AM1,5G tient compte des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1,5D qui ne tient compte que des radiations directes.

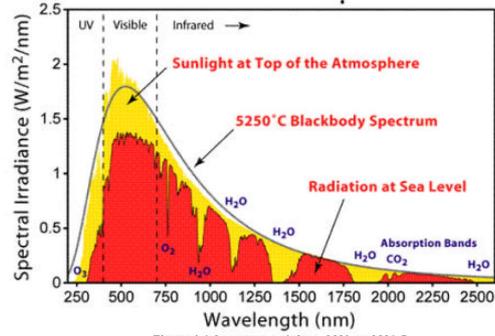


Figure I-1 Spectres solaires AM0 et AM1.5

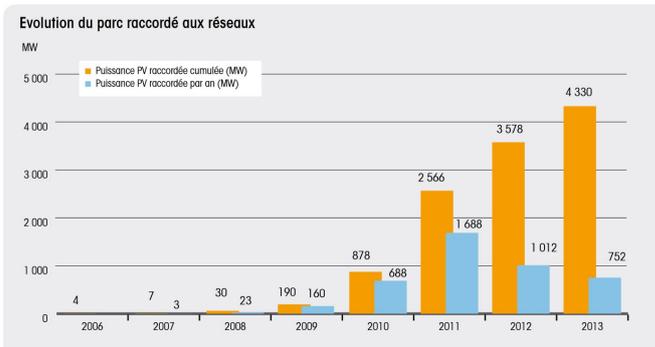
51



Contexte économique

Solaire photovoltaïque, parc français raccordé au réseau par ERDF





Année	Puissance PV raccordée cumulée (MW)	Puissance PV raccordée par an (MW)
2006	4	
2007	7	3
2008	30	23
2009	190	160
2010	878	688
2011	2 566	1 688
2012	3 578	1 012
2013	4 330	752

Source : RTE Panorama des Energies renouvelables 2013

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 52




Contexte économique

Solaire photovoltaïque, parc français raccordé au réseau par ERDF

Le parc PV Français (hors DOM-TOM) : 4 298 MW fin décembre 2013 (3,3% du parc total de production de 128,3 GW).

Production : 166 GWh en janvier 2014 (moyenne 5,34 GWh/jour), soit 0,32 % de la production mensuelle (59,971 TWh) et 0,34 % de la consommation mensuelle (48,437 TWh).

Source : <http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/4pvfr1-14.pdf> (septembre 2014)

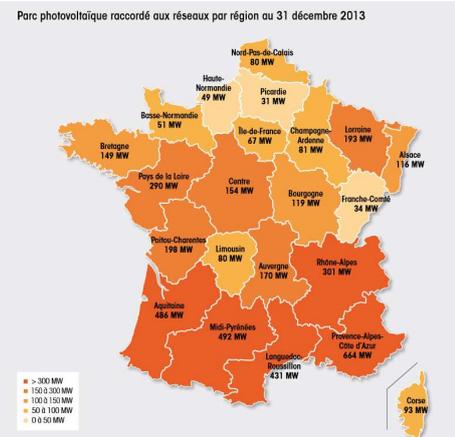
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

53



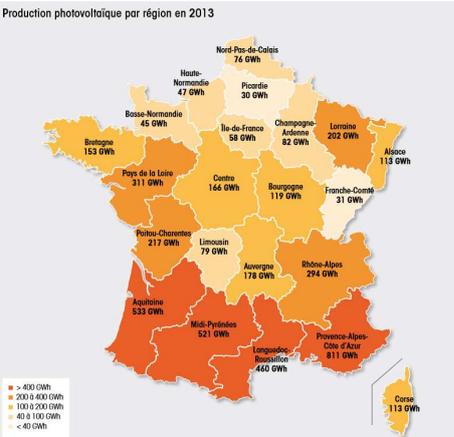

Contexte économique

Parc photovoltaïque raccordé aux réseaux par région au 31 décembre 2013



Région	Capacité (MW)
Nord-Pas-de-Calais	80
Haute-Normandie	49
Picardie	31
Basse-Normandie	51
Île-de-France	67
Champagne-Ardenne	81
Lorraine	193
Alsace	116
Bretagne	149
Pays de la Loire	290
Centre	154
Bourgogne	119
Franche-Comté	34
Poitou-Charentes	198
Limousin	80
Auvergne	170
Rhône-Alpes	201
Aquitaine	484
Midi-Pyrénées	472
Provence-Alpes-Côte d'Azur	644
Langues-Roussillon	431
Corsica	93

Production photovoltaïque par région en 2013



Région	Production (GWh)
Nord-Pas-de-Calais	76
Haute-Normandie	47
Picardie	30
Basse-Normandie	45
Île-de-France	58
Champagne-Ardenne	82
Lorraine	202
Alsace	118
Bretagne	153
Pays de la Loire	311
Centre	166
Bourgogne	119
Franche-Comté	31
Poitou-Charentes	217
Limousin	79
Auvergne	178
Rhône-Alpes	294
Aquitaine	533
Midi-Pyrénées	521
Provence-Alpes-Côte d'Azur	811
Langues-Roussillon	440
Corsica	113

Source : <http://www.photovoltaique.info/IMG/pdf/4pvfr1-14.pdf> (septembre 2014)

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

54

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



Contexte économique

Tableau 7. Comparaison des surcoûts de fabrication en fonction des majorations tarifaires prévues par l'arrêté du 7 janvier 2013

	Cellules ou modules fabriqués dans l'EEE	Cellules et modules fabriqués hors de l'EEE	Au moins 2 étapes réalisées dans l'EEE	Au moins 2 étapes réalisées hors de l'EEE
Nombre de projets	102	40	13	129
Moyenne du coût des modules (€/Wc)	0,579	0,560	0,648	0,566
Surcoût des modules	+3,5 %		+14,6 %	
Investissement (€/Wc)	1,549	1,602	1,680	1,552
Surcoût global	-3,3 %		+8,3 %	
Majoration potentielle	+5 %		+10 %	

Source : Rapport Commission de Régulation de l'Energie (Avril 2014)

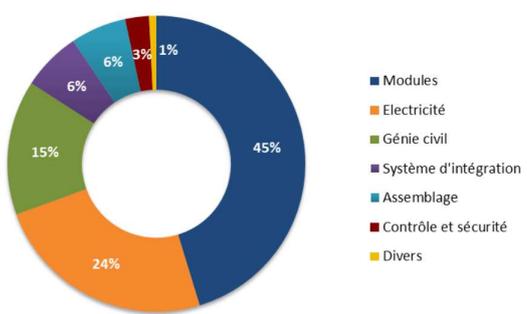
55 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



Contexte économique

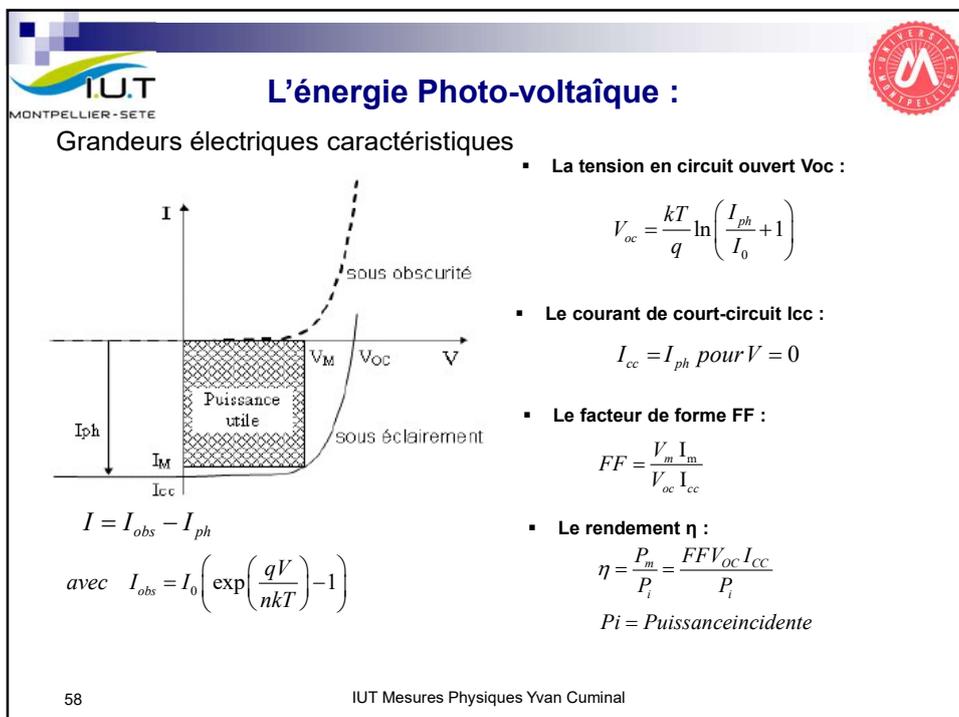
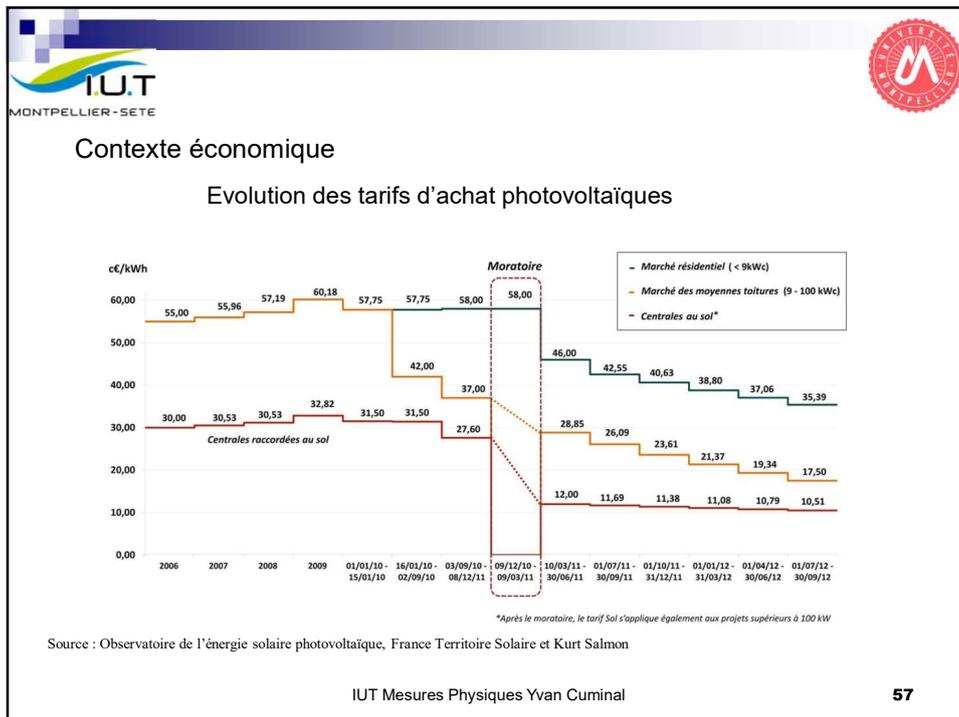
Ventilation moyenne des coûts d'installation d'une centrale Photovoltaïque



Catégorie	Pourcentage
Modules	45%
Electricité	24%
Génie civil	15%
Système d'intégration	6%
Assemblage	3%
Contrôle et sécurité	1%
Divers	1%

Source : Rapport Commission de Régulation de l'Energie (Avril 2014)

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 56



L'énergie Photo-voltaïque :

En série → Addition des tensions

Source : B. Equer, 1993

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

L'énergie Photo-voltaïque :

En parallèle → Addition des courants

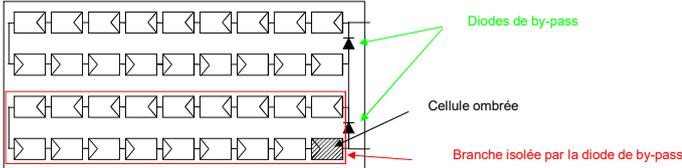
Source : B. Equer, 1993

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

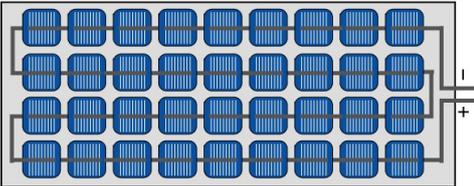


L'énergie Photo-voltaïque :

Un panneau = 36 cellules en série (2 chaînes de 18)



A typical module has 36 cells connected in series



IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal





Filière solaire thermodynamique



Centrale solaire thermodynamique pilote Augustin Fresnel 3. Plateforme THEMIS à Tarassonne (Pyrénées-Occitanie)

CHIFFRES CLÉS

1,01 MW
Puissance installée fin octobre 2013
(uniquement sur des sites pilotes)

540 MW
Objectif à fin 2020

10 %
Objectif de participation à la production
d'énergie électrique solaire
à fin 2020

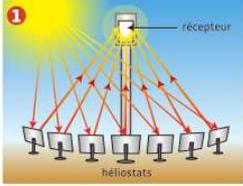
Source : Baromètre 2013 des Energies renouvelables électriques en France (4ème édition).

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 62

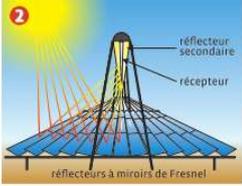
I.U.T
MONTPELLIER - SETE



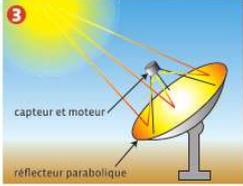
Les quatre technologies principales de production d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique
Source : Observ'ER 2013



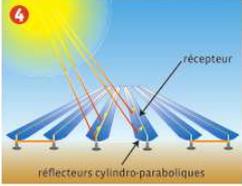
1 récepteur
héliostats



2 récepteur
réflecteur secondaire
réflecteurs à miroirs de Fresnel



3 récepteur
capteur et moteur
réflecteur parabolique



4 récepteur
réflecteurs cylindro-paraboliques

Source : Baromètre 2013 des Energies renouvelables électroques en France (4eme édition).

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **63**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



La biomasse

Les voies de valorisation énergétique

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **64**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

La biomasse solide CHIFFRES CLÉS



La centrale biomasse Hadic assure la production, le transport et la distribution de chaleur dans l'usine de régénération thermique.

Source : Baromètre 2013 des Energies renouvelables électroques en France (4eme édition).

303,7 MW
Puissance installée à fin octobre 2013

2 230 GWh
Production électrique en 2012

2 382 MW
Objectif de puissance biomasse (biomasse solide et déchets urbains renouvelables) installée à fin 2020

6 570 emplois
dans la filière en 2012

480 millions d'euros
Chiffre d'affaires dans la filière en 2012

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal **65**

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Définition générale de la biomasse (écologie)

« *masse totale des êtres vivants subsistant en équilibre sur une surface donnée du sol ou dans un volume d'eau océanique ou douce* »

Définition utilisée

Ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Ces matières organiques qui proviennent des plantes sont une forme de stockage de l'énergie solaire, captée et utilisée par les plantes grâce à la chlorophylle.

66 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T MONTPELLIER - SETE

La production végétale

Grâce à la photosynthèse, les végétaux élaborent leur substance à partir de l'énergie fournie par le soleil

LA PHOTOSYNTHESE

1m² de feuilles élabore en moyenne 1g de matière sèche à l'heure (glucide), soit l'équivalent énergétique de 15 kJ, alors que le soleil fournit 3,6 MJ

→ Rendement : 0,4 % de l'énergie solaire fournie

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T MONTPELLIER - SETE

La ressource

La ressource
La biomasse comprend les produits d'origine végétale non contaminés

Cultures agricoles	Sous-produits agricoles	Bois
<ul style="list-style-type: none"> •cultures oléagineuses (colza, tournesol, palmier à huile, jatropha, coprah) •cultures sucrières (betteraves, canne à sucre, sorgho...) •cultures à amidon (blé, maïs, manioc...) 	<ul style="list-style-type: none"> •paille de blé •balle de riz •tiges de coton •Bagasse 	<ul style="list-style-type: none"> •plaquettes forestières •granulés •sciures •sous-produits de l'industrie du bois

Les algues

Deux grands groupes :

- les macro-algues, fixées au substrat par un thalle
- les micro-algues, ou phytoplancton, flottent en pleine eau

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

68

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

La biomasse et les ENR

Biomasse → ENR, bilan CO₂ nul

Protocole de Kyoto : faire chuter, d'ici à 2010, de 5 % des émissions de gaz à effet de serre enregistrées en 1990

Contrairement aux autres types d'ENR, elle est moins limitée par des contraintes liées à l'environnement

Elle possède également une disponibilité importante

69 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Les procédés de transformation énergétique

```

    graph TD
        subgraph Voies_biochimiques [Voies biochimiques]
            DA[Digestion anaérobie] --> M[Méthane] --> C1[Chaleur] --> MT1[moteur/turbine] --> E1[Electricité]
            F[Fermentation] --> A[Alcool]
            EOV[Extraction d'huile végétale] --> H[Huile]
            A --- EST(Estérification)
            H --- EST
            EST --> BL[Biocarburants liquides]
        end

        subgraph Voies_thermochimiques [Voies thermochimiques]
            P[Pyrolyse] --> CH[Charbon] --> C2[Chaleur] --> MT2[moteur/turbine] --> E2[Electricité]
            P --> HU[Huile]
            HU --- RA(Raffinage) --> BL
            G[Gazéification] --> GAZ[Gaz] --> MT3[moteur/turbine] --> E3[Electricité]
            G --> SYN(Synthèse FT) --> BL
            CO[Combustion] --> C3[Chaleur] --> E4[Electricité]
        end
    
```

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 70

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



Les voies thermochimiques

71 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T
MONTPELLIER - SETE



La combustion

Suite complexe de réactions chimiques exothermiques entre un carburant et un oxydant accompagnée par la production de chaleur



IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 72

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Poêles et inserts domestiques

- Rendement entre 10 et 70%
- Label Flamme verte : rendement > 60% et émissions de CO < 1%

Poêles



inserts



IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

73

I.U.T
MONTPELLIER - SETE

La combustion

Chaufferie à bois du lycée climatique de Font-Romeu (66)



4 170 kW

Chaufferie à bois de l'UM2 Montpellier



2 chaudières bois de 5 MW, complétées par deux chaudières d'appoint à gaz. Elle dessert 200 000 m² de bâtiments des universités Montpellier II et Montpellier III

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

74

I.U.T.
MONTPELLIER - SETE

La pyrolyse

La pyrolyse est la décomposition thermique de matières organiques en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène.

Il s'agit du premier stade de transformation thermique après la déshydratation. Elle permet d'obtenir un solide carboné, une huile et un gaz. Elle débute à un niveau de température relativement bas (à partir de 200 °C) et se poursuit jusqu'à 1 000 °C environ. Selon la température, la proportion des trois composés résultants est différente.

Flux de chaleur
(Sans oxygène)

SOLIDE → RAFFINAGE → CHARBON DE BOIS, CHARBON ACTIF

LIQUIDE → COMBUSTION MOTEUR CHAUDIERE → CARBURANT, ELECTRICITE & CHALEUR

GAZ → EXTRACTION → PRODUITS CHIMIQUES

75 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T.
MONTPELLIER - SETE

La pyrolyse/carbonisation

La carbonisation ou pyrolyse lente en l'absence d'oxygène génère du charbon de bois et différents produits chimiques et combustibles gazeux.

Connue et pratiquée depuis des temps immémoriaux, elle a couvert de larges perspectives à l'humanité : réduction des métaux dès les premiers âges, principale source de production de produits chimiques....

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

76




La gazéification

La gazéification est un processus à la frontière entre la pyrolyse et la combustion. Celui-ci permet de convertir des matières carbonées ou organiques en un gaz de synthèse combustible (souvent appelé « syngas »), composé majoritairement de monoxyde de carbone (CO) et de dihydrogène (H₂).

La gazéification permet d'obtenir un **gaz porteur d'énergie thermique** (gaz chaud) et d'**énergie chimique** (gaz combustible) toutes les deux exploitables pour

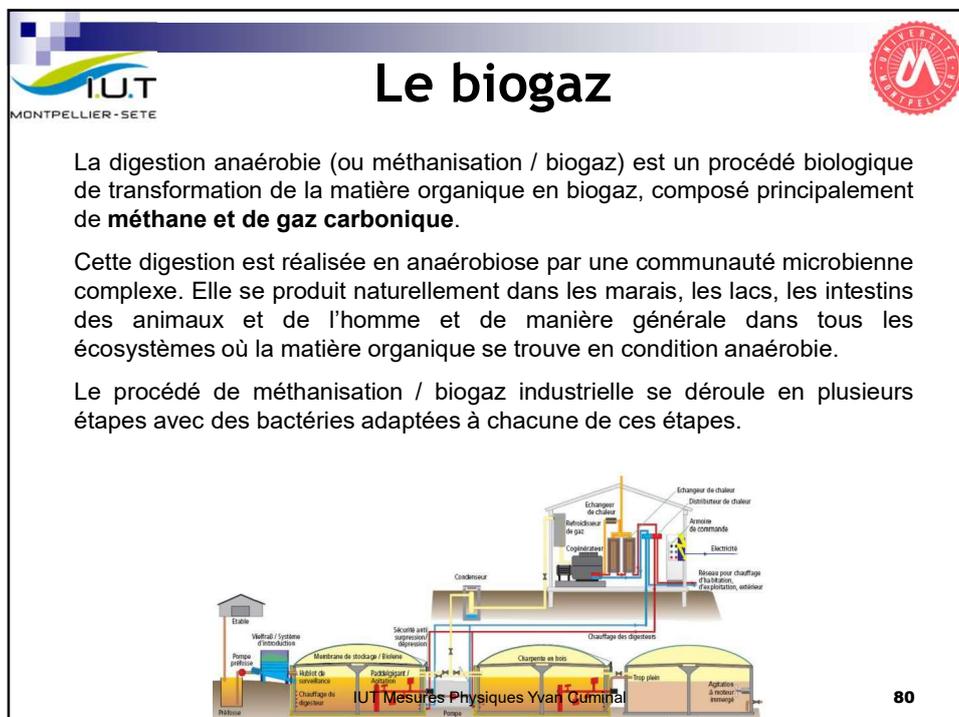
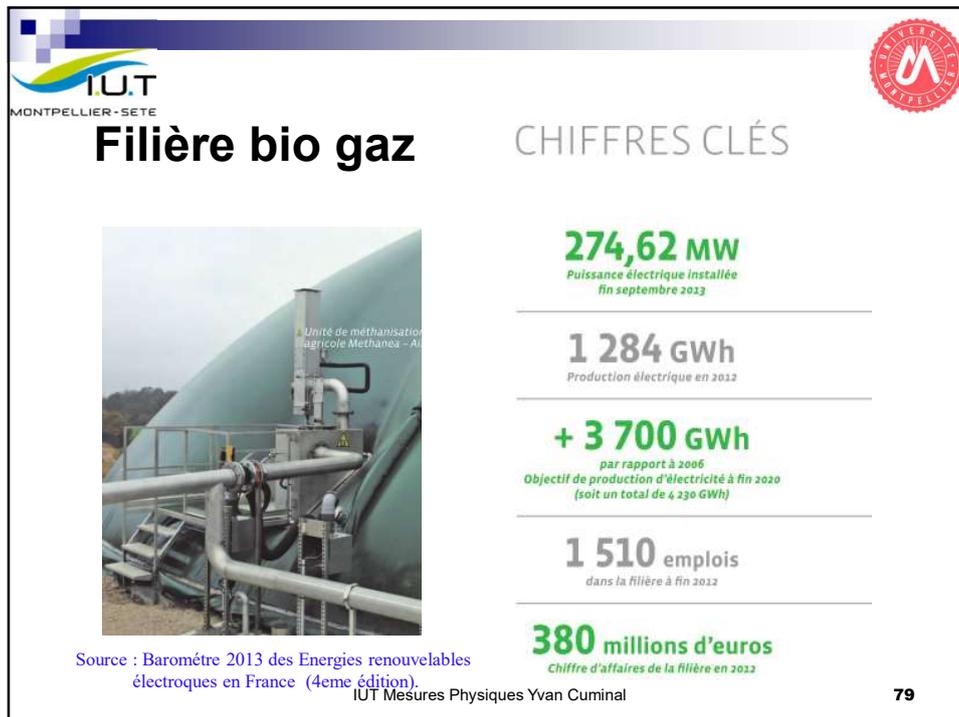
- **cogénération** : chaleur + électricité (turbine à gaz).
- **biocarburants** : syngas H₂ /CO → synthèse Fischer-Tropsch.
- **pile à combustible** : syngas riche en H₂ → électricité.

77 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal




Les voies biochimiques

78 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal





Le biogaz

Unité Amétyst – Montpellier Agglomération



Unité de méthanisation, la plus importante de France, construite dans le quartier Garosud, à Montpellier. Cette unité permettra de traiter les ordures ménagères de près de 500 000 habitants.

Cet équipement a été conçu pour recevoir deux types de déchets, sur des lignes de traitement distinctes.

Sa capacité de traitement est de 170 000 tonnes de déchets résiduels et 33 000 tonnes de biodéchets.



81
IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal



Les agrocarburants / biocarburants



Un biocarburant ou agrocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques renouvelables et non-fossiles, pouvant se substituer aux carburants pétroliers pour faire rouler, notamment, des véhicules à carburants. La production de ces agrocarburants peut être effectuée à partir d'un ensemble de techniques variées.

Agrocarburants de 1^{ère} génération

Fabriqués à partir des plantes, suivant deux filières industrielles : la **filière biodiesel**, qui produit du carburant liquide (biodiesel, diester) à partir de graines d'oléagineux (colza, tournesol...) ; et la **filière éthanol** qui produit de l'alcool à partir du blé, du maïs ou de la betterave.

Agrocarburants de 2^e génération

Elaborés grâce à la totalité des plantes, y compris les résidus végétaux, forestiers.

Agrocarburants de 3^e génération

Fabriqués à partir d'algues (Algocarburant).

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal
82

Les biocarburants : une nouveauté ?

À la naissance de l'industrie automobile, le pétrole et ses dérivés n'était pas encore très utilisés ; c'est donc très naturellement que les motoristes se tournaient, entre autres, vers ce qu'on n'appelait pas encore des biocarburants :

- Nikolaus Otto, inventeur du moteur à explosion, avait conçu celui-ci pour fonctionner avec de l'éthanol (Cf Ford T).
- Rudolf Diesel, inventeur du moteur éponyme, faisait tourner ses machines à l'huile d'arachide (prévu aussi pour graisses végétales ou animales).



83 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

Les biocarburants : une nouveauté ?

Rudolph Diesel (1912)

« l'utilisation d'huiles végétales dans les moteurs Diesel peut sembler insignifiante actuellement. Mais ces huiles peuvent devenir avec le temps aussi importantes que le sont aujourd'hui les produits pétroliers ou issus du charbon »

84 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T MONTPELLIER

Les biocarburants

LES FILIÈRES CLASSIQUES

La filière biodiesel

Huile de colza
Huile de tournesol

Transestérification

Esters d'huiles végétales ou biodiesel

Mélange au gazole

La filière Ethanol

Betterave
Canne à sucre

Blé, maïs, pomme de terre

amidon

sucres

Fermentation

Ethanol

Mélange à l'essence

85 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

I.U.T MONTPELLIER - SE

Les biocarburants

Procédé IFP / ESTERFISP-H



EMHV issus de colza : Unité de Site démarré en 2006 - 200 000 t/an

86 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal



Conclusions

Très nombreux procédés de valorisation énergétique de la biomasse

Choix du procédé selon la ressource disponible

Existence de ressources importantes (déchets) non encore exploitées

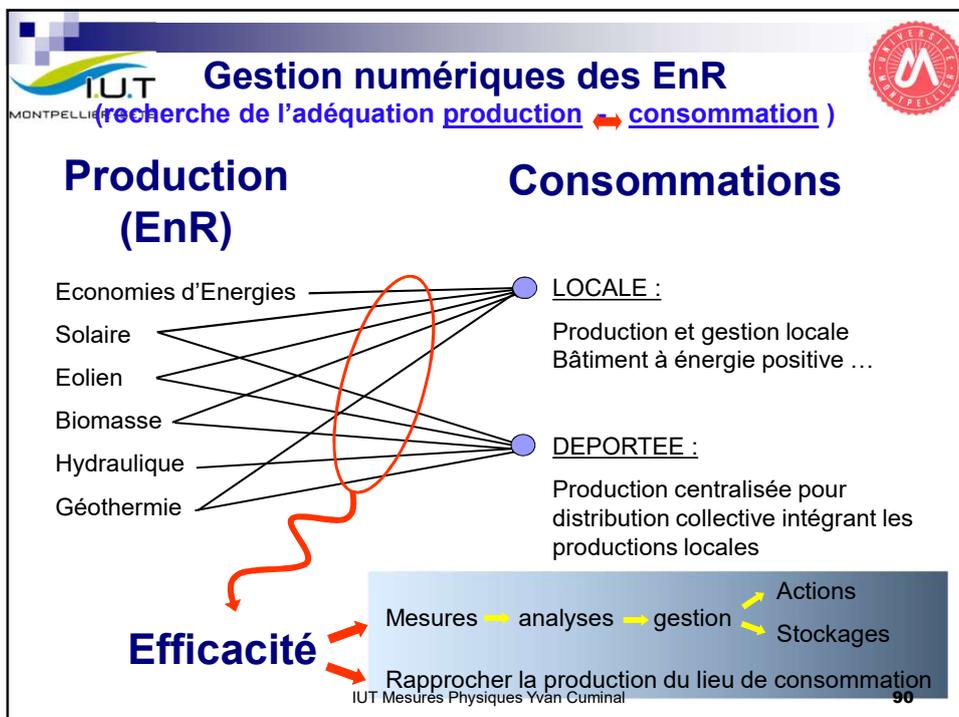
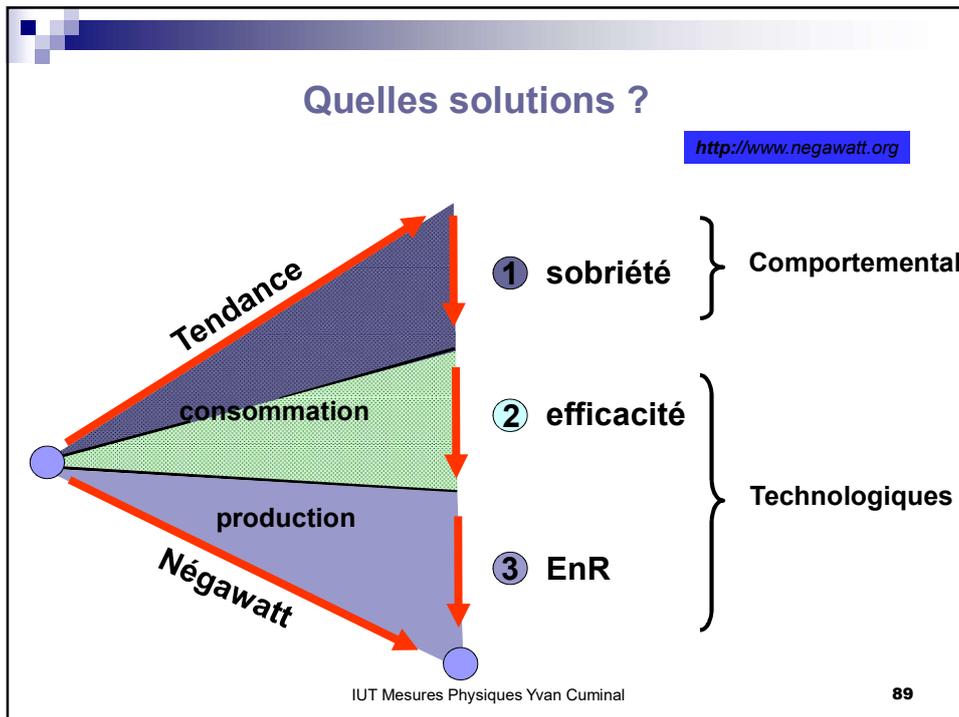
Mais problématiques écologiques, économiques, sociales à étudier et à résoudre...

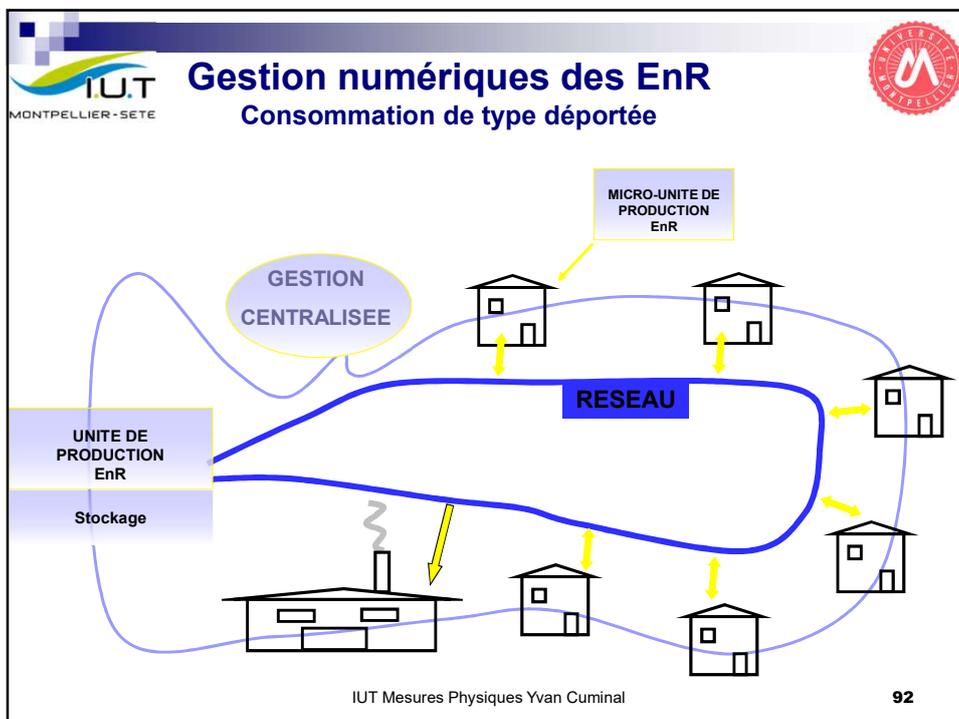
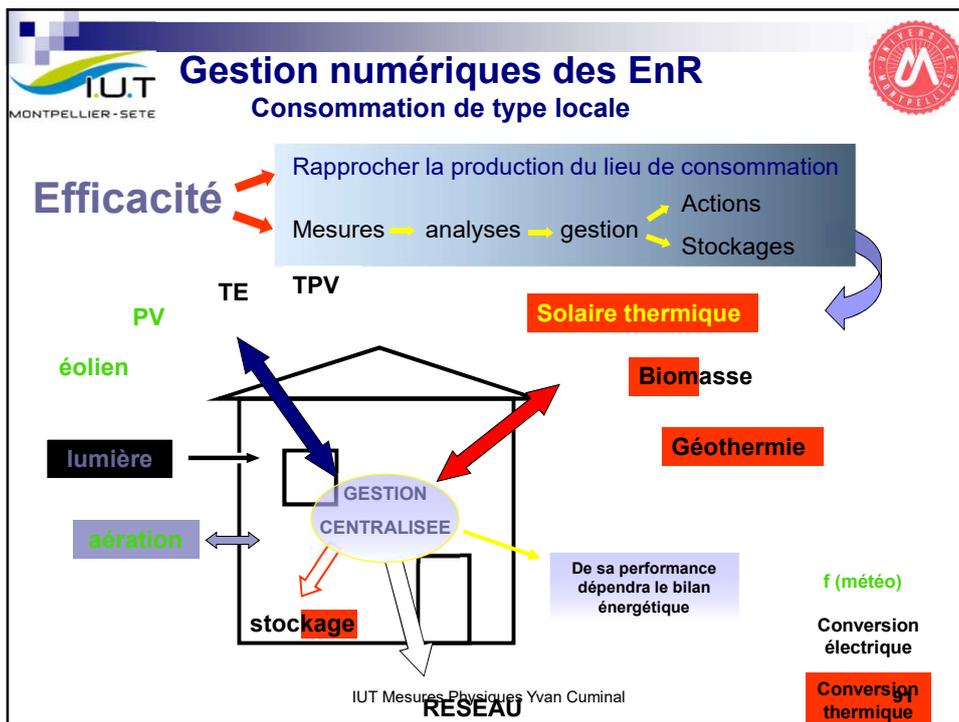
87 IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

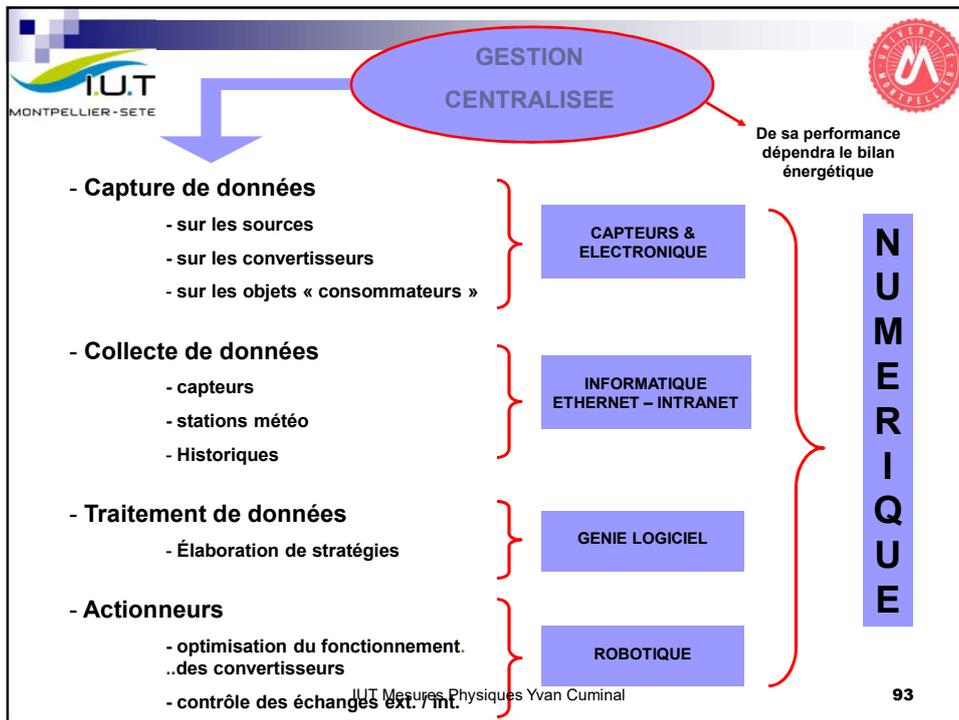


Gestion des EnR

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal 88







I.U.T
MONTPELLIER - SETE

Fin

IUT Mesures Physiques Yvan Cuminal

94