

QUELLES SOURCES D'ÉNERGIE POUR RÉPONDRE AUX BESOINS FUTURS ?

- 1^{ère} partie Contexte énergétique mondial actuel
 - ▣ Répartition de la consommation d'énergie dans le monde
 - ▣ Ressources en combustibles fossiles
 - ▣ La contrainte climatique
 - ▣ Evolution de la demande énergétique

- 2^{ème} partie Tour d'horizon des sources
 - ▣ Leurs usages
 - ▣ Les principales caractéristiques
 - ▣ Leur potentiel

- 3^{ème} partie Construction d'un mix énergétique en 2050
 - ▣ Choix des hypothèses retenues
 - ▣ Les fondements de notre démarche
 - ▣ Les principales étapes
 - ▣ Les résultats

2006

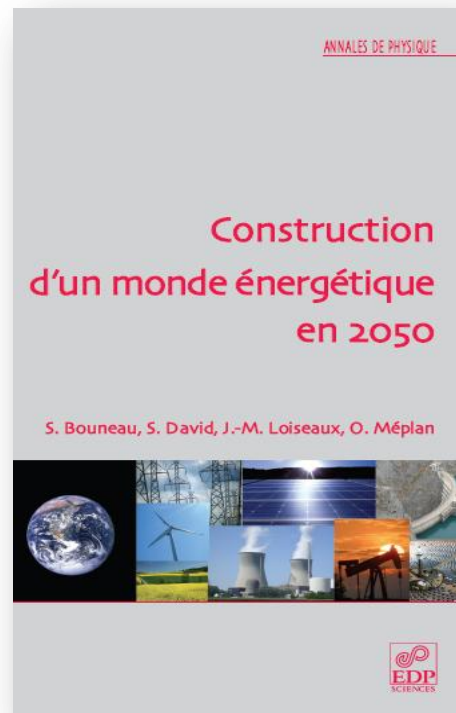
Mise en place d'un cours
« énergie &
environnement »

Université Paris Sud 11
25 h, suivie par ~ 70 étudiants/an
du L1 au M2

Livre (en cours de publication)
« Le défi énergétique et les
processus physiques associés »
(400pages)

2007 : Travail de réflexion sur la
description d'un monde
énergétique en 2050

Programme Interdisciplinaire Energie CNRS
groupe « nucléaire du futur »



2009 : Création d'une licence
pro en apprentissage

Universités Paris Sud 11 (Orsay) et
Paris7 – Diderot (Paris)

Techniques Physiques des Energies

- L'énergie est un enjeu technologique majeur des années à venir
- Des perspectives d'embauche importantes (petites, moyennes et grandes entreprises)
- Formation Bac +3 de techniciens supérieurs / assistants ingénieur
- Alternance université / entreprise
- Profil transversal adapté à tout type d'installation énergétique

Partenaires de la formation



une difficulté majeure : comment comptabiliser l'énergie ?

énergie disponible, énergie primaire, énergie utile ? ...

4

Sources primaires : fossiles et uranium
= énergies de stock

pétrole



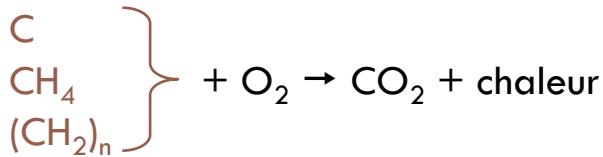
gaz



charbon



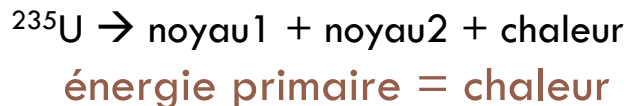
énergie stockée sous forme chimique et libérée sous forme de chaleur par la combustion



Minerai d'uranium



énergie stockée sous forme d'énergie de liaison entre nucléons du noyau et libérée par la réaction de fission



Sources primaires : solaire, biomasse, éolien, hydro = énergies de flux

convention

énergie primaire = énergie totale récupérée par les différentes installations

hydraulique



éolien



énergie primaire = électricité



solaire PV → EP= électricité

solaire therm. → EP= chaleur

solaire conc. → EP= chaleur et/ou élec.

bois



EP = chaleur

colza



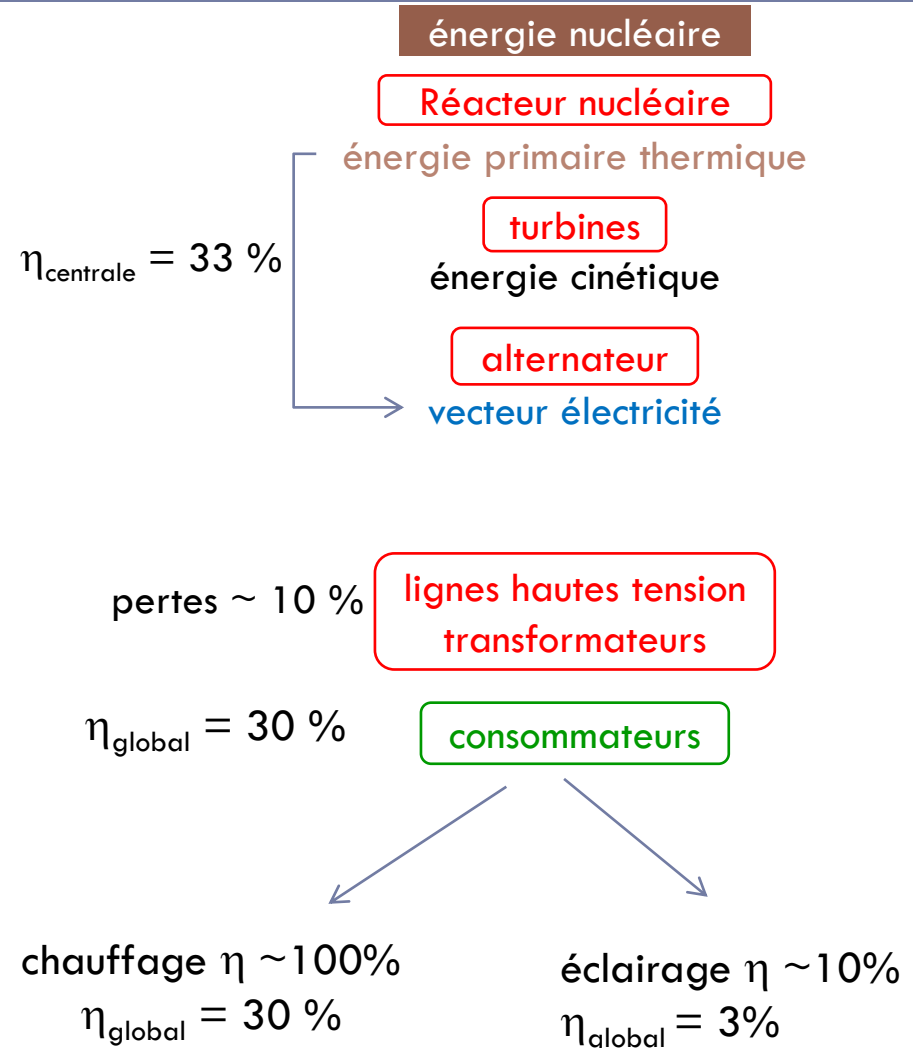
EP = chaleur (biocarburant)

□ Rendement

- associé aux transformations de l'énergie initialement disponible (chimique, lumineuse, nucléaire, ...) en énergie utile pour nos besoins (mécanique, thermique, lumineuse, ...)
- quantifie l'énergie récupérée sous la forme voulue à partir de l'énergie disponible :

$$\eta = \frac{E_{\text{utile}}}{E_{\text{disponible}}}$$

Installation	η
centrale à charbon ou au gaz	30 – 50 %
chaudière individuelle au gaz	60 – 90 %
moteurs	25 – 35 %
piles/batteries	80 %



□ énergie – puissance – ordres de grandeur

□ Physique

[Energie] = Joule (J) ; [Puissance] = Watt (W) = J/s

- processus élémentaire chimique $\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$: combustion $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{eV}$
- processus élémentaire nucléaire $\text{MeV} = 1 \text{ million d'eV}$: fission $^{235}\text{U} \rightarrow \text{noyau 1} + \text{noyau 2} + 200 \text{ MeV}$
- puissance solaire maximale reçue à nos latitudes $\sim 1000 \text{ W/m}^2 \Rightarrow$ en moyenne de 150 à 200 W/m^2
- puissance thermique dissipée par un individu $\sim 120 \text{ W}$

□ Electricité

énergie consommée en Wh = puissance consommée en W x nombre d'heures

[Energie] = kWh = $1000 * 3600 = 3,6 \text{ MJ}$

- puissance électrique d'un réfrigérateur en fonctionnement $\sim 100 \text{ W} \Rightarrow \sim 150 \text{ kWh/an}$ (4h de fonctionnement/jour)
- consommation électrique moyenne résidentielle (hors chauffage) $\sim 3 \text{ kWh}_{\text{élec}}/\text{pers.}/\text{jour}$
- besoins en chauffage : 70 à 300 $\text{kWh}_{\text{thermique}}/\text{m}^2/\text{an}$ selon isolation et climat
- capacité de stockage électrique d'une batterie au plomb $\sim 50 \text{ Wh/kg}$

□ Economistes

[Energie] = TeP Tonne Equivalent Pétrole = 42 GJ

C'est l'unité la plus utilisée pour compter l'énergie !

une voiture qui parcourt 20 000 km/an consomme environ 1 tep/an

□ électricité et tep

▣ convention avant 2002

Pétrole qu'il aurait fallu consommer dans une centrale thermique de référence de rendement $\eta_{\text{therm}} = 38,7\%$ pour produire une certaine quantité d'électricité :

Pour produire 1 MWh_{élec}, il faut 2,58 MWh d'énergie thermique

Avec 1 tep = 42 GJ = 11,66 MWh_{therm}

⇒ 1 MWh_{élec} = 0,22 tep_{<2002} : indépendant de la source primaire

▣ convention depuis 2002 ...

C'est l'énergie primaire qui est considérée et convertie en unité « 1 tep=42 GJ » :

1 MWh_{therm} = 0,086 tep

Des valeurs de rendement sont attribuées aux différentes installations qui produisent l'électricité selon qu'elles utilisent ou non de la chaleur : **la conversion dépend donc de la source !**

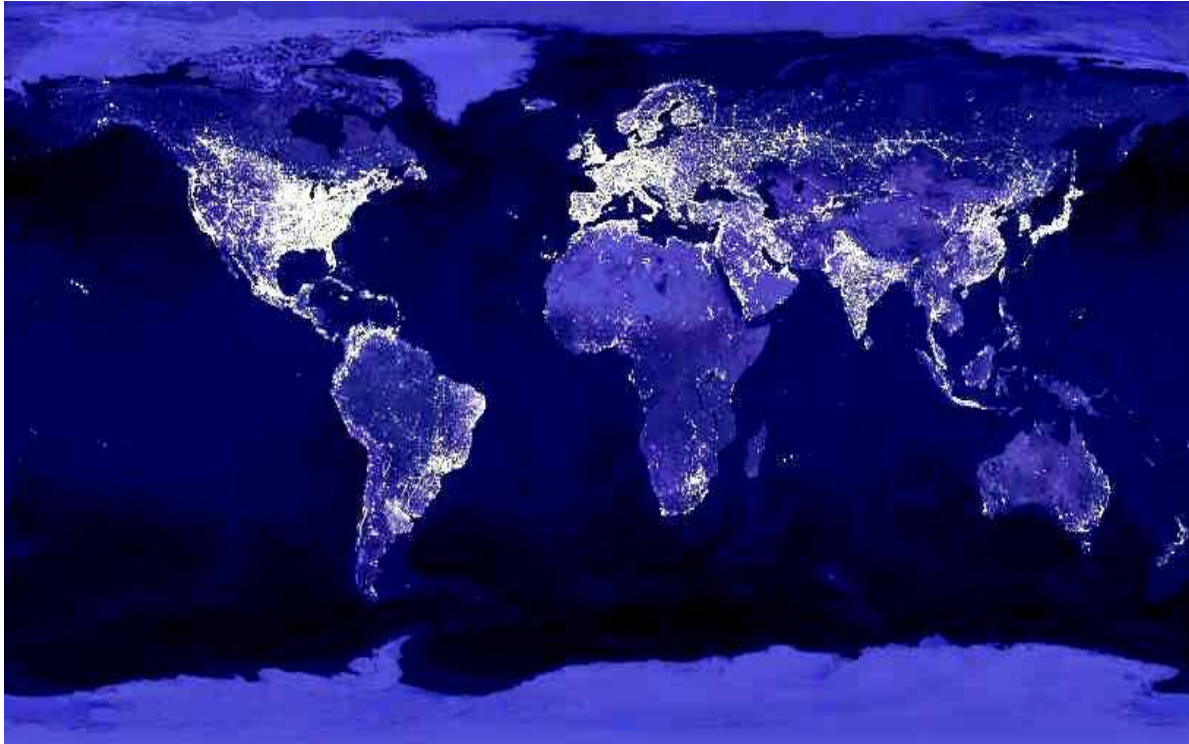
$$\eta = \frac{E_{\text{élec}} = 1 \text{ MWh}_{\text{élec}}}{E_{\text{primaire}}}$$

Source/Installation	η	E_{primaire} (MWh)	$E_{\text{élec}}$ (tep _{> 2002})	$E_{\text{élec}}$ (tep _{< 2002})
nucléaire	33 %	3	0,26	0,22
gaz - charbon	30 – 50 %	3,33 - 2	0,29 – 0,17	0,22
géothermie	10 %	10	0,86	0,22
éolien, hydro., PV	100 %	1	0,086	0,22

1^{ère} partie

Contexte énergétique mondial

8



Aujourd'hui dans le Monde (2008)

Consommation totale	~ 12 milliards de tep /an
Population	~ 7 milliards
Consommation / hab	~ 1,7 tep/an (~ 2300 W)

Répartition de la consommation énergétique par zones géographiques

9

Des inégalités de consommation d'énergie considérables dans le Monde

Grandes régions géographiques	Conso. totale (Gtep)	Population (Mhab.)	Conso. tep/hab.
Amérique du nord	2,7	331	8,1
Pacifique	0,8	200	4,2
Ex-URSS	1,1	278	4,1
Europe	2,1	598	3,6
Moyen-Orient	0,5	195	2,6
Amérique Latine	0,7	561	1,2
Asie	2,8	3 513	0,8
Afrique	0,5	906	0,5
total	11,2	6582	1,7

■ pays riches ~ 6,7 Gtep/an
~ 4,8 tep/hab/an
20 % de la population mondiale
60 % de la consommation mondiale

■ pays émergents ~ 4 Gtep/an
~ 1 tep/hab/an
50 % de la population mondiale
35 % de la consommation mondiale

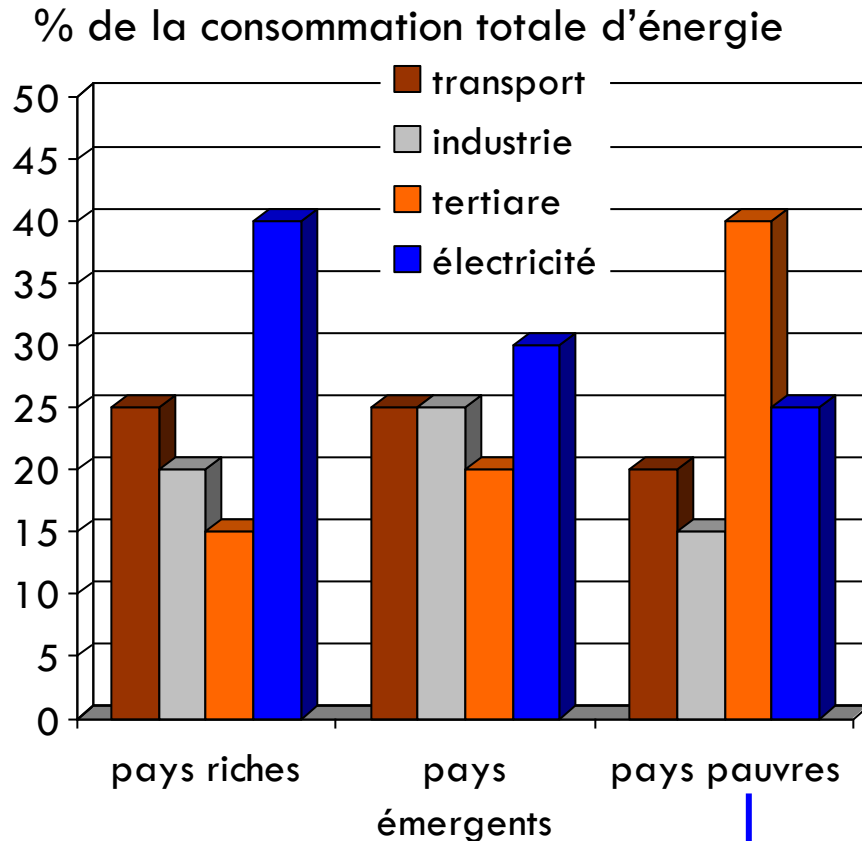
■ pays pauvres ~ 0,5 Gtep/an
~ 0,5 tep/hab/an
14 % de la population mondiale
5 % de la consommation mondiale

Source	Gtep/an	%
Fossiles	10	81
Pétrole / gaz / charbon	3,9 / 2,9 / 3,2	31 / 24 / 26
Biomasse Traditionnelle	0,6 – 1,2	7,9
Hydraulique	0,7	6,2
Nucléaire	0,6	5,3
Nouveaux renouvelables (solaire, éolien, biomasse)	0,03	0,3
Total	12,3	

Production mondiale d'énergie essentiellement basée sur les combustibles fossiles

Besoins en énergie : répartition – sources - ordres de grandeur

11



■ Transport ~ 2,8 Gtep/an

→ pétrole (~ 95 %)

→ biocarburant

■ Industrie ~ 2,3 Gtep/an

chaleur à haute température

→ charbon et gaz (~ 100 %)

■ Tertiaire ~ 2 Gtep/an

chaleur à basse température

→ fuel et gaz (~ 70 %)

→ biomasse

■ Electricité ~ 4 Gtep/an

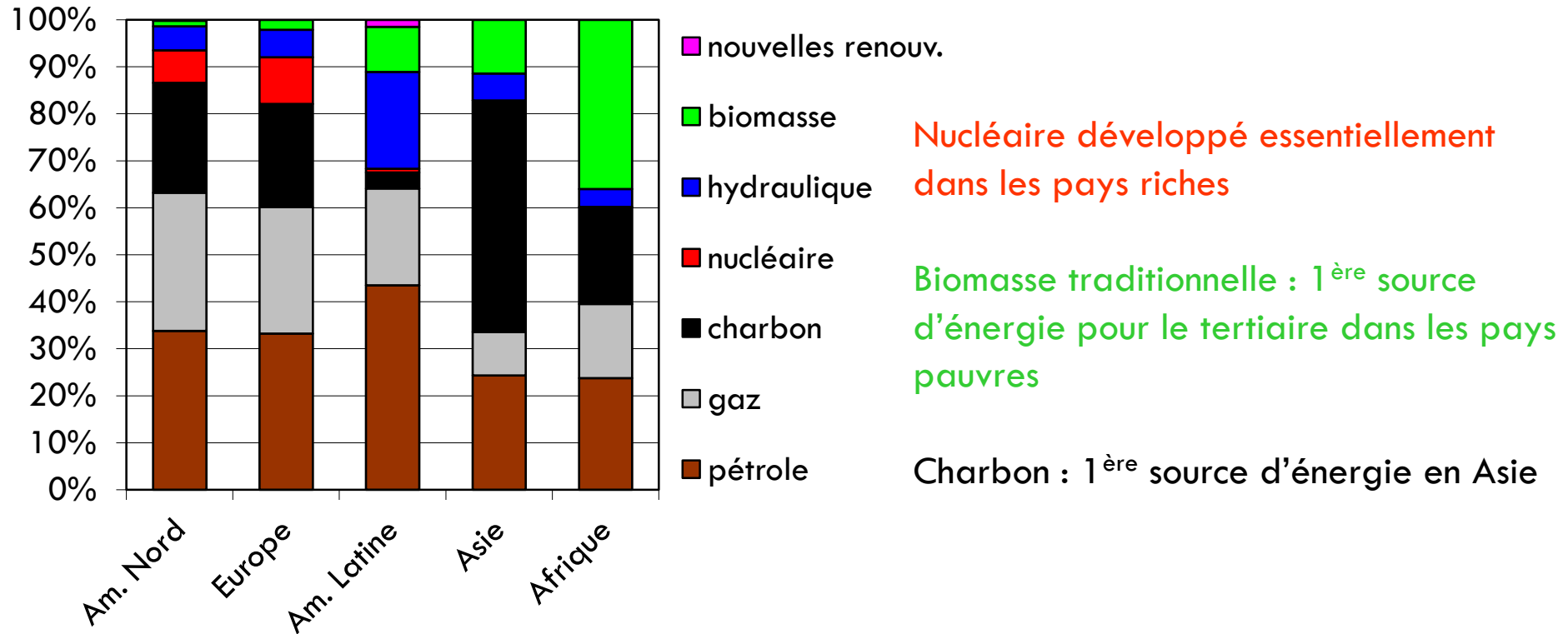
• réseaux électriques peu développés

• 1,5 milliards d'individus n'ont toujours pas accès à l'électricité

La consommation d'électricité augmente toujours plus vite que la consommation totale d'énergie.

Mix énergétique par grande zone géographique

12



Pays riches : part des combustibles fossiles > 80 %

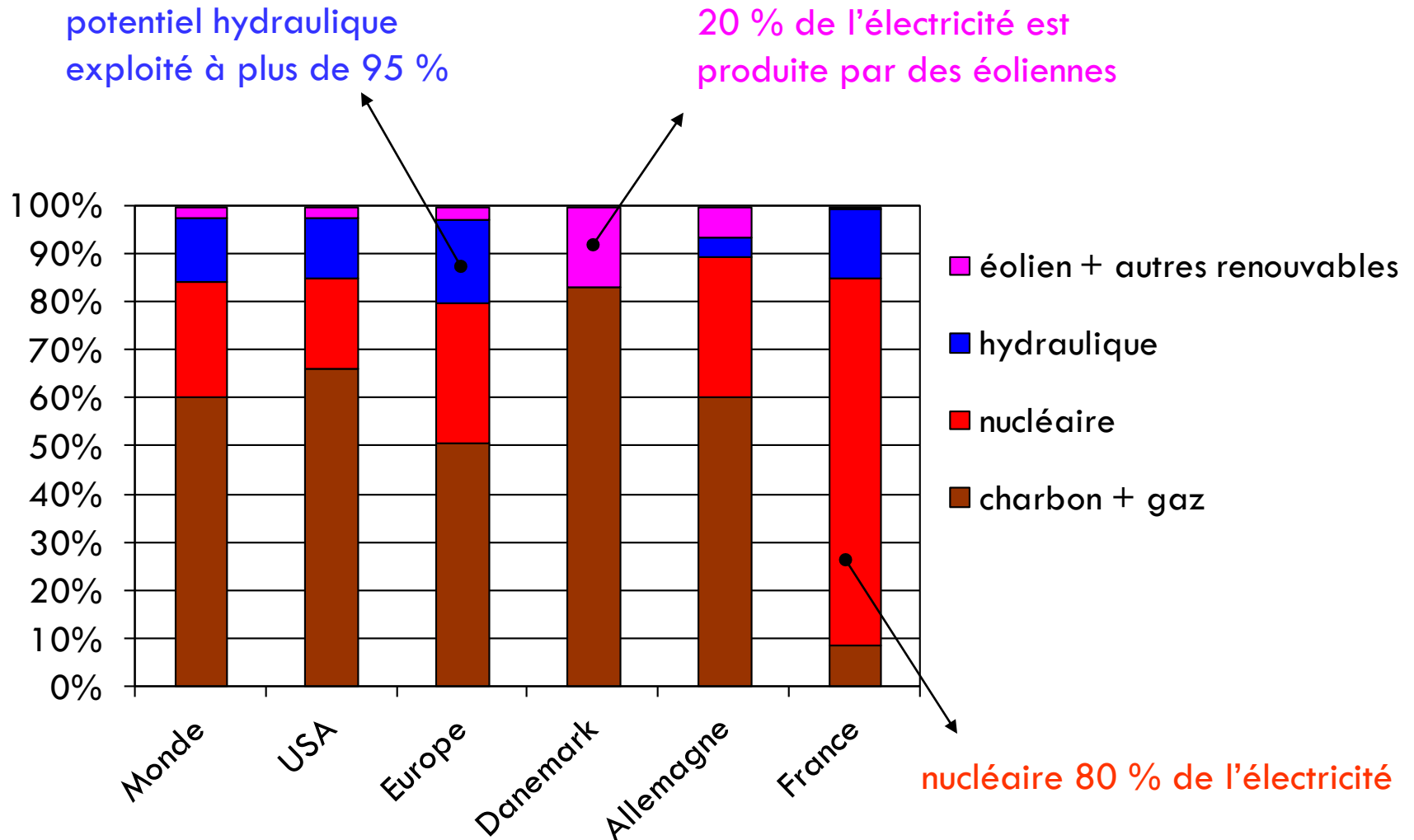
part des énergies nouvelles renouvelables (solaire, éolien) < 1 %

Chaque année la Chine installe ~ 50 GW_{élec} en centrales thermiques au charbon

Afrique : potentiel hydraulique important non exploité, nécessite un développement de réseaux électriques

Exemple de mix électriques dans le Monde

13



Contexte énergétique mondial

la suprématie des combustibles fossiles

14

Pourquoi une telle domination des combustibles fossiles ?

- ☺ utilisables pour tous nos besoins (transport, chaleur, électricité)
- ☺ production à toutes les échelles (chaudière individuelle → centrale thermique)
- ☺ transportables et stockables
- ☺ densité énergétique importante

Charbon (C) ~ 35 MJ/kg

Pétrole (CH₂)_n ~ 42 MJ/kg

Gaz (CH₄) ~ 55 MJ/kg

Exemple : 1 plein d'essence ~ 50 l en 2 minutes (= 15 MW !!) ➔ 1000 km d'autonomie

- ☺ coût très compétitif
- ☺ technologies matures

⇒ Difficile pour les sources alternatives de rivaliser ...

- ☹ énergie de « stock » donc non renouvelable à notre échelle
 - ⇒ pénurie des ressources
- ☹ inégalement répartis (tensions géopolitiques)
- ☹ impacts environnementaux et **émission de CO₂**

Contexte énergétique mondial

les combustibles fossiles et les émissions de CO₂

15

Pour une tep d'énergie produite	Charbon (C)	4,4 tonnes de CO ₂
	Pétrole (CH ₂) _n	3,14 tonnes de CO ₂
	Gaz (CH ₄)	2,1 tonnes de CO ₂

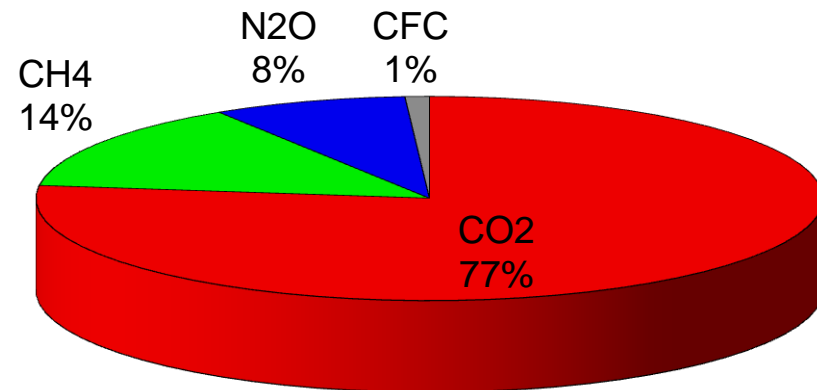
Ordres de grandeur

- production d'électricité $\eta_{\text{therm}} = 35 - 50 \%$
 - ▣ centrale au charbon $1 \text{ GW}_{\text{élec}} \sim 8,5 \text{ MtCO}_2/\text{an} \Rightarrow \sim 1 \text{ kg CO}_2 / \text{kWh}_{\text{élec}}$
 - ▣ moyenne en Europe $\sim 600 \text{ g CO}_2/\text{kWh}_{\text{élec}}$
- électricité en France $< 60 \text{ g CO}_2/\text{kWh}_{\text{élec}}$

Contexte énergétique mondial la contrainte climatique

16

- Les activités humaines augmentent la quantité de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère
- Les principaux (GES) d'origine anthropique :
 - ▣ CO₂ fossiles
 - ▣ CH₄ extraction gaz naturel, déchets
agriculture, dégradation organique
 - ▣ N₂O engrais, procédés chimiques
- Contribution actuelle au réchauffement climatique en % de chacun des GES émis chaque année (les émissions de CFC sont aujourd'hui négligeables)



Actuellement, 50 Gt éq. CO₂ de GES sont émises chaque année dont 30 sont directement imputables à l'utilisation des combustibles fossiles

Contexte énergétique mondial l'objectif à atteindre d'ici 2050

17

□ Les scénarios du GIEC

Scénarios II : stabilisation du réchauffement $\sim 2,5^{\circ}\text{C}$

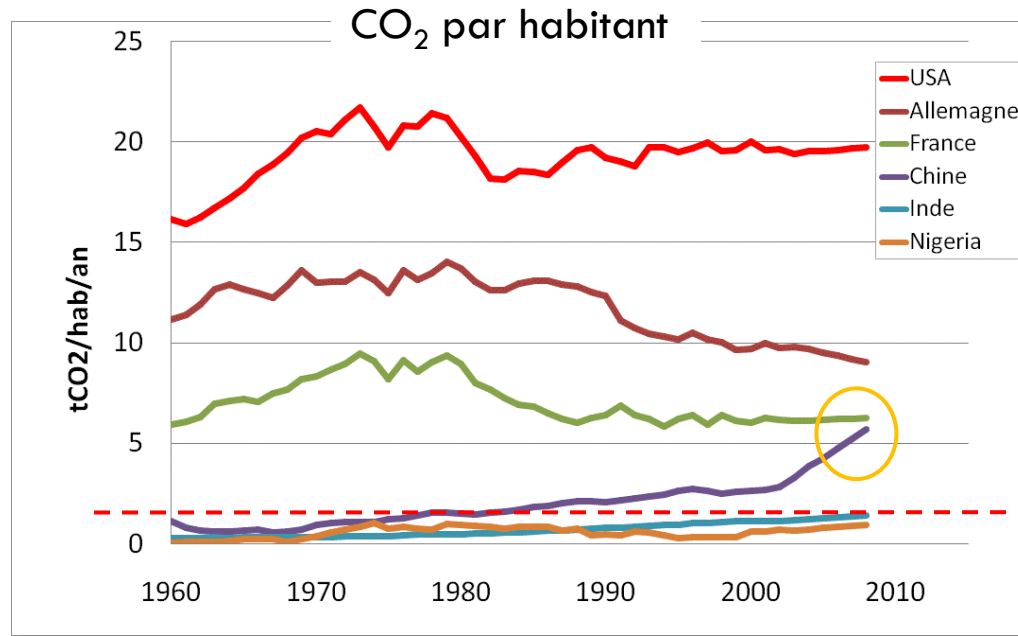
- Concentration de CO_2 stabilisée entre 490 – 535 ppm
- Pic d'émission du $\text{CO}_2 < 2020$
- Réduction des émissions de CO_2 -60% à -30% (par rapport à 2000)

□ émissions GES/2 en 2050

⇒ utilisation des fossiles réduite à $\sim 15 \text{ Gt éq. CO}_2/\text{an}$ ($\sim 4,5 \text{ Gtep/an}$ de fossiles)

⇒ $\sim 1500 \text{ kg éq. CO}_2/\text{hab/an}$ en 2050

Objectif moyen
à atteindre en
2050



Contexte énergétique mondial

la question des réserves

18

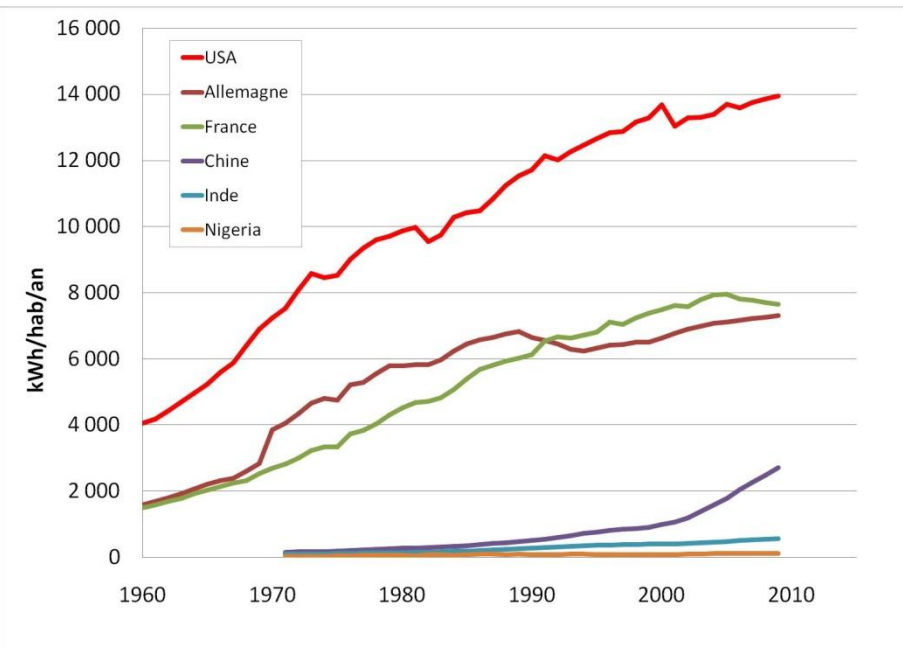
	pétrole	gaz	charbon
Ressources prouvées (Gtep)	150	185	530
consommation	3,9	2,9	3,2
R/C (années)	38	64	165
Pic annoncé	2015-2040	2020-2050	< 2100 ?

Trop de fossiles pour le climat (charbon → carburant liquide)

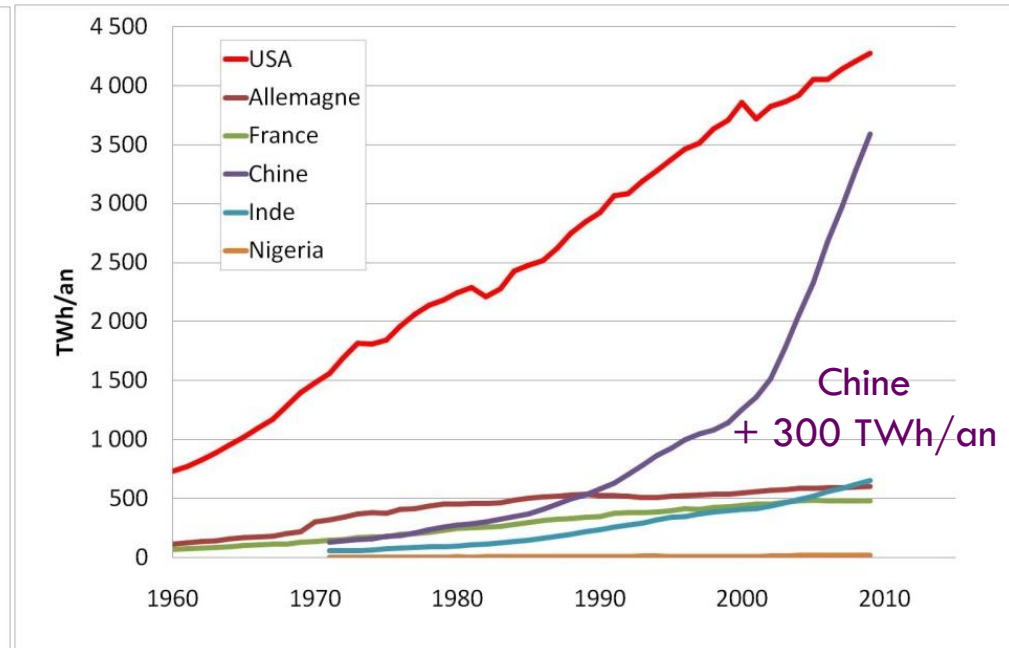
Difficultés majeur de l'enjeu climatique : convaincre nos sociétés de se passer de combustibles fossiles disponibles et bon marché

Consommation d'électricité dans le Monde ~ 20 000 TWh/an

Consommation électrique par habitant



Consommation électrique totale



évolution de la demande énergétique mondiale d'ici 2050

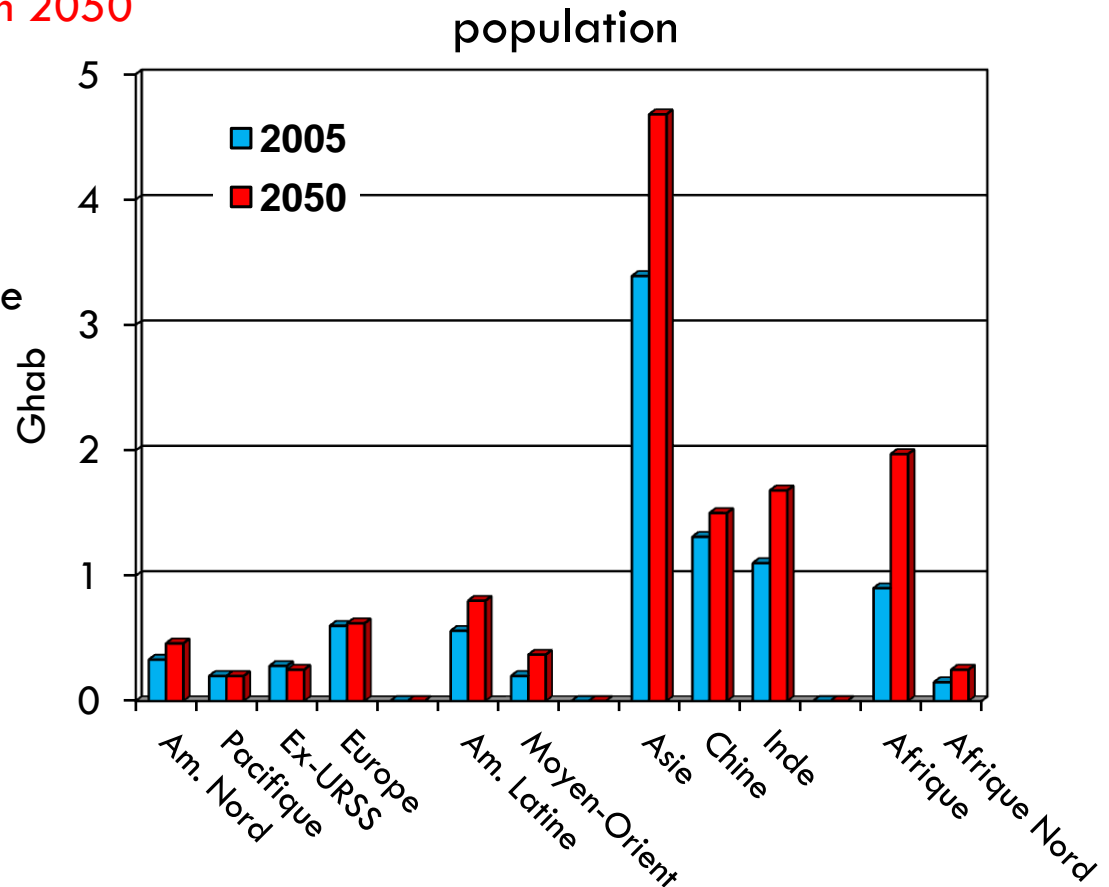
20

Projection de la population mondiale en 2050

⇒ ~ 9 milliards d'habitants

Répartition en 2050 :

- population des pays riches stable
- Asie : 50 % de la population mondiale
- population en Afrique x 2



Ce qui est très probable :

- les pays riches veulent maintenir leur niveau de vie
- les pays émergents et pauvres tentent légitimement d'améliorer leur niveau de vie
- ➡ augmentation de la consommation mondiale d'énergie

Contexte énergétique mondial

évolution de la demande énergétique mondiale d'ici 2050

21

Estimation de la consommation mondiale en 2050

Ordres de grandeur simplistes

- Consommation en moyenne en 2050 = consommation moyenne actuelle $\sim 1,7$ tep/hab./an
 $\Rightarrow E_{\text{Monde}} = 15,3$ Gtep/an
- Consommation moyenne en 2050 = consommation actuelle des pays riches ~ 4 tep/hab./an
 $\Rightarrow E_{\text{Monde}} = 36$ Gtep/an en 2050

Les études technico-économiques de prospective énergétiques (IIASA, WEC, POLES, ...) prévoient une consommation en 2050 comprise entre 15 et 30 Gtep/an

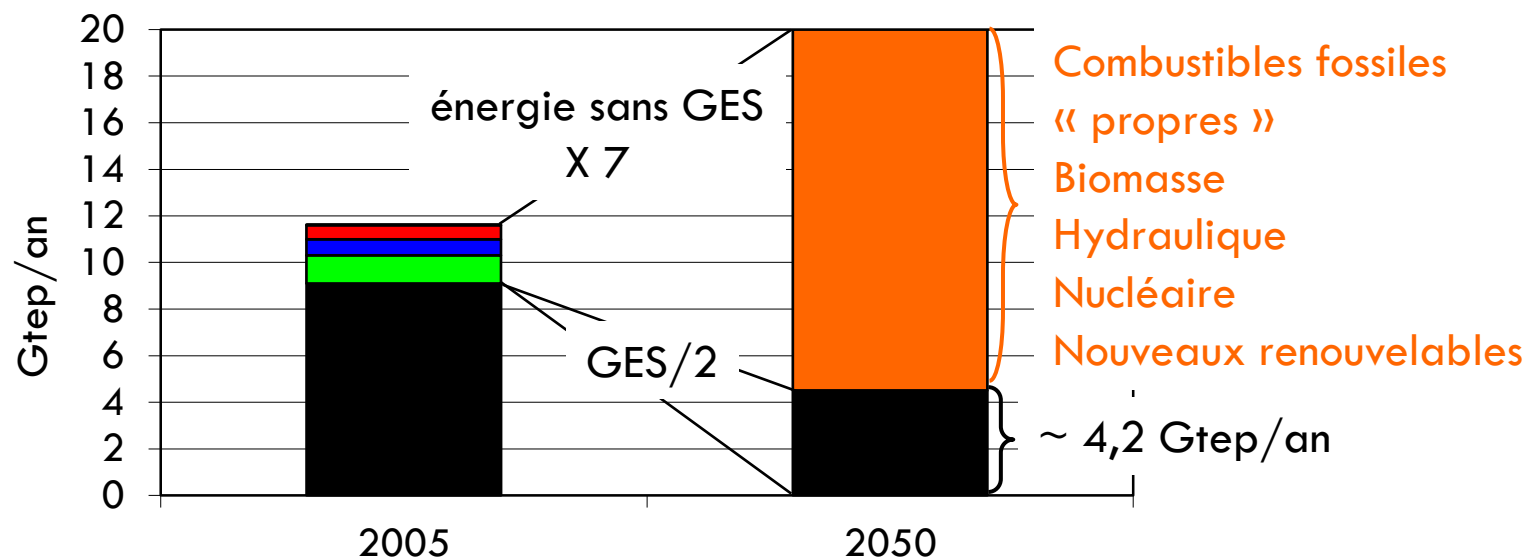
Choix d'une consommation mondiale d'énergie en 2050 médiane : 20 Gtep/an

Contexte énergétique mondial

Le casse – tête énergétique

22

Subvenir aux besoins énergétiques croissants d'une population mondiale en augmentation et réduire nos émissions de GES



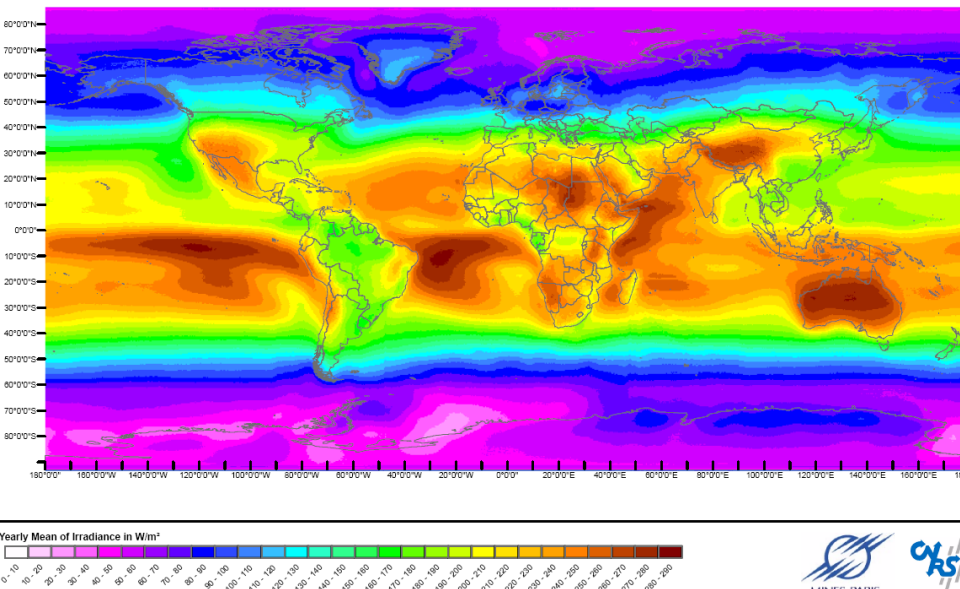
Les sources non émettrices de CO₂ ont-elles un potentiel suffisant ? Sont-elles adaptées à nos besoins ?

→ Estimation du potentiel en 2050 de chaque source

- maturité industrielle ?
- coût ? (investissement, fonctionnement, combustible, ...)
- contraintes environnementales (surface utilisée, émissions polluantes, risques)
- acceptabilité (nucléaire, éolien, séquestration de CO₂)

Le Solaire

- Vent : \neq de température à la surface de la Terre \rightarrow déplacement de masses d'air
- Hydraulique : l'eau s'évapore et retombe sous forme de précipitations à une altitude plus élevée
- Biomasse : la plante utilise l'énergie solaire pour « casser » les molécules de CO_2 et produire la matière végétale (photosynthèse)
- Utilisation directe : solaire thermique (chaleur basse température : eau chaude, chauffage habitation), solaire à concentration (chaleur haute température : industrie, production électrique), photovoltaïque (production électrique)



☺ Source inépuisable ...

☹ à nos latitudes

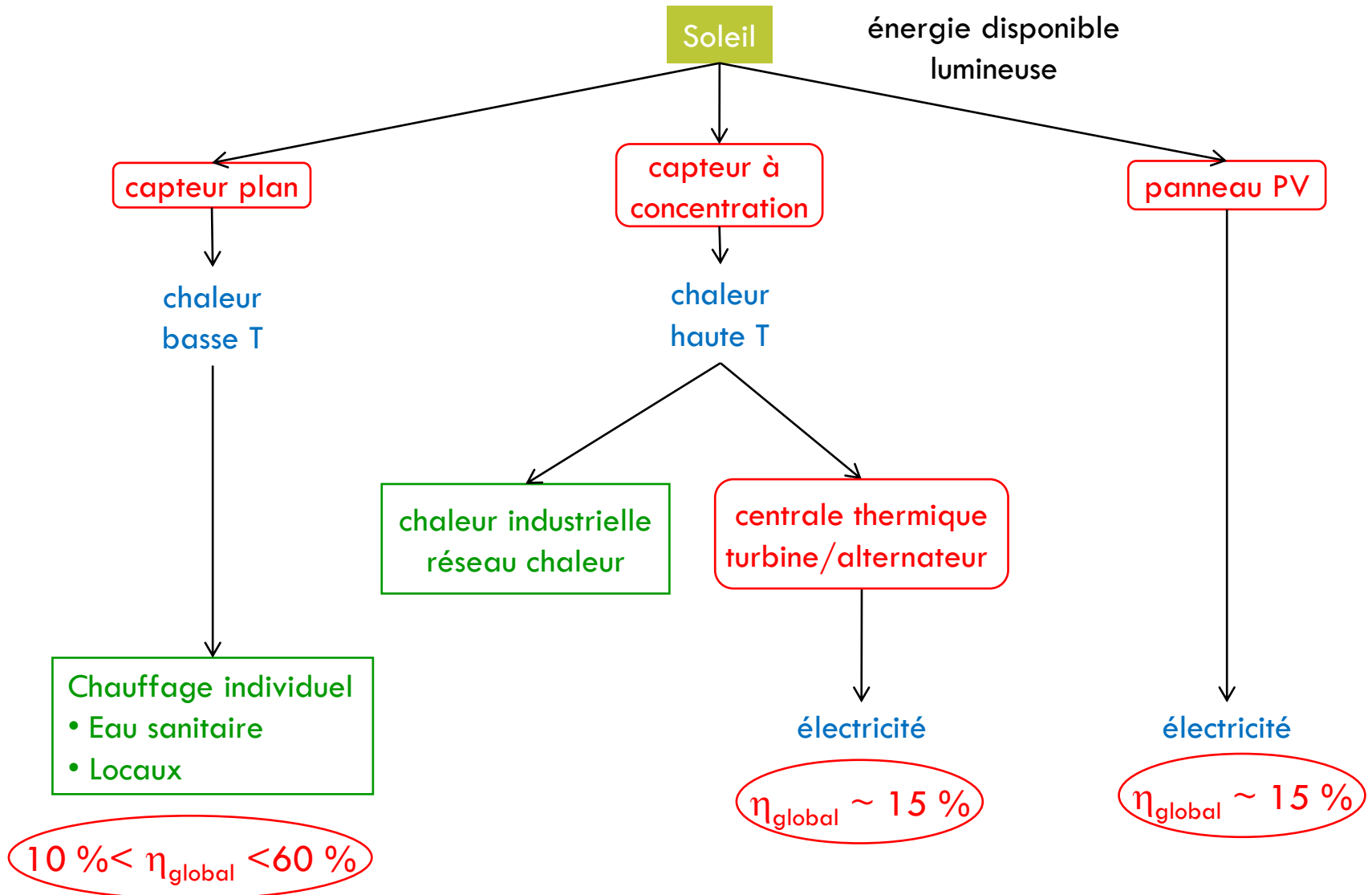
~ 150 à 200 W/m^2

Conditions optimales pour les installations solaires

~ 250 à 300 W/m^2

Les utilisations de l'énergie solaire

24



Tour d'horizon des énergies renouvelables

solaire thermique/chauffage solaire

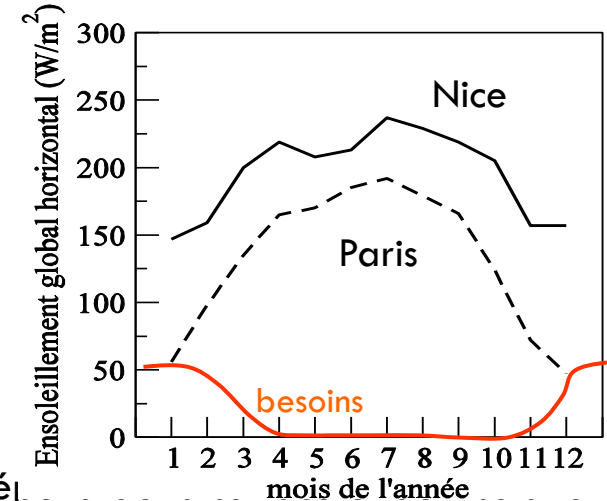
25

□ eau chaude sanitaire

- besoins journaliers réguliers sur l'année
- quantité : 50 l/pers./jour à 60°C ~ 3 kWh /pers. /jour
- Surface de capteur ~ 2 m²/pers.
- Taux de couverture solaire : 30 à 70 %

□ chauffage des habitations

- Puissance de chauffage d'une habitation = $K (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})$ [W]
 - K (W/°C) : coefficient de pertes thermiques de l'habitation, dé
 - $200 < K < 400$ (W/°C) pour une maison de 120 m²
- besoins en hiver seulement ~ 50 W/m² ~ 1,2 kWh/m²/jour
- surface de capteur ~ 0,25 m²/ m² d'habitation
- Taux de couverture solaire annuel
 - Maison traditionnelle : 20 à 40 % ($T_{\text{eau}} \sim 60^\circ\text{C}$)
 - Maison « solaire » : 40 à 60 % ($T_{\text{eau}} \sim 30^\circ\text{C}$)



☺ économies de fuel, gaz ou d'électricité

☺ investissement rentable < 10 ans

(avec subvention)

☹ chauffage d'appoint nécessaire

☹ intermittence, stockage sur plusieurs jours difficiles

Tour d'horizon des énergies renouvelables

solaire photovoltaïque

26

- Technologie commercialisée : panneaux au silicium η_{conv} de 10 % à 20 %
($\eta_{\text{théo}} = 45 \%$, $\eta_{\text{labo}} = 40 \%$)
- Puissance solaire max $\sim 1000 \text{ W/m}^2 \Rightarrow$ puissance électrique crête $\sim 150 \text{ W/m}^2$
- Cycle jour/nuit + météo \Rightarrow puissance solaire en moyenne $\sim 150 \text{ W/m}^2$ en moyenne
 \Rightarrow **Puissance électrique effective $\sim 25 \text{ W/m}^2$, soit $0,6 \text{ kWh/jour/m}^2$**
- \Rightarrow **Ne pas oublier le facteur de charge : $f = \frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{crête}}} \approx 20\%$**
- Besoins résidentiel hors chauffage : $\sim 3 \text{ kWh}_{\text{élec}}/\text{pers.}/\text{jour} \Rightarrow \sim 5 \text{ m}^2/\text{pers.}$
- Développé essentiellement dans les pays riches pour une production individuelle.
- Moyen efficace de fournir de l'électricité lorsqu'il n'y a pas de réseaux (pays pauvres)
- ☺ subventions importantes (rachat $50\text{cts}/\text{kWh}_{\text{élec}}$ pendant 20 ans !)
- ☺ durée de vie ~ 25 ans
- ☹ coût encore élevé $\sim 20 \text{ cts } \text{€}/\text{kWh}_{\text{élec}}$
- ☹ $\sim 800 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$ de panneau PV produit $\Rightarrow [100 - 200] \text{ g de CO}_2/\text{kWh}_{\text{élec}}$
coût énergétique ~ 5 ans de production du panneau
- ☹ **l'intermittence**

Tour d'horizon des énergies renouvelables solaire à concentration (ou solaire thermodynamique)

27

Principe : concentrer le rayonnement solaire par des miroirs sur un récepteur
⇒ températures atteintes de 250°C à 1000°C

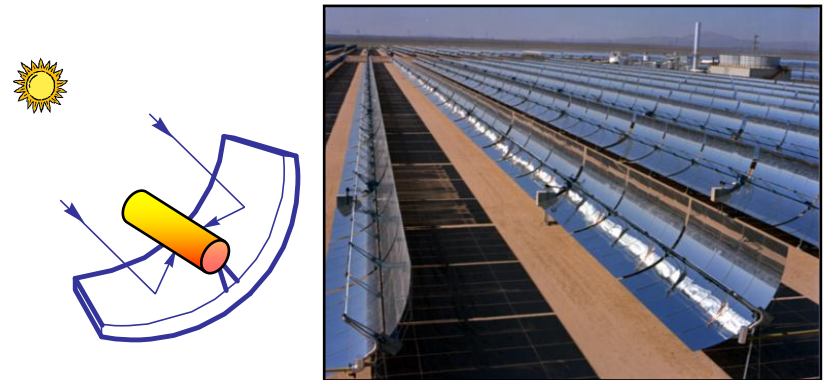
Applications : chaleur industrielle, chauffage urbain (réseaux de chaleur)
production d'électricité centralisée (turbine)

héliostatique → centrale à tour



production de chaleur à 400°C - 1000°C
caloporteur sels fondus, eau/vapeur, air,
métaux liquides

cylindro-parabolique



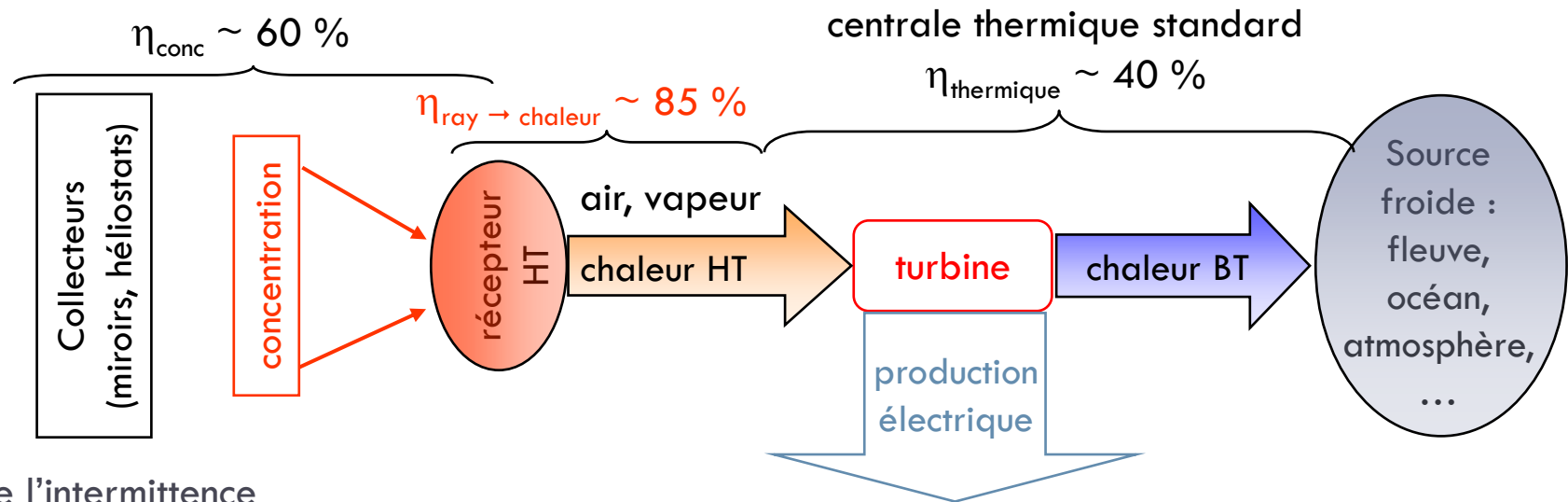
production de chaleur à 250°C - 400°C
caloporteur huile, eau/vapeur

Tour d'horizon des énergies renouvelables solaire à concentration (ou solaire thermodynamique)

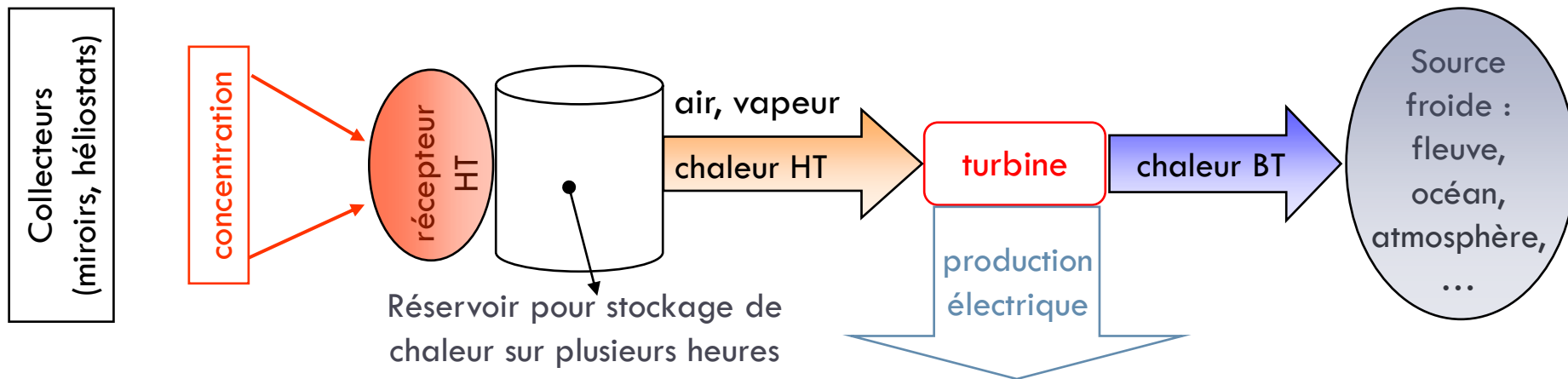
28

Puissance électrique de 10 à 400 Mw_{élec}

Production d'électricité centralisée : η_{global} de 10 % à 20 %



Gestion de l'intermittence



Tour d'horizon des énergies renouvelables solaire à concentration (ou solaire thermodynamique)

29

production de chaleur HT : - procédés industriels
- chauffage urbain (réseaux de chaleur)

production d'électricité centralisée

☺ cogénération : production mixte d'électricité et de chaleur

☺ système hybride = couplage à une production « classique » de type gaz ou charbon pour gérer l'intermittence

☺ pas de rupture technologique majeure

☺ coût encore élevé $< 20 \text{ cts } \text{€}/\text{kWh}_{\text{élec}}$

☺ émission de $\text{CO}_2 < 20 \text{ g}/\text{kWh}_{\text{élec}}$

Ex : projet centrale à tour « solar 3 » en Espagne

2493 héliostats $\rightarrow 240\,000 \text{ m}^2$

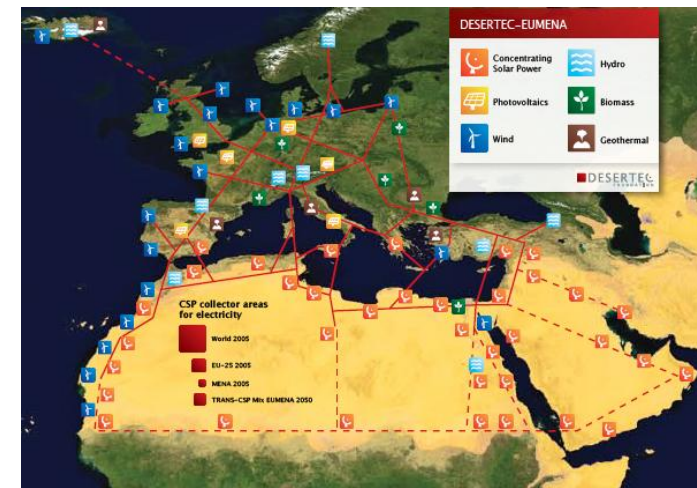
Puissance installée $15 \text{ MW}_{\text{élec}}$

Capacité de stockage de la chaleur $\sim 600 \text{ MWh}$

Production électrique $\sim 85 \text{ GWh}_{\text{élec}}/\text{an} \Rightarrow f_{\text{charge}} 65 \%$

Ex : projet « DESERTEC - EUMENA »

$1\,800 \text{ TWh}_{\text{élec}}/\text{an}$ produits par des centrales solaires à concentration ($600 \text{ TWh}_{\text{élec}}$ vers l'Europe, $600 \text{ TWh}_{\text{élec}}$ pour conso. locale, $600 \text{ TWh}_{\text{élec}}$ dessalement eau de mer)



Tour d'horizon des énergies renouvelables

éolien

30

Les grandes éoliennes 2 MW_{élec} crête (hauteur 122 m)

Facteur de charge : $f = 15 - 25 \%$ du temps \Rightarrow puissance effective ~ 400 kW/éolienne

Empiètement 8 ha/MW installé \Rightarrow Production < 10 W/m² ($<$ solaire)

L'Europe est le leader de la production d'électricité éolienne :

production en Allemagne $\sim 30 \%$ de la puissance mondiale installée

$\Rightarrow \sim 20\,000$ MW_{élec} installés (production annuelle ~ 30 TWh_{élec})

Développement futur vers un éolien off-shore : $f \nearrow$ et production centralisée

😊 technologie maîtrisée

😊 coût raisonnable (~ 2 x plus que le nucléaire ou le gaz)

😞 nuisances sonores, défiguration du paysage, ...

😞 intermittence : limite la part de l'éolien (et du PV) dans la production d'électricité

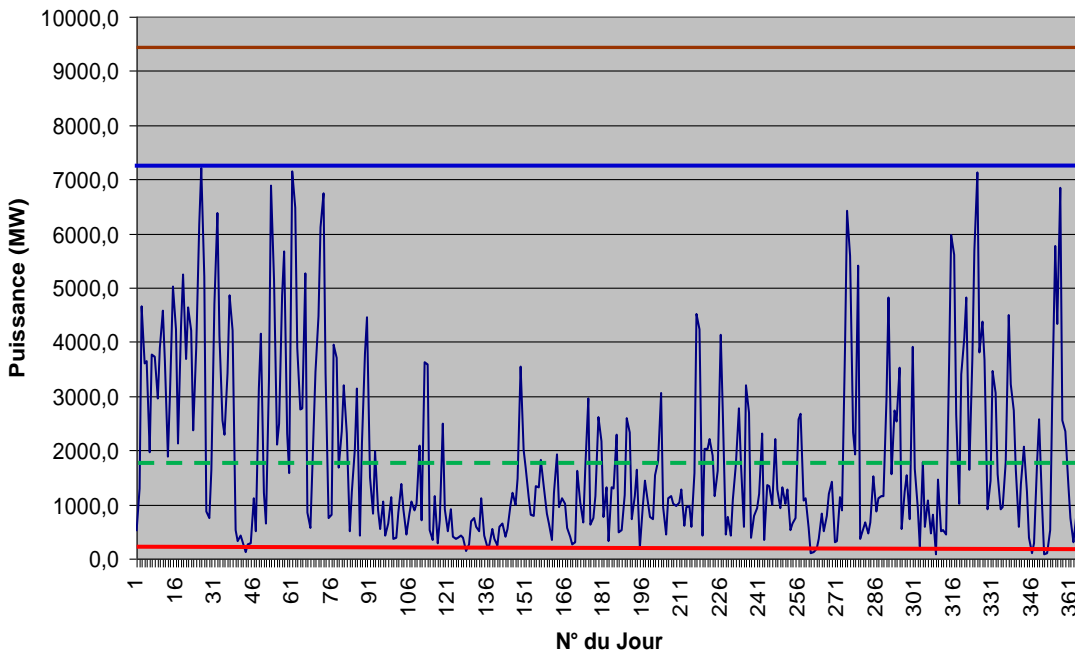
Potentiel max au Danemark : 20 % de l'électricité

Au-delà, problème de gestion des réseaux. Nécessité de coupler les éoliennes à des centrales électriques « souples » (centrales au gaz ou charbon, centrale hydraulique, ...)

Tour d'horizon des énergies de flux éolien

31

Exemples : parc éolien en Allemagne de plusieurs milliers d'éoliennes (EON)



■ $P_{\text{installée}} \sim (9300 \text{ MW})$

coût d'investissement

■ $P_{\text{max}} (76\% \text{ de } P_{\text{installée}})$

ne devrait pas dépasser la puissance
consommée

■ $P_{\text{moyenne}} (20\% \text{ de } P_{\text{installée}})$

quantité d'électricité produite en moyenne sur
l'année

■ $P_{\text{min}} = P_{\text{substitution}} (2\% \text{ de } P_{\text{installée}})$

Puissance minimale fournie par le parc

Nécessité de moduler rapidement la production d'électricité par d'autres sources (charbon, gaz, hydraulique)

■ P_{moyenne} : quantifie les économies en combustible des autres centrales.

■ $P_{\text{substitution}}$: quantifie le nombre de centrales (charbon, gaz) dont on peut définitivement se passer.

En Allemagne, les éoliennes permettent d'économiser $\sim 6\%$ de la consommation de gaz et de charbon, mais ne permettent pas de réduire significativement le nombre de centrales.

Tour d'horizon des énergies renouvelables hydraulique

32

Principe : $E_p = mgz \rightarrow E_{\text{cinétique}} \rightarrow E_{\text{élec}}, \eta_{\text{global}} \sim 85 \%$

- production mondiale actuelle : 310 GW (puissance moyenne)
= 17,7% de l'électricité mondiale
- utilisation : barrages (très souple) ou installations au fil de l'eau (base)
⇒ gestion des pics de demande d'électricité

😊 production d'électricité flexible

- ⇒ gestion des « pics » de consommation d'électricité
- ⇒ réduit la consommation de combustibles fossiles
- ⇒ gestion des sources intermittentes

😊 production centralisée (existence d'un réseau) ou individuelle

😞 exploitation possible souvent loin des besoins (Afrique)

😞 surface nécessaire importante, impacts environnementaux et humains

Ex : le barrage des 3 gorges en Chine (China)
18 GW installés pour une production électrique de 72 TWh/an
surface du lac 2 km x 640 km ⇒ $6 W_{\text{élec}} / m^2$
des millions de personnes déplacées

Tour d'horizon des énergies renouvelables

biomasse

33

- ☺ utilisation du bois et des végétaux semblable aux combustibles fossiles :
 - biocarburant → transport
 - biomasse → chaleur BT et HT, production d'électricité
- ☺ biomasse traditionnelle = source renouvelable et non émettrice de CO_2 si bonne gestion de son utilisation
- ☹ rendement photosynthèse faible ($E_{\text{bois}}/E_{\text{sol}} \sim 0,1 \%$)
- ☺ densité énergétique faible $\sim 0,15 \text{ W/m}^2$ (source très diluée) mais énergie stockable, transportable et bon marché (60 € /stère et 1 stère = 0,15 tep → 3,4cts €/kWh à comparer au fuel domestique 75cts/l → 7,5 cts€/kWh).

Biocarburants
(1^{ère} génération)

	tep / ha	Energie nécessaire tep/ha
Huile colza	1,5	0,5
Éthanol betterave	4	2,7

contenu énergétique

énergie nécessaire pour
la transformation

⇒ sources d'énergie non émettrice de CO_2 (nucléaire, solaire, éolien)

💣 compétition entre besoins alimentaires / besoins énergétiques

Tour d'horizon des énergies renouvelables

la géothermie

34

- énergie thermique issue de la radioactivité de ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K
- puissance géothermique totale de la Terre = 22 TW \sim ordre de grandeur de la puissance d'énergie consommée dans le monde
 - ⇒ en moyenne, flux géothermique en surface = $0,06 \text{ W/m}^2$ (\ll solaire) : flux inépuisable mais trop faible pour représenter une part significative dans le monde ...

Mais le flux n'est pas uniforme : sources chaudes, volcans, ...

→ exploitation locale possible (Islande)

Et présence de roches chaudes (200°C) en profondeur (5km) = énergie thermique stockée depuis des millions d'années

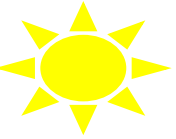
→ fort potentiel mais non renouvelable

- utilisations : production de chaleur et d'électricité
 - Ex : centrale géothermique de Soultz-les-forêts à Mulhouse
 - exploitation à 5000 m de profondeur
 - $13 \text{ MW}_{\text{thermique}}$ à $T < 200^\circ\text{C}$, production électrique $2,1 \text{ Mw}_{\text{elec}}$ dont 0,6 consommé pour le fonctionnement de l'installation
- Production mondiale d'électricité géothermique $\sim 71 \text{ TWh/an}$

Tour d'horizon des principales énergies renouvelables

Bilan

35



Puissance solaire reçue $\sim 250 \text{ W/m}^2$

éolien et PV

sources intermittentes et dispersées pour la production d'électricité.

Utilisation « standard »:

⇒ développer des réseaux performants !

⇒ coupler à une production « souple » charbon et gaz !

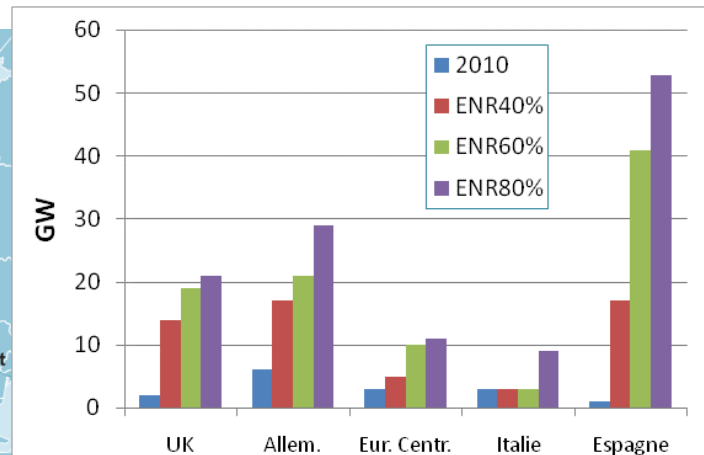
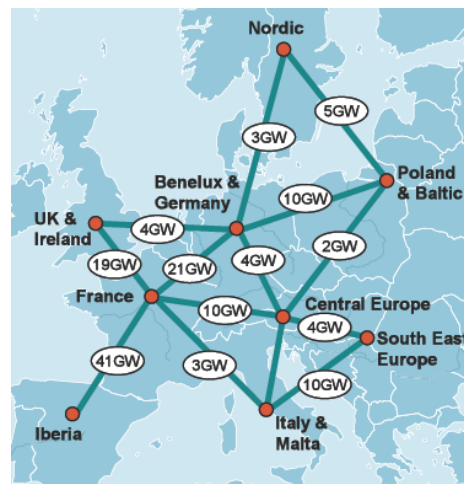
⇒ réellement efficace si stockage à grande échelle

⇒ limités à 20 % de l'électricité ajd

Photovoltaïque	$35 \text{ W}_{\text{élec}}/\text{m}^2$
éolien	$< 10 \text{ W}_{\text{élec}}/\text{m}^2$
Chauffage solaire	$60 \text{ W}_{\text{therm}}/\text{m}^2$
Solaire concentré	$40 \text{ W}_{\text{élec}}/\text{m}^2$
Biomasse	$< 1 \text{ W}/\text{m}^2$
hydraulique	$5 - 25 \text{ W}_{\text{élec}}/\text{m}^2$
géothermie (flux moyen)	$0,06 \text{ W}_{\text{therm}}/\text{m}^2$

intermittence
dilué

Puissance installée entre la France et ses voisins



Ex: étude 60% de renouvelable en Europe pour la production d'électricité
Impact sur le réseau
<http://www.roadmap2050.eu>

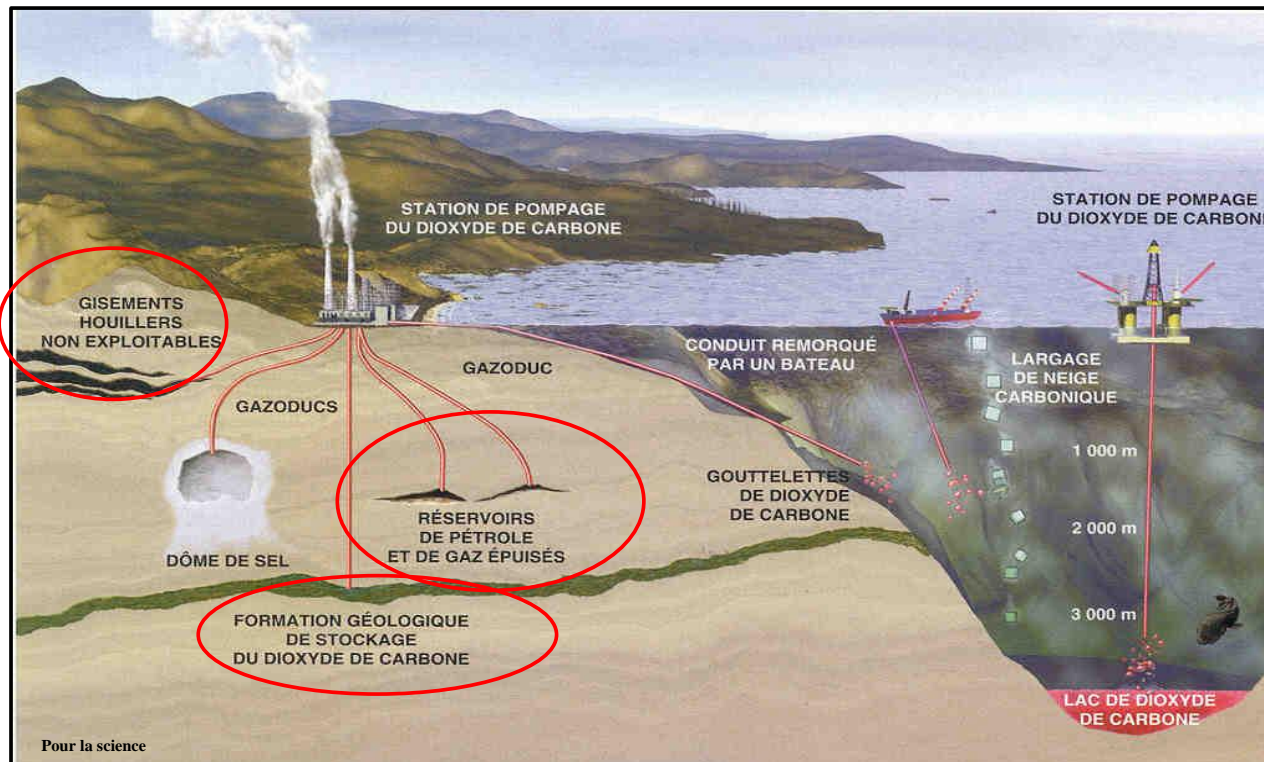
Tour d'horizon des principales énergies renouvelables leur potentiel en 2050

36

	hydraulique	biomasse		solaire			géothermie	éolien	total
		biocarburant	bois	thermique	PV	concentré			
2008 (Gtep/an)	0,7	0,03	0,9	-	0,04	-	0,02	0,05	1,74
2050 (Gtep/an)	2	0,5	2	0,5	0,5	0,5 → 0,7	0,3	1	7,3
transport									
chaleur HT									
chaleur BT									
électricité									

- beaucoup de sources renouvelables spécifiquement dédiées à la production d'électricité (~ 3,5 Gtep/an)
- **potentiel total des sources renouvelables en 2050 : 7,5 Gtep/an**

Séparer le CO₂ des fumées émises par la combustion des fossiles dans les centrales thermiques. Séquestration dans des gisements d'hydrocarbures en cours d'épuisement, dans des aquifères profonds ou au fond des océans.



R & D importants :

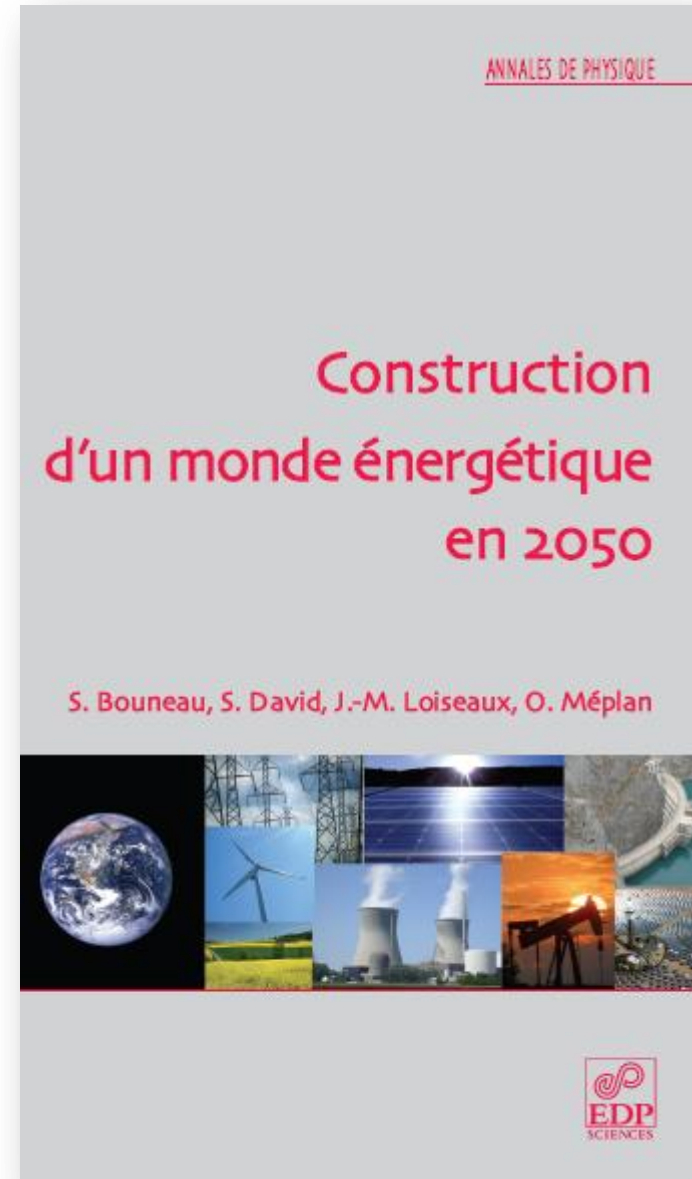
- procédés de séparation, capture et conditions de séquestration
- études des sites de stockage et évolution à long terme du CO₂.

Coût compétitif ? Capacités de stockage ? Acceptabilité ?

Potentiel de stockage optimiste : 10 à 15 GtCO₂/an (4 Gtep/an de gaz et charbon)

Envisagé pour une production centralisée d'électricité

- Description quantitative de ce que pourrait être le monde énergétique en 2050 contraint par :
 - ▣ une consommation d'énergie finie
 - ▣ une réduction des fossiles
 - ▣ une réduction des inégalités de consommation
 - Dégager des tendances sur la façon de produire et de consommer l'énergie
 - ▣ part du nucléaire dans le mix énergétique mondial et sa répartition géographique
 - ▣ adéquation entre sources d'énergie disponibles et besoins
 - Choix d'une démarche simple avec un nombre limité de paramètres
 - Les hypothèses sont intuitives mais toujours explicites et sont donc « criticables »
- 💣 Il ne s'agit pas d'une étude de prospective mais d'une description à partir d'hypothèses fixées initialement



□ les hypothèses initiales retenues

- ▣ population mondiale ~ 9 milliards d'habitants
- ▣ choix d'une consommation mondiale d'énergie de 20 Gtep/an
- ▣ persistance des inégalités dans le Monde mais non plus simplement entre grandes régions géographiques mais au sein même des pays émergents et pauvres
 - 3 niveaux de consommations C_1 , C_2 et C_3 : élevé, modéré et faible
 - répartition de la population totale de chaque grande région géographique en 3 catégories P_1 , P_2 et P_3

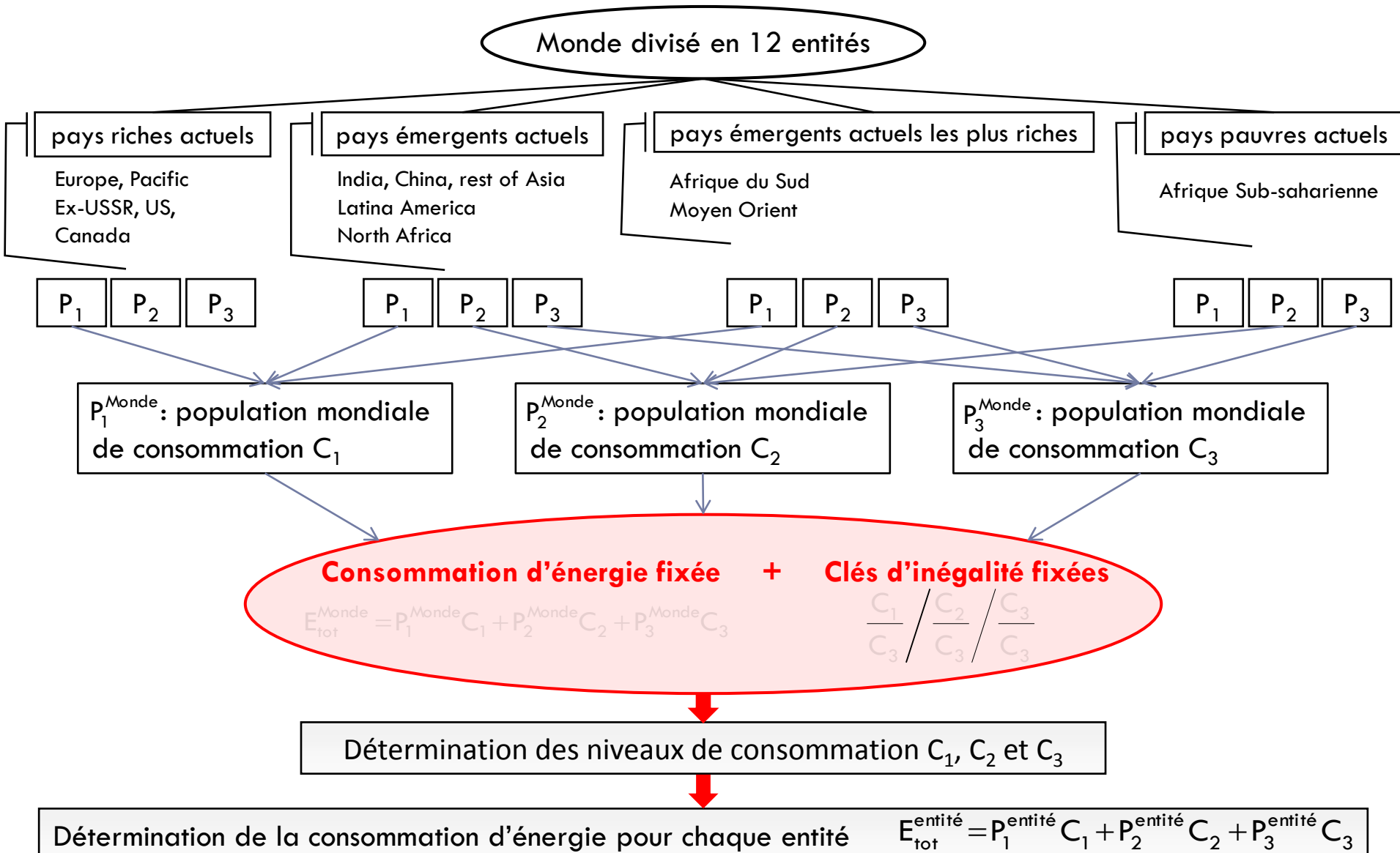
⇒ Les populations P_1 , P_2 et P_3 de chaque grande région géographique auront des niveaux de consommation d'énergie C_1 , C_2 et C_3 identiques partout dans le Monde

But : répartir P_1 , P_2 , P_3 et déterminer C_1 , C_2 et C_3

construction d'un monde énergétique en 2050

principe de la démarche (simple mais « réaliste »)

40



Europe, Pacific
Ex-USSR, US,
Canada

India, China, rest of Asia
Latina America
North Africa

South Africa
Middle East

Sub-Saharan Africa

Pour chaque entité, répartition de $P_{\text{tot}}^{\text{entité}}$ dans P_1 , P_2 et P_3 à partir d'un seul paramètre "pertinent" : le taux d'urbanisation

population
rurale

population
rurale

population
rurale

population
rurale

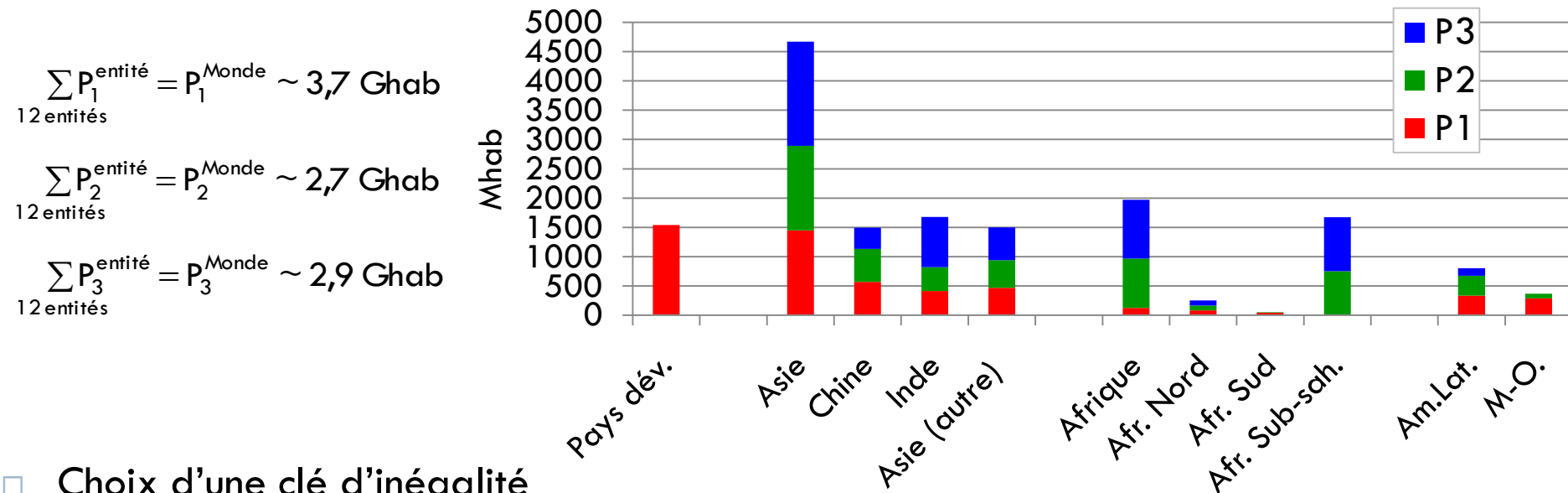
Répartition des populations urbaines et rurales dans P_1 , P_2 et P_3

100 %

P

P_3^{Monde} : population mondiale
de consommation C_3

□ Répartition des populations P_1 , P_2 et P_3 en 2050 pour chaque entité



□ Choix d'une clé d'inégalité

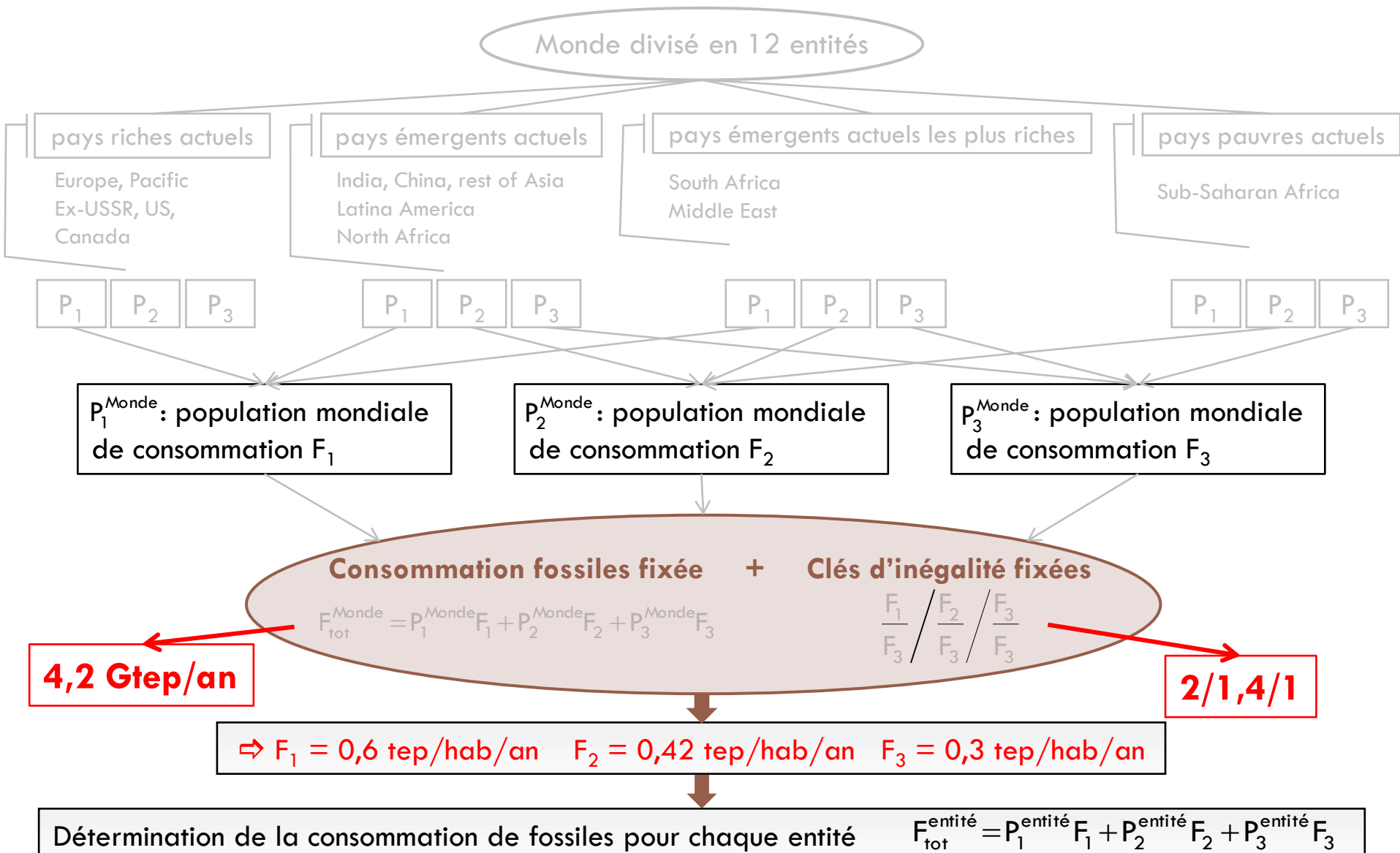
$$\frac{C_1}{C_3} \bigg/ \frac{C_2}{C_3} \bigg/ \frac{C_3}{C_3} = 4/2/1$$

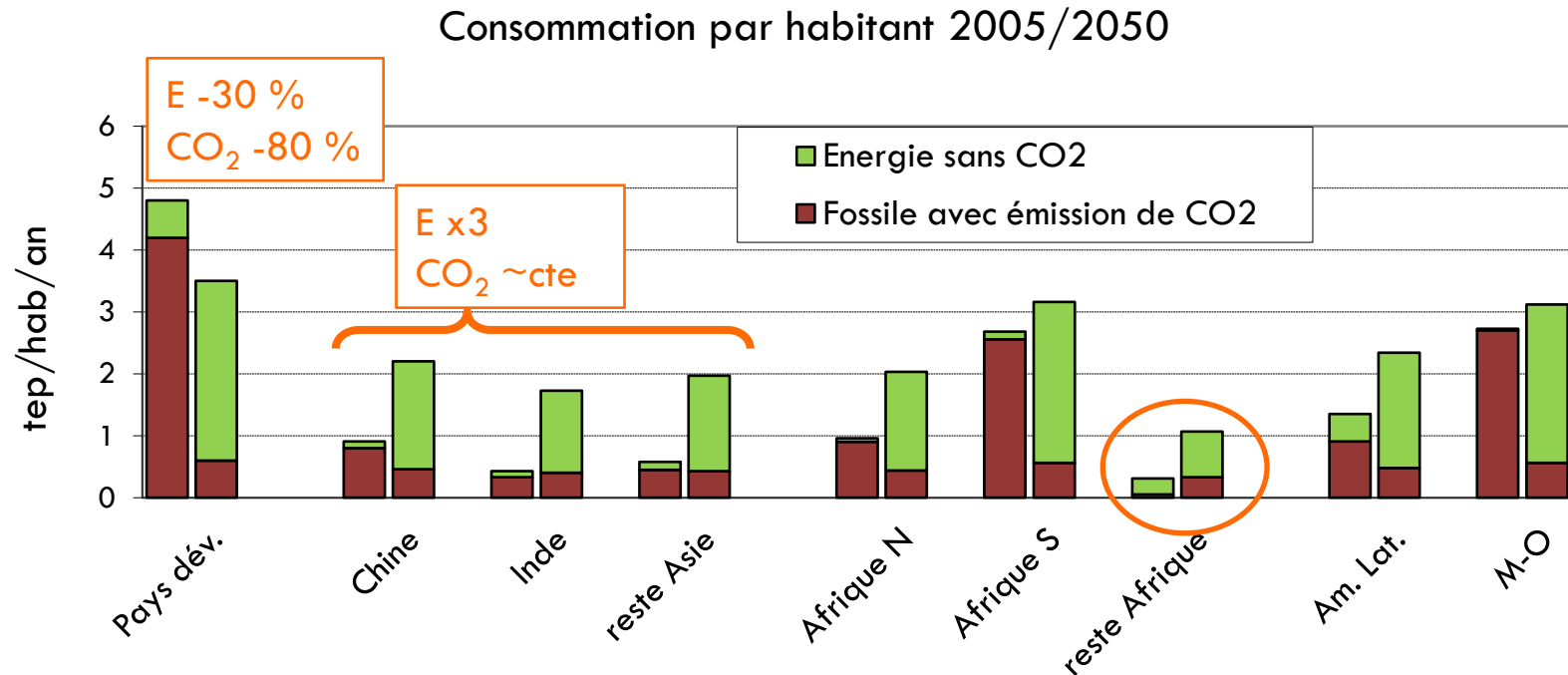
$\Rightarrow C_1 = 3,44 \text{ tep/hab}$
 $C_2 = 1,72 \text{ tep/hab}$
 $C_3 = 0,86 \text{ tep/hab}$

construction d'un monde énergétique en 2050

Objectif supplémentaire : la contrainte climatique

43

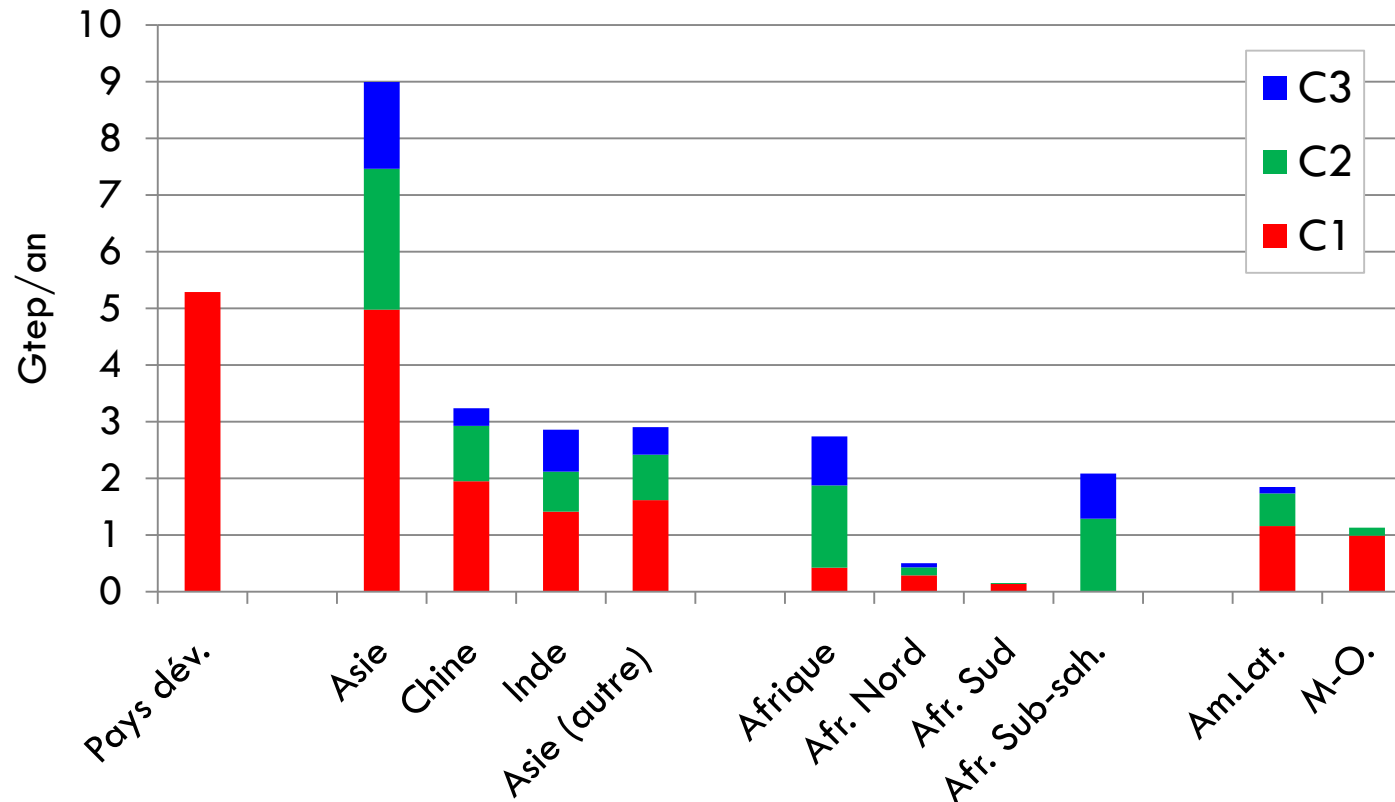




- ✓ Scénario « 20 Gtep/an » avec des inégalités réduites en 2050
 - Consommation d'énergie des populations les plus favorisées réduite de 30 %
 - Augmentation de la consommation des pays émergents et pauvres d'un facteur 3 à 4
- ✓ La contrainte climatique est déterminante pour bâtir le mix énergétique en 2050

Les sources non émettrices de CO₂ devront couvrir 85 % des besoins des pays riches actuels et assurer l'augmentation de la consommation des pays émergents actuels

Répartition des 20 Gtep/an dans le Monde en 2050



- ✓ Les règles de somme sur la demande mondiale d'énergie et la population mondiale rendent les valeurs de $C_1/C_2/C_3$ stables pour des variations des clés d'inégalités de 30 %

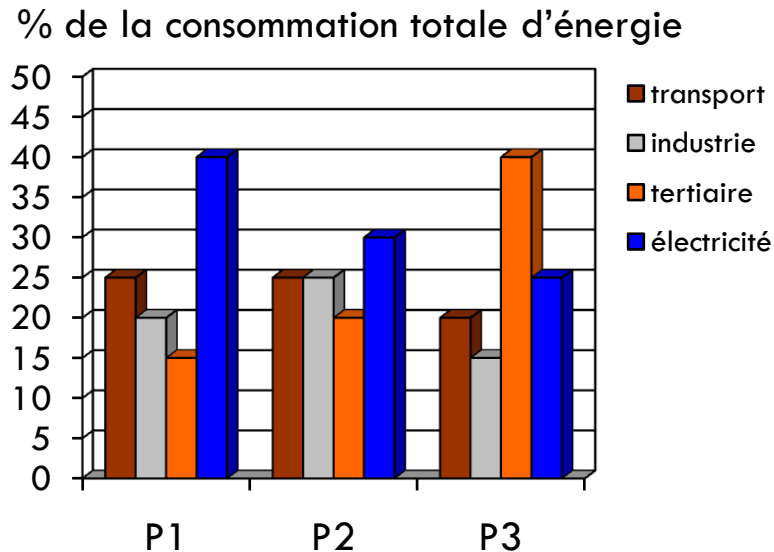
construction d'un monde énergétique en 2050

2^{ème} étape : adéquation des sources aux besoins

46

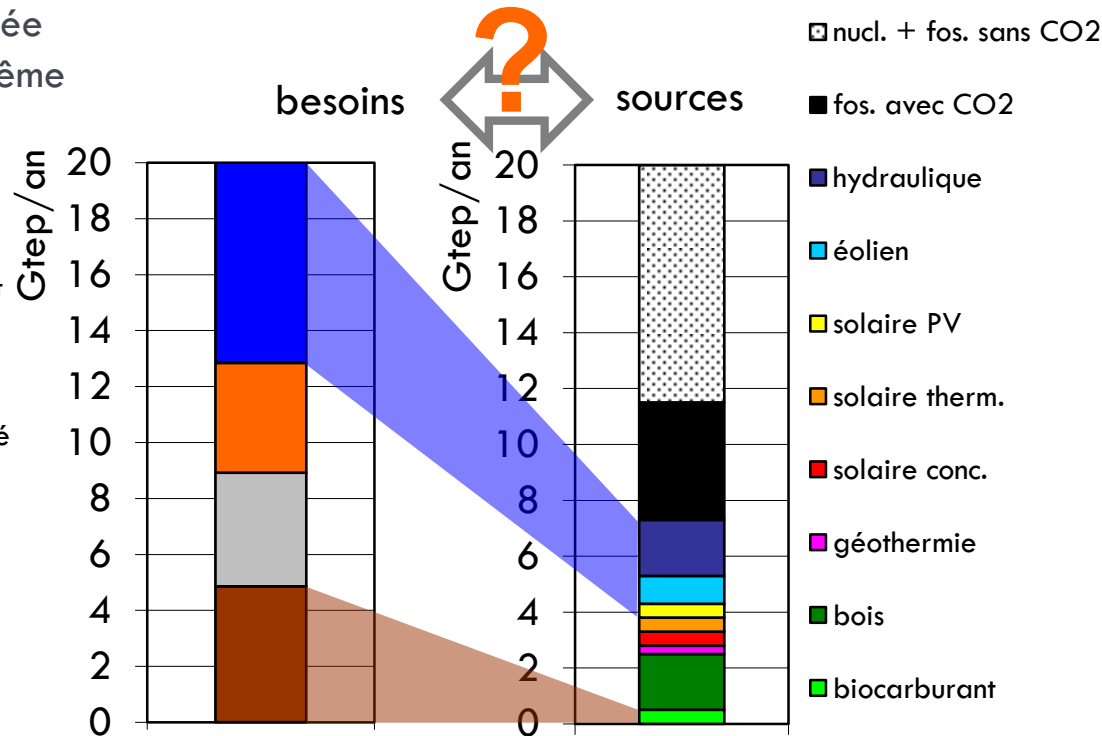
Besoins en énergie / secteur de consommation

On suppose que la fraction d'énergie consommée dans chaque secteur de consommation est la même que celle d'aujourd'hui



- **Pays riches actuels** \equiv population P_1 en 2050
($E_1 = 12,8$ Gtep/an)
- **Pays émergents actuels** \equiv population P_2 en 2050
($E_2 = 4,7$ Gtep/an)
- **Pays pauvres actuels** \equiv population P_3 en 2050
($E_3 = 2,5$ Gtep/an)

Potentiel des sources en 2050



- les besoins pour le transport $\sim 4,9$ Gtep/an $>$ biocarburant + 4,2 Gtep/an de fossiles avec émission de CO_2 (séquestration du CO_2 impossible)
- exploiter au maximum les sources non émettrices de CO_2 pour les besoins en chaleur basse et haute température pour le résidentiel/tertiaire et l'industrie

Les principales étapes

47

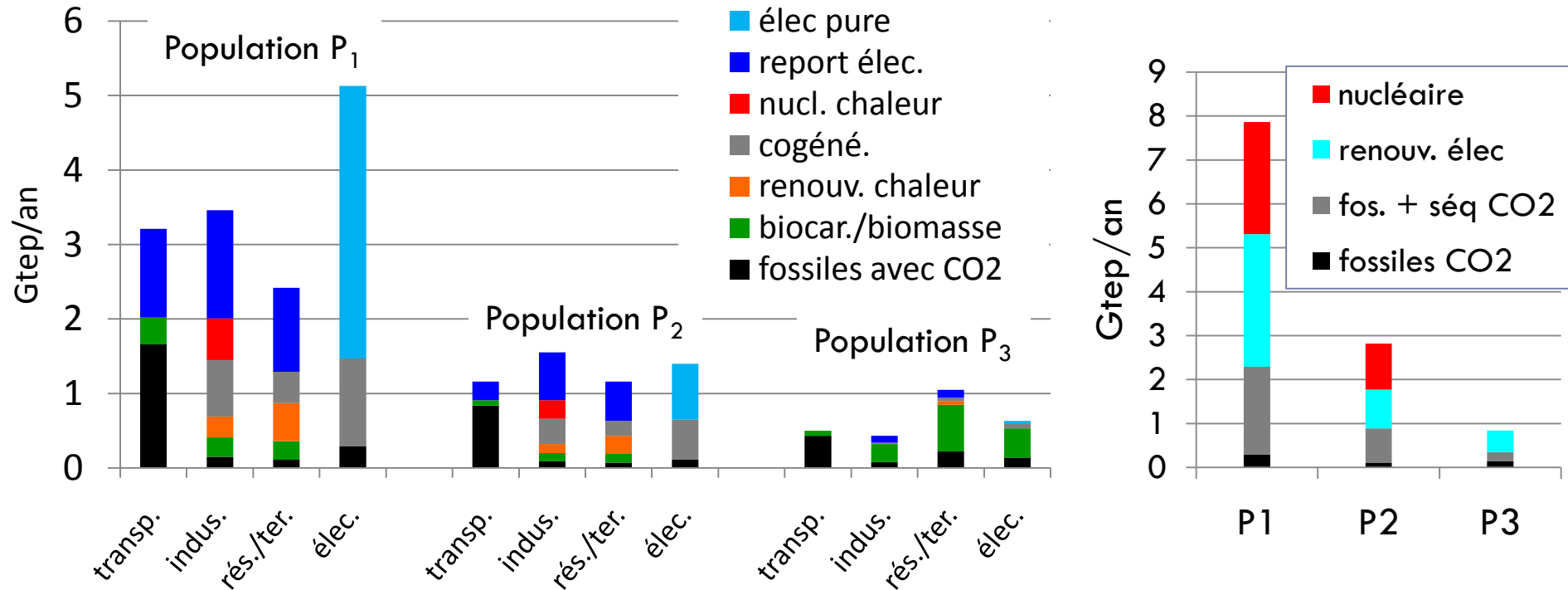
On construit un mix énergétique pour chaque groupe de population P_1 , P_2 et P_3

- Répartition des combustibles fossiles avec émission de CO_2 (4,2 Gtep/an) principalement pour le transport
- Répartition des sources renouvelables pour la chaleur et le transport
 - ▣ biomasse principalement pour les populations rurales P_3
- Production de chaleur à partir de combustibles fossiles avec séquestration du CO_2 et en ayant recours à la cogénération et à partir de nucléaire dédié à la chaleur
- Report des besoins pour le transport et en chaleur sur l'électricité qui s'ajoutent à la demande d'électricité initiale (usages classiques)
 - ▣ énergies renouvelables électriques
 - ▣ fossiles avec séquestration de CO_2
 - ▣ énergie nucléaire

⇒ À partir des mix énergétiques des populations P_1 , P_2 et P_3 on obtient le mix pour chacune des 12 régions du Monde

Les principales étapes

48

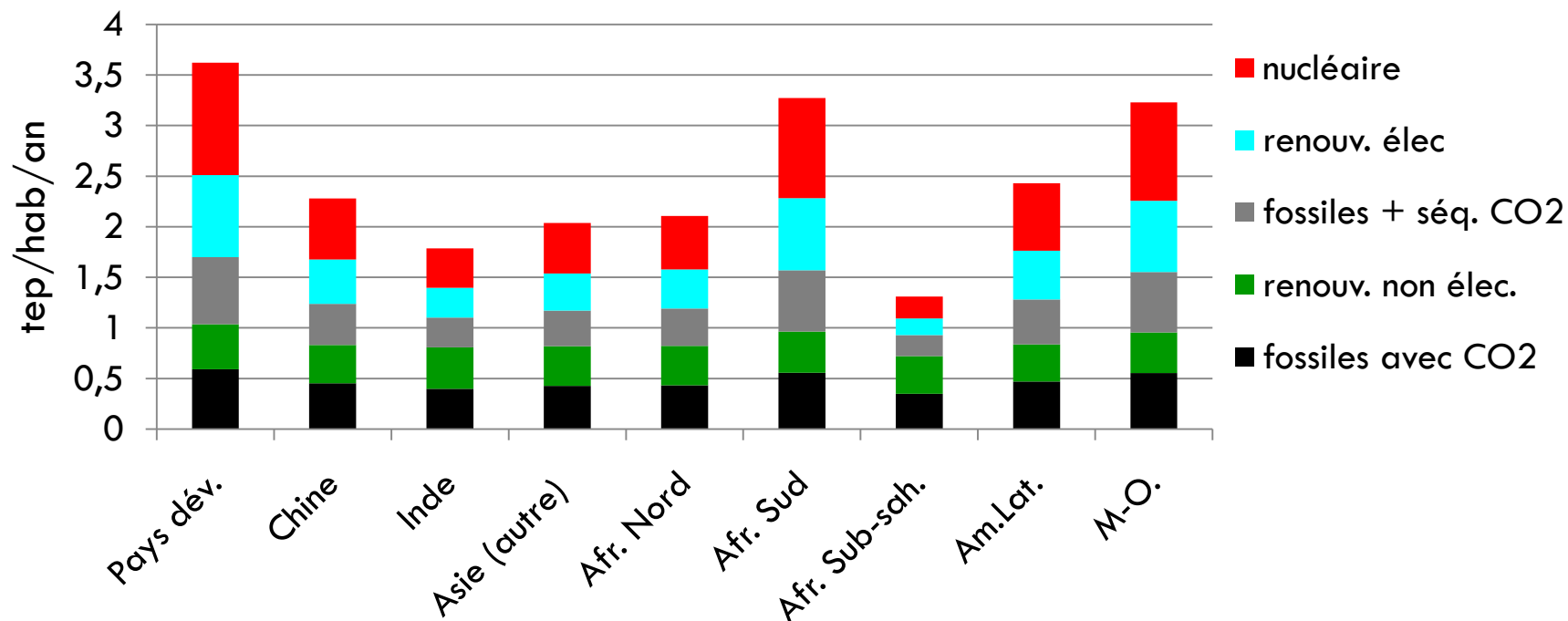


- Prise en compte de la difficulté des populations P₃ à mettre en place des technologies complexes alternatives aux fossiles
- Les sources renouvelables en chaleur ne permettent pas de couvrir une grande part des besoins en chaleur de l'industrie et du résidentiel/tertiaire pour les populations P₁ et P₂
- Recours à la cogénération avec fossiles et séquestration pour minimiser le report sur l'électricité
- Utilisation du nucléaire pour la production directe de chaleur
- La moitié du report sur l'électricité des besoins du résidentiel/tertiaire assurée par des pompes à chaleur

construction d'un monde énergétique en 2050

Mix énergétiques des populations des 12 entités

49



- Emissions de CO₂/hab homogènes au niveau de la planète ~ 1,7 tCO₂/hab/an
- Répartition homogène des renouvelables « chaleur » ~ 0,5 tep/hab/an
- Part des renouvelables « électrique », du nucléaire et de la séquestration CO₂ augmente avec le niveau de développement

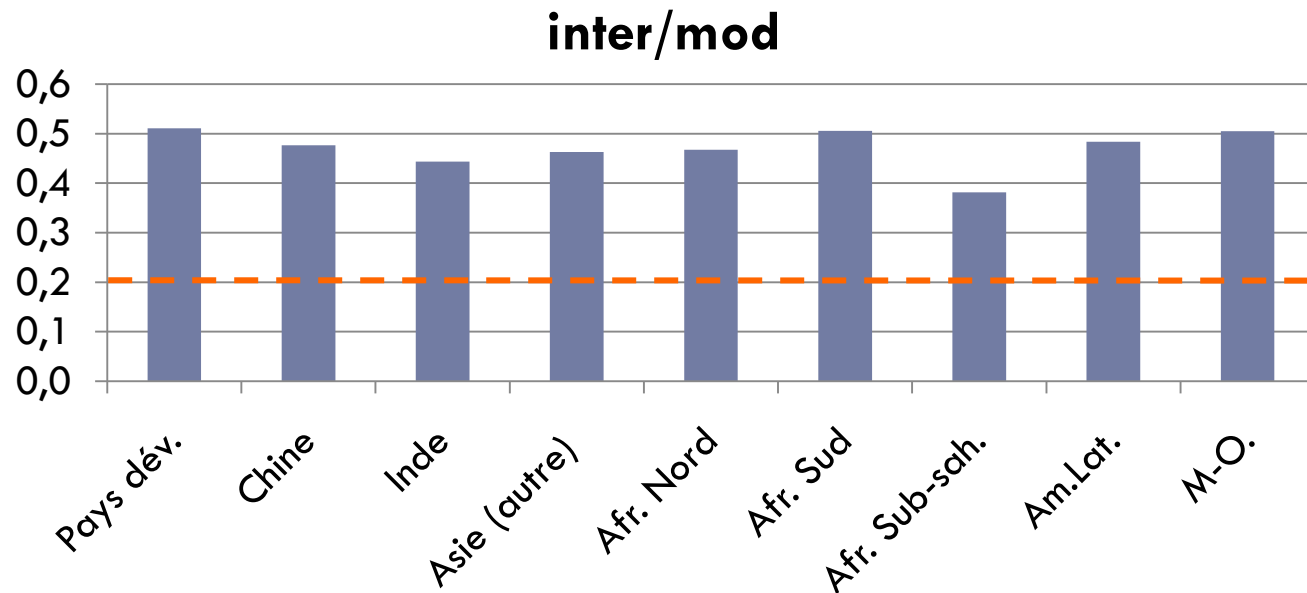
Focus sur l'électricité

50

Production de base : nucléaire, fossiles avec cogénération

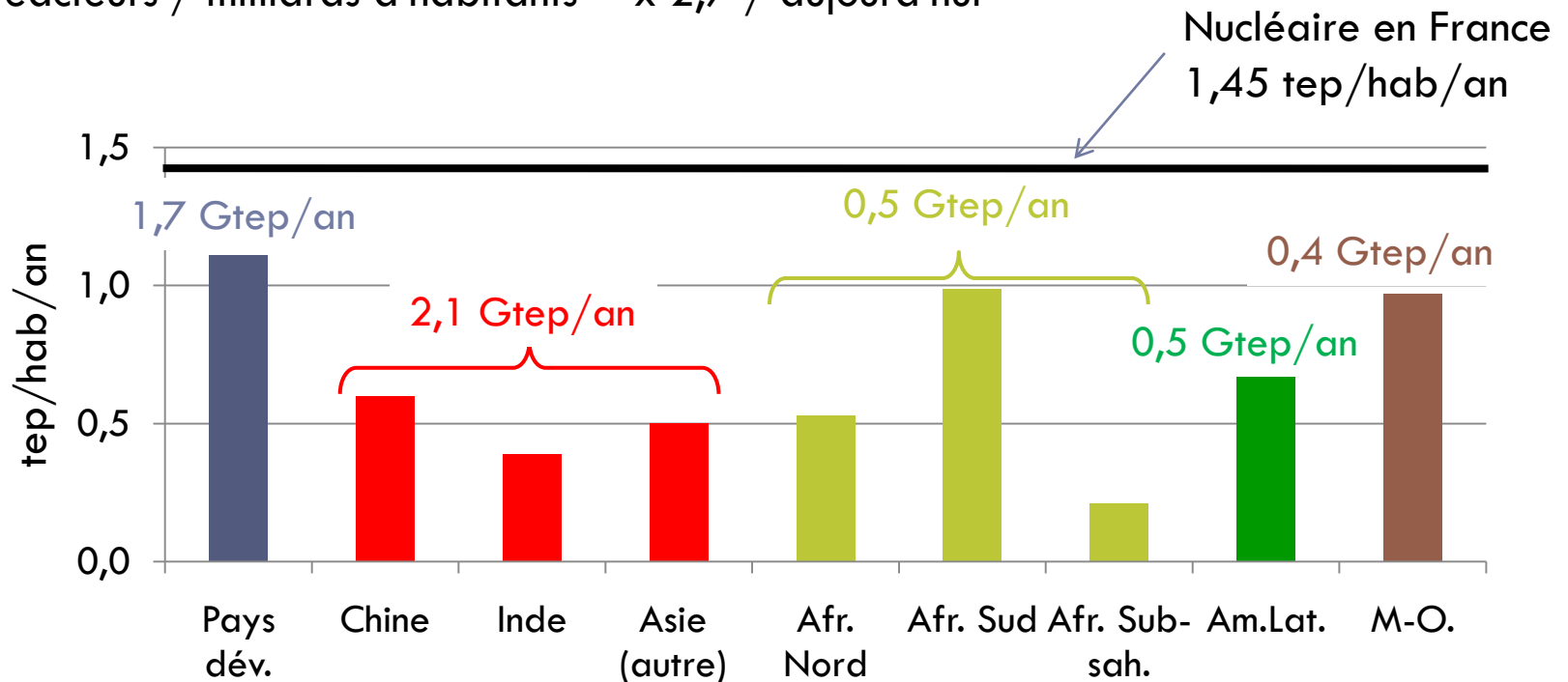
Production modulable : hydraulique, fossiles sans cogénération

Intermittent : PV, éolien, solaire à concentration



- $0,4 < \text{rapport intermittent} / \text{modulable} < 0,5$: incompatible avec la gestion actuelle des réseaux
- Améliorer la gestion de l'intermittence :
 - Stockage grande échelle (pompage/turbinage, batteries, H_2)
 - Transport électrique (30 % du transport)
 - Modulation du nucléaire
 - ...

- production centralisée d'électricité (1 réacteur $\sim 0,8 \text{ GW}_{\text{élec}}$)
- Adaptée aux populations P_1 et P_2 (réseaux existants, forte augmentation des besoins électriques)
- chaleur nucléaire $\sim 0,6 \text{ Gtep/an}$
- nucléaire électrique $\sim 4,25 \text{ Gtep/an}$
- ⇒ Au niveau mondial $\sim 4,85 \text{ Gtep/an} = \times 8$ /aujourd'hui
- ⇒ 1750 réacteurs = $\times 4$ / aujourd'hui
- ⇒ 200 réacteurs / milliards d'habitants = $\times 2,7$ / aujourd'hui



- ❑ Scénario « 20 Gtep/an » sobre et incompatible avec une croissance économique de +2%/an dans les pays riches
- ❑ Déficit en sources d'énergie pour le transport et la production de chaleur : report massif sur l'électricité
- ❑ Les objectifs à atteindre pour les renouvelables sont très ambitieux
- ❑ Comment « nous » convaincre de renoncer à des ressources peu chères, faciles d'accès et d'utilisation
- ❑ Comment rendre acceptable les efforts à mener sur les diverses technologies alternatives ? Les efforts seront visibles mais pas les avantages climatiques
- ❑ Construire une image d'un monde énergétique en 2050 de façon transparente et donc discutable, qui répond à des objectifs clairement énoncés doit aider à l'acceptabilité des efforts à consentir

Quelques références

Agence Internationale de l'Energie , rapports Energy Technology Perspective 2010

<http://www.iea.org/>

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Energie-et-Climat,123-.html>

Associations et autres

Sauvons le climat : <http://www.sauvonsleclimat.org/>

Global Chance : <http://www.global-chance.org/>

Jean-Marc Jancovici : <http://www.manicore.com/>

Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement :

<http://www.centre-cired.fr/>

Laboratoire de l'économie de la production et de l'intégration internationale :

<http://webu2.upmf-grenoble.fr/LEPII/spip/>

Ecole Energies et Recherches : <http://eer2010.in2p3.fr>

Institut Nationale de l'Energie Solaire : <http://www.ines-solaire.com/outils.htm>