

ANNALES DE PHYSIQUE

# Construction d'un monde énergétique en 2050

S. Bouneau, S. David, J.-M. Loiseaux, O. Méplan



# Construction d'un mix énergétique en 2050

Sandra Bouneau  
Institut de Physique Nucléaire - Orsay

Travail réalisé dans le cadre du « Programme Interdisciplinaire Energie » du CNRS, groupe « nucléaire du futur », en collaboration avec Jean-Marie Loiseaux et Olivier Méplan du LPSC-Grenoble, et Sylvain David de l'IPN d'Orsay

## 1<sup>ère</sup> partie : répartition de la demande d'énergie dans le Monde en 2050

- ✓ Perspectives d'évolution en termes de population et de demande énergétique
- ✓ Choix des hypothèses retenues
- ✓ Les fondements de notre démarches

## 2<sup>ème</sup> partie : la construction d'un mix énergétique en 2050

- ✓ Principales étapes
- ✓ Résultats

## Contexte énergétique mondial actuel

Consommation totale (2005)	~ 11 milliards de tep /an
Population	~ 6,5 milliards
Consommation / hab	~ 1,7 tep/an (~ 2300 W)

Source	(Gtep/an)
Fossiles	9,1
Pétrole / gaz / charbon	3,5 / 2,8 / 2,8
Biomasse Traditionnelle	0,6 – 1,2
Hydraulique	0,7
Nucléaire	0,6
Nouveaux renouvelables (solaire, éolien, biomasse)	0,03
<b>Total</b>	<b>11,3</b>

# Répartition de la consommation énergétique par zones géographiques

Grandes régions géographiques	Conso. totale (Gtep/an)	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
<b>total</b>	<b>11,2</b>	<b>6582</b>	<b>1,7</b>

pays riches : 6,7 Gtep/an  
 ~ 20 % de la population totale  
 ~ 60 % de la consommation totale

pays émergents : 4 Gtep/an  
 ~ 50 % de la population totale est en Asie

pays pauvres : 0,5 Gtep/an

## Des inégalités énormes

pays riches  $C_1 \sim 4,8$  tep/hab/an  
 pays émergents  $C_2 \sim 1$  tep/hab/an  
 pays pauvres  $C_3 \sim 0,5$  tep/hab/an

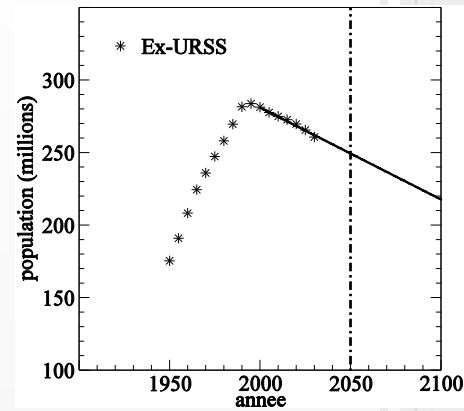
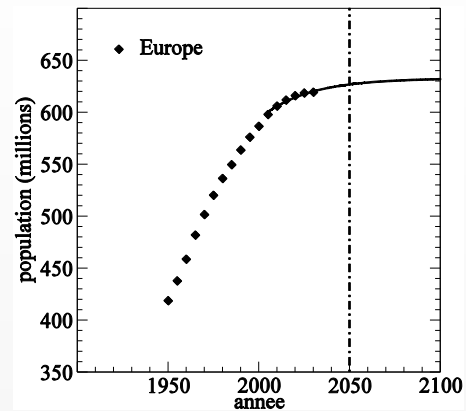
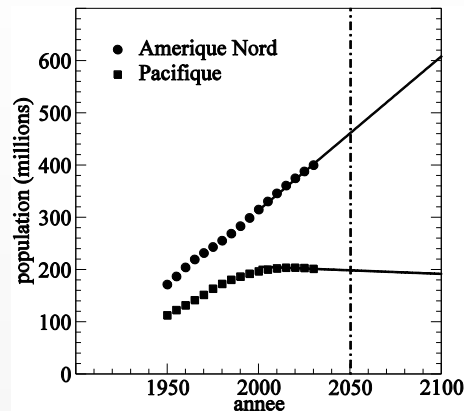
$$C_1/C_3 \sim 9,5 \quad C_2/C_3 \sim 2 \quad C_3/C_3 = 1$$

Les clés d'inégalité sur la consommation d'énergie : 9,5 / 2 / 1

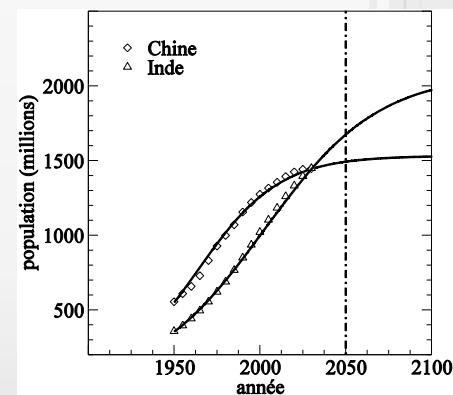
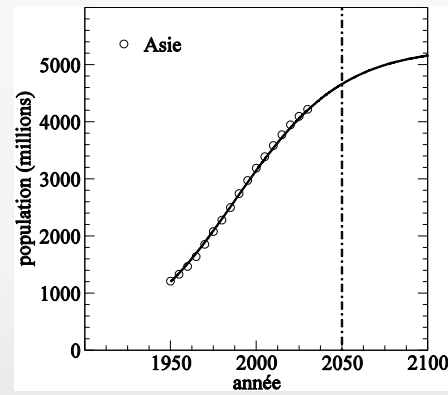
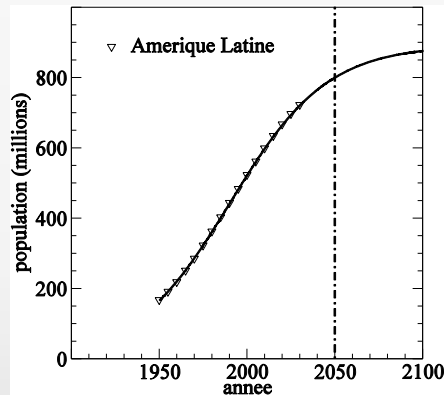
# Evolution de la population mondiale

(projection ONU jusqu'en 2030 + extrapolation jusqu'en 2050)

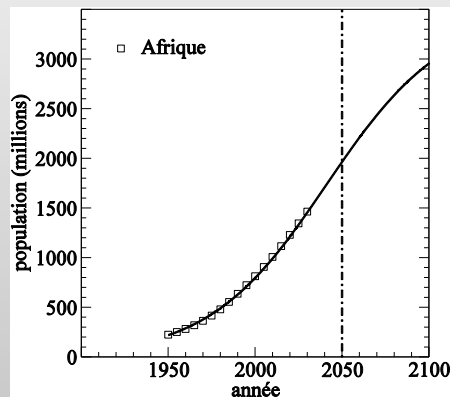
Les pays riches actuels



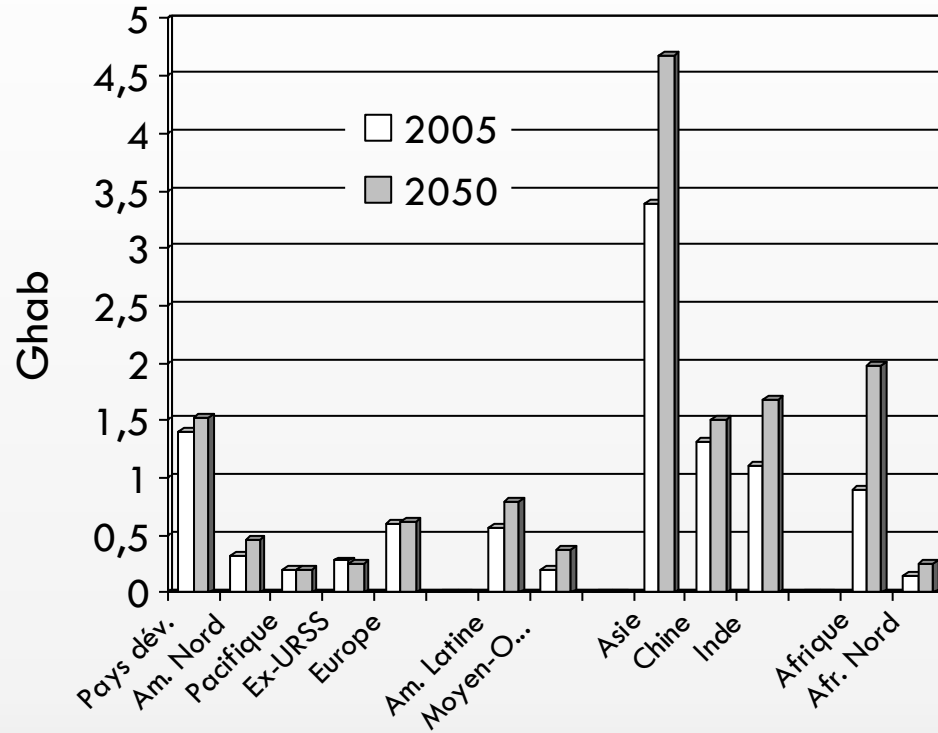
Les pays émergents actuels



Les pays pauvres actuels



# Population mondiale en 2050



Projection de la population mondiale en 2050 → ~ 9 milliards

## Répartition en 2050 :

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

# Estimation de la consommation mondiale en 2050

## Ordres de grandeur simplistes

conso. moyenne en 2050 = conso. moyenne actuelle  
~ 1,7 tep/hab./an

$$\Rightarrow E_{\text{Monde}} = 15,3 \text{ Gtep/an}$$

conso. moyenne en 2050 = conso. actuelle des pays riches  
~ 4 tep/hab./an

$$\Rightarrow E_{\text{Monde}} = 36 \text{ Gtep/an}$$

Études technico-économiques (IIASA, WEC, POLES, ...) :  $15 \text{ Gtep/an} < E_{\text{monde}} < 25 \text{ Gtep/an}$

**⇒ Choix de la demande mondiale d'énergie en 2050 : 20 Gtep/an**

# Les hypothèses initiales de la construction du mix énergétique en 2050

- ✓ population mondiale ~ 9 milliards d'habitants
- ✓ consommation d'énergie ~ 20 Gtep/an
  
- ✓ persistance des inégalités dans le monde mais l'émergence des pays se traduit par des inégalités au sein même de leur population
- ➔ 3 niveaux de consommation maintenus  $C_1/C_2/ C_3$  : élevé, modéré et faible
- ➔ population totale de chaque grande zone géographique se décompose en 3 catégories  $P_1/P_2/P_3$
- ➔ Les populations  $P_1/P_2/P_3$  de chaque grande zone géographique auront des niveaux de consommation d'énergie  $C_1/C_2/ C_3$  identiques partout dans le monde.

Simplicité de la démarche  $P_1^{Monde} C_1 + P_2^{Monde} C_2 + P_3^{Monde} C_3 = E_{tot}^{Monde} = 20 \text{ Gtep/an}$

Clé d'inégalité fixée  $\frac{C_1}{C_3} / \frac{C_2}{C_3} / \frac{C_3}{C_3} \Rightarrow \left[ P_1^{Monde} \frac{C_1}{C_3} + P_2^{Monde} \frac{C_2}{C_3} + P_3^{Monde} \right] C_3 = E_{tot}^{Monde}$

Objectif à atteindre en 2050

inégalités persistantes mais réduites : **4 / 2 / 1**

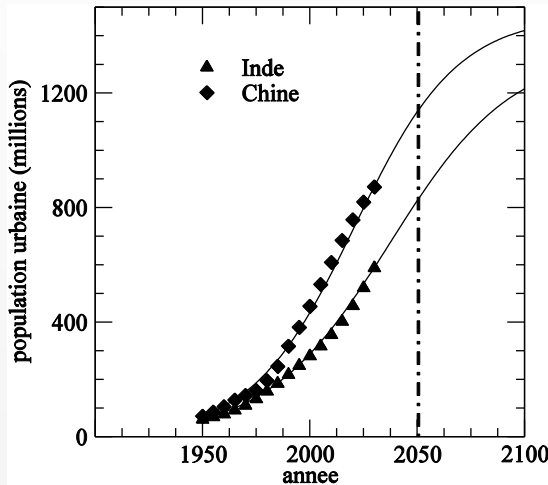
➔ Il faut maintenant répartir la population mondiale selon  $P_1^{Monde} / P_2^{Monde} / P_3^{Monde}$



# répartition de la population mondiale dans les catégories $P_1/P_2/P_3$

## ➔ Choix d'un seul paramètre « pertinent » : le taux d'urbanisation

(projection ONU jusqu'en 2030 + extrapolation jusqu'en 2050)



A partir des 8 grandes régions géographiques, nouveau « découpage » :  
Chine, Inde, reste de l'Asie  
Afrique Nord, Sud et Sub-saharienne

⇒ 12 entités économiques

Règles de répartition des populations urbaine et rurale dans  $P_1/P_2/P_3$  pour chaque entité

**pays riches actuels** { populations urbaine et rurale dans  $P_1$

**pays émergents actuels** { population urbaine : 50 % dans  $P_1$ , 50 % dans  $P_2$   
population rurale : 100 % dans  $P_3$

**Afrique sub-saharienne** { population urbaine : 50 % dans  $P_2$ , 50 % dans  $P_3$   
population rurale : 100 % dans  $P_3$

# Résultats d'étape

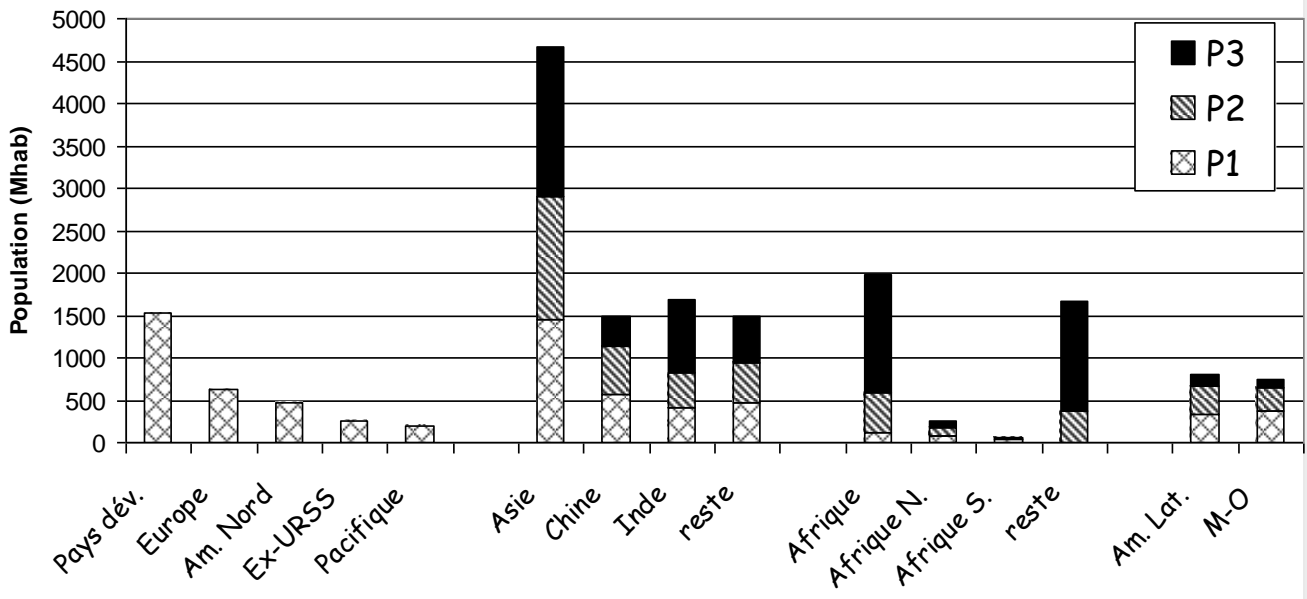
Répartition des populations P<sub>1</sub>/P<sub>2</sub>/P<sub>3</sub> pour chaque entité

⇒

$$\sum_{12 \text{ entités}} P_1^{\text{entité}} = P_1^{\text{Monde}} \sim 3,7 \text{ Ghab}$$

$$\sum_{12 \text{ entités}} P_2^{\text{entité}} = P_2^{\text{Monde}} \sim 2,3 \text{ Ghab}$$

$$\sum_{12 \text{ entités}} P_3^{\text{entité}} = P_3^{\text{Monde}} \sim 3,3 \text{ Ghab}$$



$$E_{\text{tot}}^{\text{Monde}} = 20 \text{ Gtep/an} + \text{choix des clés d'inégalités en 2050: } 4 / 2 / 1$$

⇒ C<sub>1</sub> = 3,5 tep/hab      C<sub>2</sub> = 1,75 tep/hab      C<sub>3</sub> = 0,87 tep/hab

En 2009 : C<sub>1</sub> ~ 4,8 tep/hab      C<sub>2</sub> ~ 1 tep/hab      C<sub>3</sub> ~ 0,5 tep/hab

La réduction des inégalités d'un facteur 2 entre les niveaux de consommations d'énergie dans un scénario « 20 Gep/an »

⇔ niveau élevé ↘ ~ 30 %, niveaux modéré et faible ↗ ~ 75 %

# Objectif supplémentaire à atteindre en 2050

## La contrainte climatique

### Actuellement

~ 49 Gt  $\text{eq. CO}_2/\text{an}$

29 Gt  $\text{CO}_2/\text{an}$  issues des fossiles

~ 4,5 t  $\text{CO}_2/\text{hab}/\text{an}$

consommation de fossiles ~ 9 Gtep/an

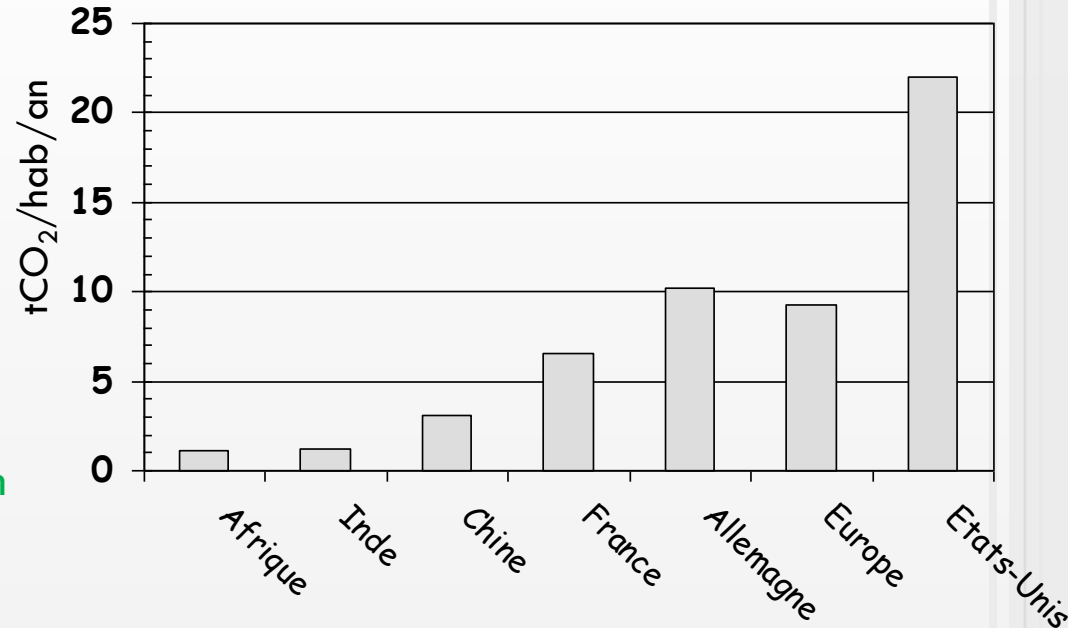
→ 80 % de la consommation mondiale

Encore des inégalités énormes :

pays riches  $F_1 \sim 4,2 \text{ tep}/\text{hab.}/\text{an}$

pays émergents  $F_2 \sim 0,7 \text{ tep}/\text{hab.}/\text{an}$

pays pauvres  $F_3 \sim 0,3 \text{ tep}/\text{hab.}/\text{an}$



⇒ clés d'inégalité sur la consommation des fossiles : 14 / 2 / 1

### Objectif 2050

Pour limiter l'augmentation de la température de 2,4 à 2,8 °C

⇒ réduction des émissions de  $\text{CO}_2$  d'un facteur 2 à 3 (scénario II du GIEC)

⇒ réduire la consommation mondiale des combustibles fossile d'un facteur 2

~ 14 Gt  $\text{CO}_2/\text{an}$

⇒ consommation totale de fossiles  $F_{\text{tot}}^{\text{Monde}} \sim 4,2 \text{ Gtep}/\text{an}$

Si les fossiles continuent à satisfaire 80 % des besoins en 2050 des pays riches (1,5 Ghab) la consommation des fossiles seraient de 4,2 Gtep/an

Simplicité de la démarche  $P_1^{\text{Monde}} F_1 + P_2^{\text{Monde}} F_2 + P_3^{\text{Monde}} F_3 = F_{\text{tot}}^{\text{Monde}} = 4,2 \text{ Gtep}$

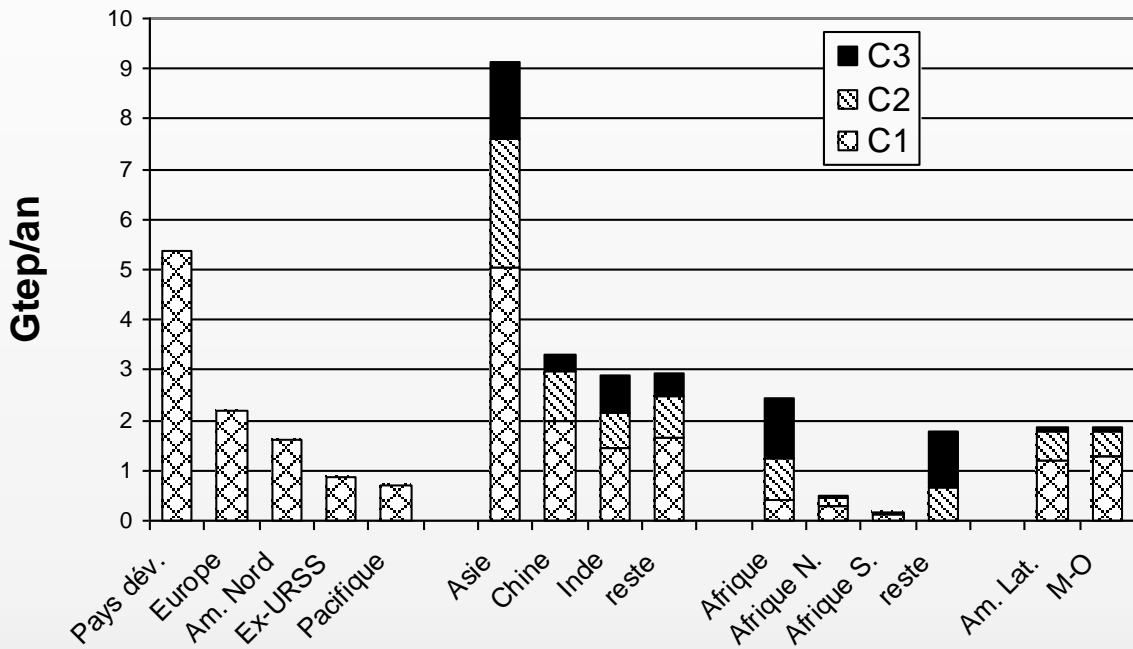
Clé d'inégalité fixée  $\frac{F_1}{F_3} / \frac{F_2}{F_3} / \frac{F_3}{F_3} \Rightarrow \left[ P_1^{\text{Monde}} \frac{F_1}{F_3} + P_2^{\text{Monde}} \frac{F_2}{F_3} + P_3^{\text{Monde}} \right] F_3 = F_{\text{tot}}^{\text{Monde}}$

Choix d'une clé d'inégalité  $\frac{F_1}{F_3} / \frac{F_2}{F_3} / \frac{F_3}{F_3} = 2 / 1,4 / 1$  plus drastique que  $\frac{C_1}{C_3} / \frac{C_2}{C_3} / \frac{C_3}{C_3} = 4 / 2 / 1$

$\Rightarrow F_1 = 0,6 \text{ tep/hab/an} \quad F_2 = 0,42 \text{ tep/hab/an} \quad F_3 = 0,3 \text{ tep/hab/an}$

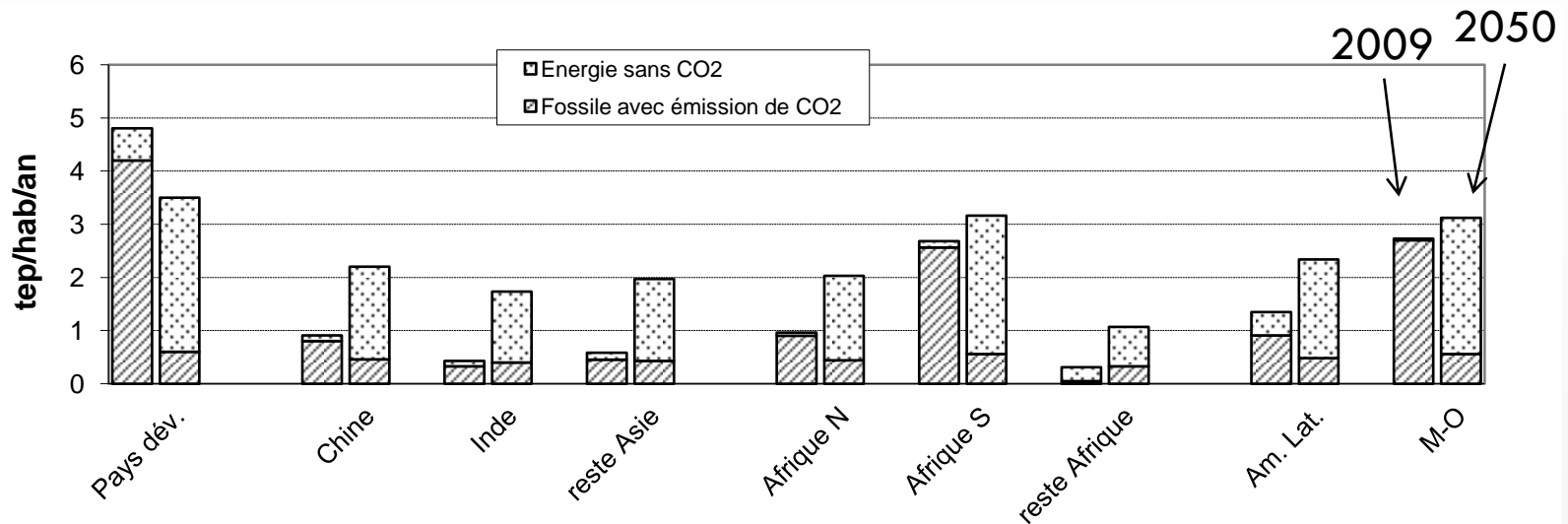
# Premières conclusions

✓ 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 %

## Premières conclusions



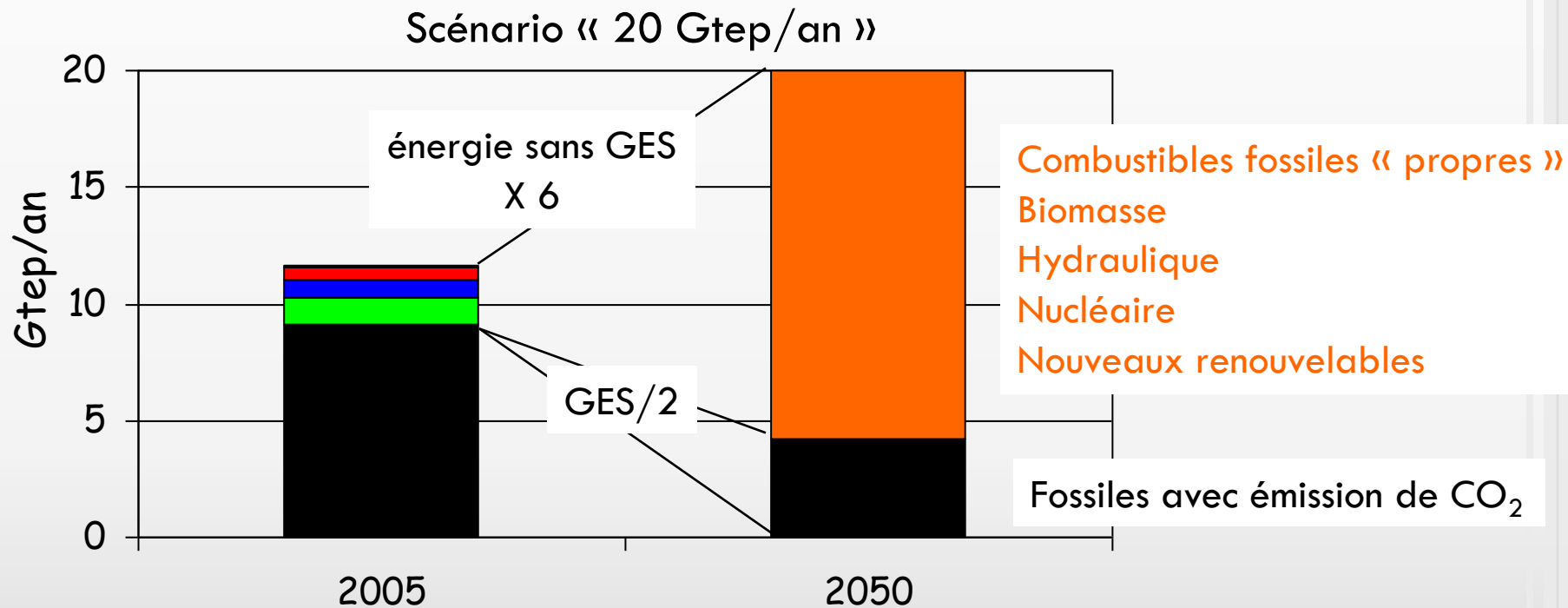
- ✓ Scénario « 20 Gtep/an » avec des inégalités réduites en 2050
  - Consommation d'énergie des populations les plus favorisées réduite de 30 %
  - Augmentation des niveaux de consommation modérés et faibles de 75 %
- ✓ La contrainte climatique est déterminante pour bâtir le mix énergétique en 2050
  - Les sources non émettrices de CO<sub>2</sub> devront couvrir 85 % des besoins des pays riches actuels et assurer l'augmentation de la consommation des pays émergents actuels

Les résultats quantitatifs résultent d'hypothèses simples et d'une démarche explicitée compréhensible / « criticable » / « améliorable »

## 2<sup>ème</sup> partie : construction d'un mix énergétique



# Construction du mix énergétique en 2050





# potentiel des sources non émettrices de CO<sub>2</sub> hors nucléaire et charbon « propre »

(World Energy Council)

Hydraulique	2 Gtep/an	] électricité
PV	0,5 Gtep/an	
Éolien	1 Gtep/an	
Solaire concentré	1 Gtep/an	
Bois	2 Gtep/an	] électricité et chaleur
Géothermie	0,3 Gtep/an	
Solaire thermique	0,5 Gtep/an	] chaleur
Biocarburant	0,5 Gtep/an	] transport
<hr/>		
TOTAL	7,8 Gtep/an	

⇒ Compter sur l'énergie fossile avec séquestration du CO<sub>2</sub> et l'énergie nucléaire en 2050

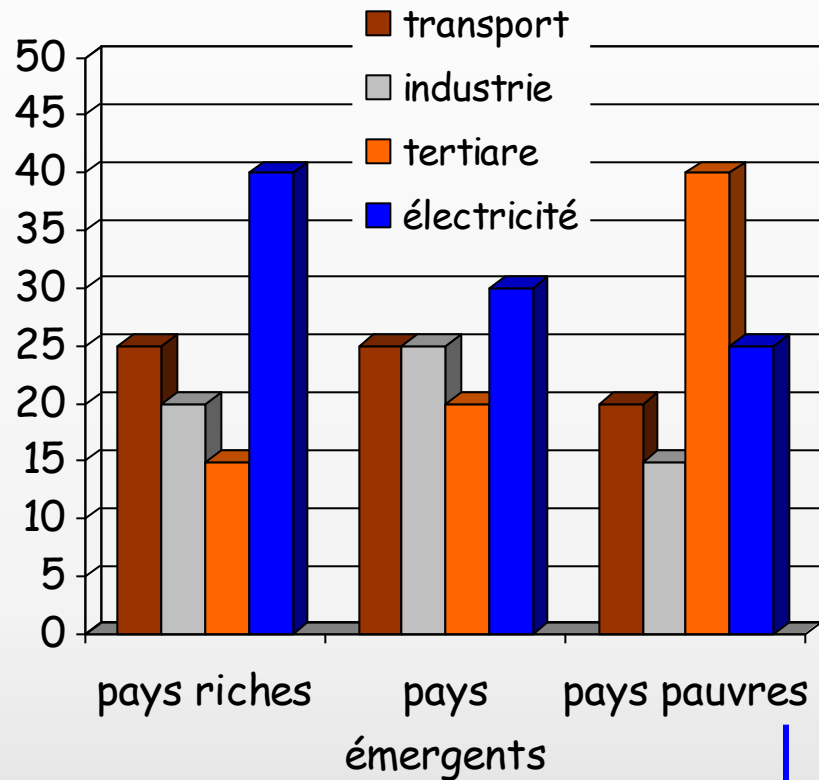
✓ ~ 8 Gtep/an

✓ Utilisées essentiellement pour la production d'électricité centralisée

⇒ Adéquations entre les usages des sources et les besoins ?

# quantification des besoins en 2050 par secteur de consommation

% de la consommation totale d'énergie actuelle



Transport ~ 2,8 Gtep

→ pétrole (~ 95 %)

→ biocarburant

Industrie ~ 2,3 Gtep

chaleur à haute température

→ charbon et gaz (~ 100 %)

Tertiaire ~ 2 Gtep

chaleur à basse température

→ fuel et gaz (~ 70 %)

→ biomasse

Electricité ~ 4 Gtep

- réseaux électriques peu développés
- 1,5 milliards d'individus n'ont toujours pas accès à l'électricité

En 2050

population  $P_1$   
( $E_1 = 13$  Gtep/an)

population  $P_3$   
( $E_3 = 2,9$  Gtep/an)

population  $P_2$   
( $E_2 = 4,1$  Gtep/an)

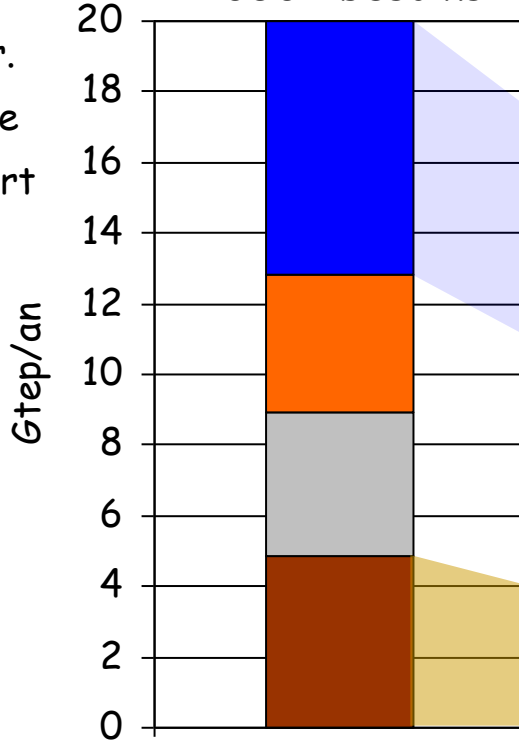
# Adéquation sources/besoins

1 tep « thermique » = 42 GJ

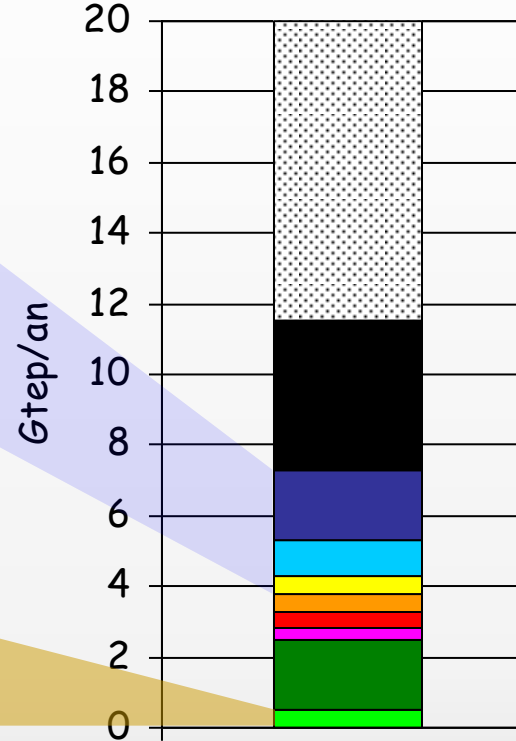
Convention : 1 tep « électrique » = 45 MWh

- élec.
- res./ter.
- industrie
- transport

2050 : besoins



2050 : sources



- nucl. + fos. sans CO<sub>2</sub>
- fos. avec CO<sub>2</sub>
- hydraulique
- éolien
- solaire PV
- solaire therm.
- solaire conc.
- géothermie
- bois
- biocarburant

- les besoins pour le transport ~ 4,9 Gtep/an > biocarburant + 4,2 Gtep/an de fossiles avec émission de CO<sub>2</sub> (séquestration du CO<sub>2</sub> impossible)
- énergie nucléaire + combustibles fossiles avec séquestration CO<sub>2</sub> adaptées à une production électrique centralisée : réservée aux populations urbaines P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>

⇒ exploiter au maximum les sources non émettrices de CO<sub>2</sub> pour les besoins en chaleur basse et haute température pour le résidentiel/tertiaire et l'industrie

# Les principales étapes de la construction du mix énergétique

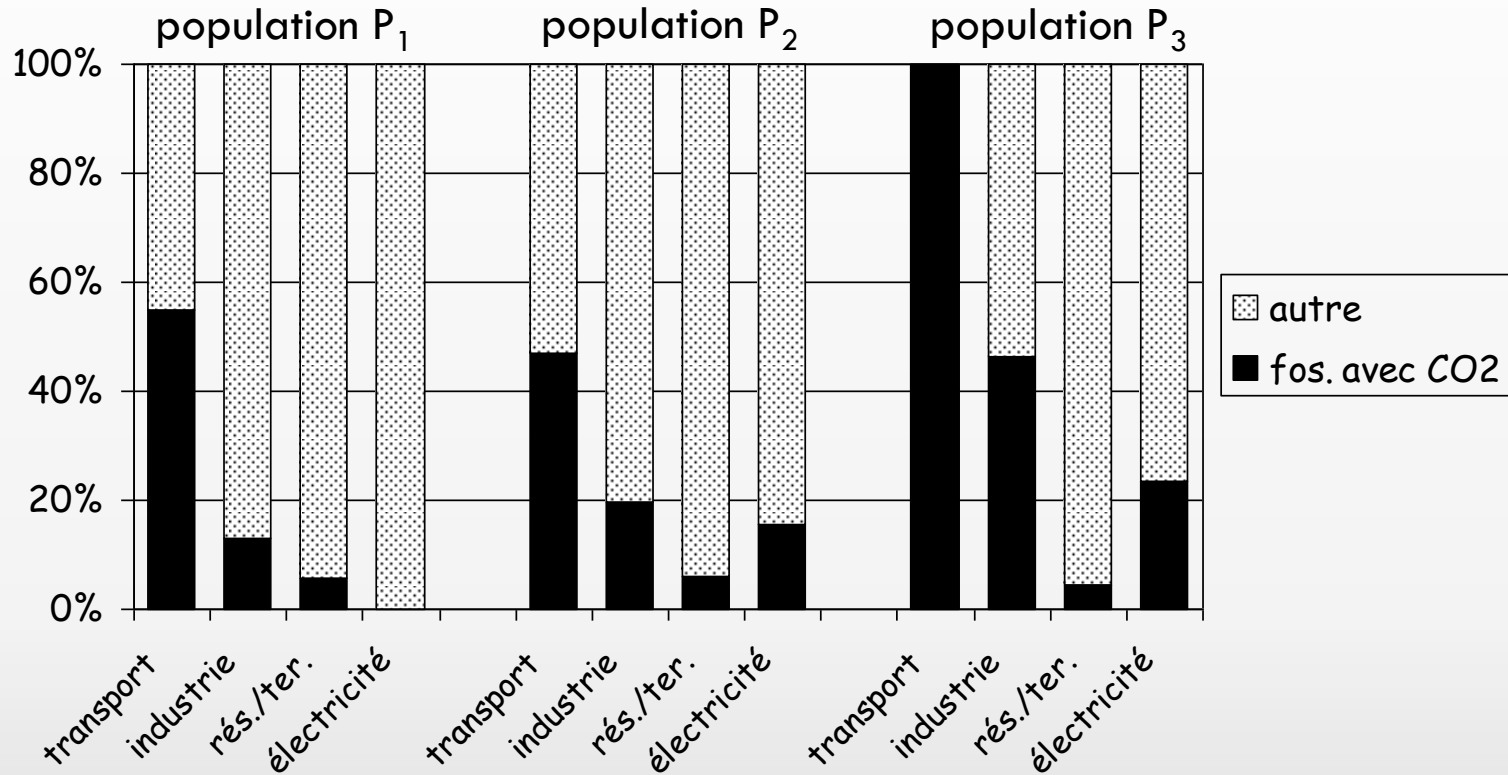
On construit un mix énergétique pour  $P_1/P_2/P_3$

- ✓ Répartition des combustibles fossiles avec émission de  $\text{CO}_2$  (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  $\text{CO}_2$  avec cogénération
- ✓ 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  $\text{CO}_2$
  - énergie nucléaire

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

# Construction du mix énergétique pour chaque catégorie de population $P_1/P_2/P_3$

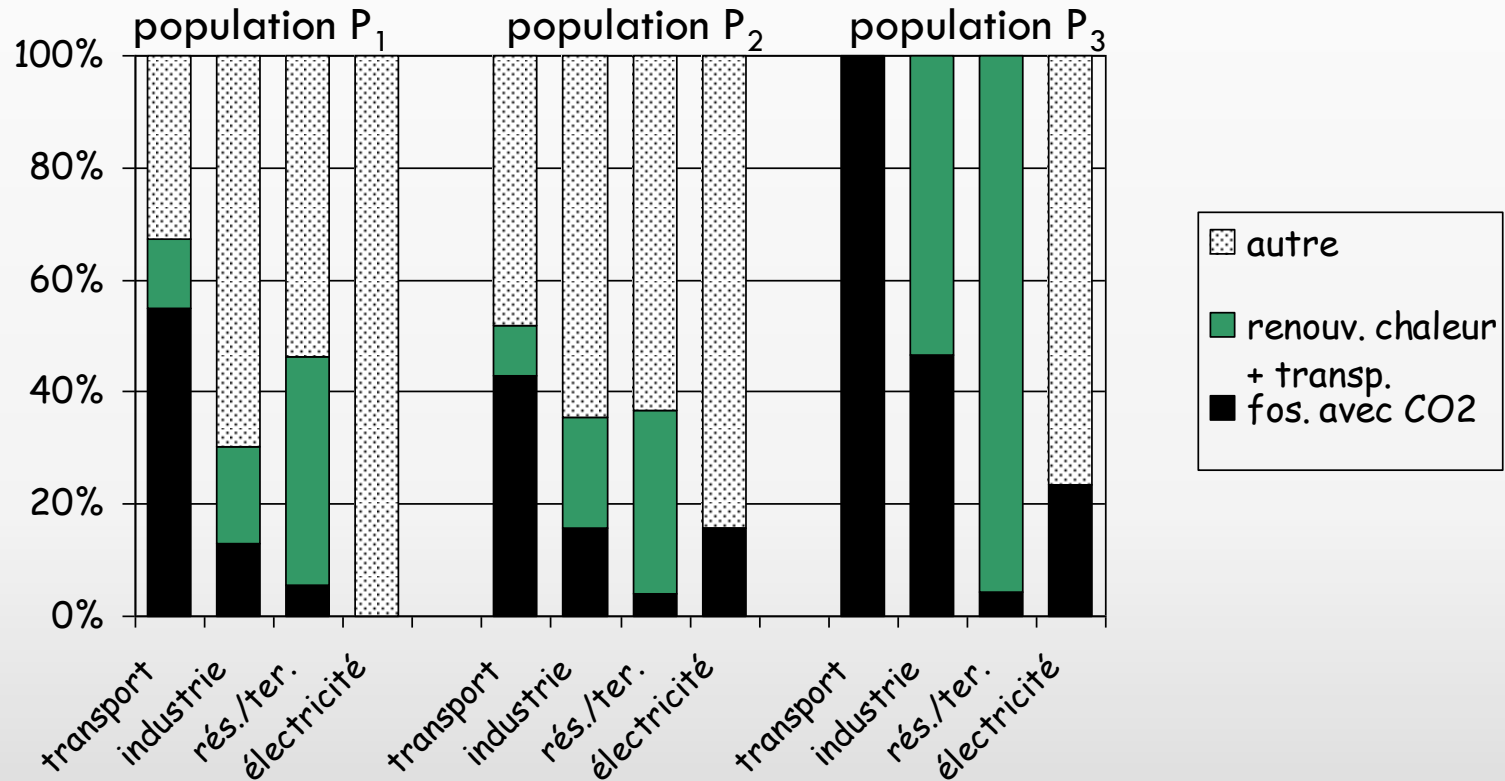
**Etape 1/4 : répartition des combustibles fossiles avec émission de  $CO_2$  (4,2 Gtep/an)**



- prise en compte de la difficulté des populations les plus défavorisées à mettre en œuvre des technologies alternatives à l'utilisation des fossiles
- les populations les plus favorisées devront trouver des sources alternatives aux fossiles pour satisfaire une grande part de leurs besoins en chaleur ... et en électricité

## Etape 2/4 : répartition des sources renouvelables au maximum de leur potentiel pour les besoins en chaleur et pour le transport

- au prorata des besoins des populations  $P_1$  et  $P_2$
- pour la population  $P_3$ , la totalité des besoins sont couverts par la biomasse traditionnelle et le solaire thermique.



→ les combustibles fossiles avec émissions de CO<sub>2</sub> et les sources renouvelables pour le transport et la production de chaleur ne suffisent pas à ouvrir la totalité des besoins des populations P<sub>1</sub> et P<sub>2</sub>

## Étape 3/4 : les reports sur l'électricité ?

~ 30 % des besoins pour les transports sont reportés sur l'électricité.

Pour les besoins manquants de l'industrie et du résidentiel/tertiaire : le report sur l'électricité n'est pas souhaitable

- explosion de la consommation électrique
- absurde si l'électricité est d'origine thermique

- ⇒ utilisation des combustibles fossiles avec séquestration de CO<sub>2</sub> + cogénération
- ⇒ utilisation du nucléaire pour la production directe de chaleur

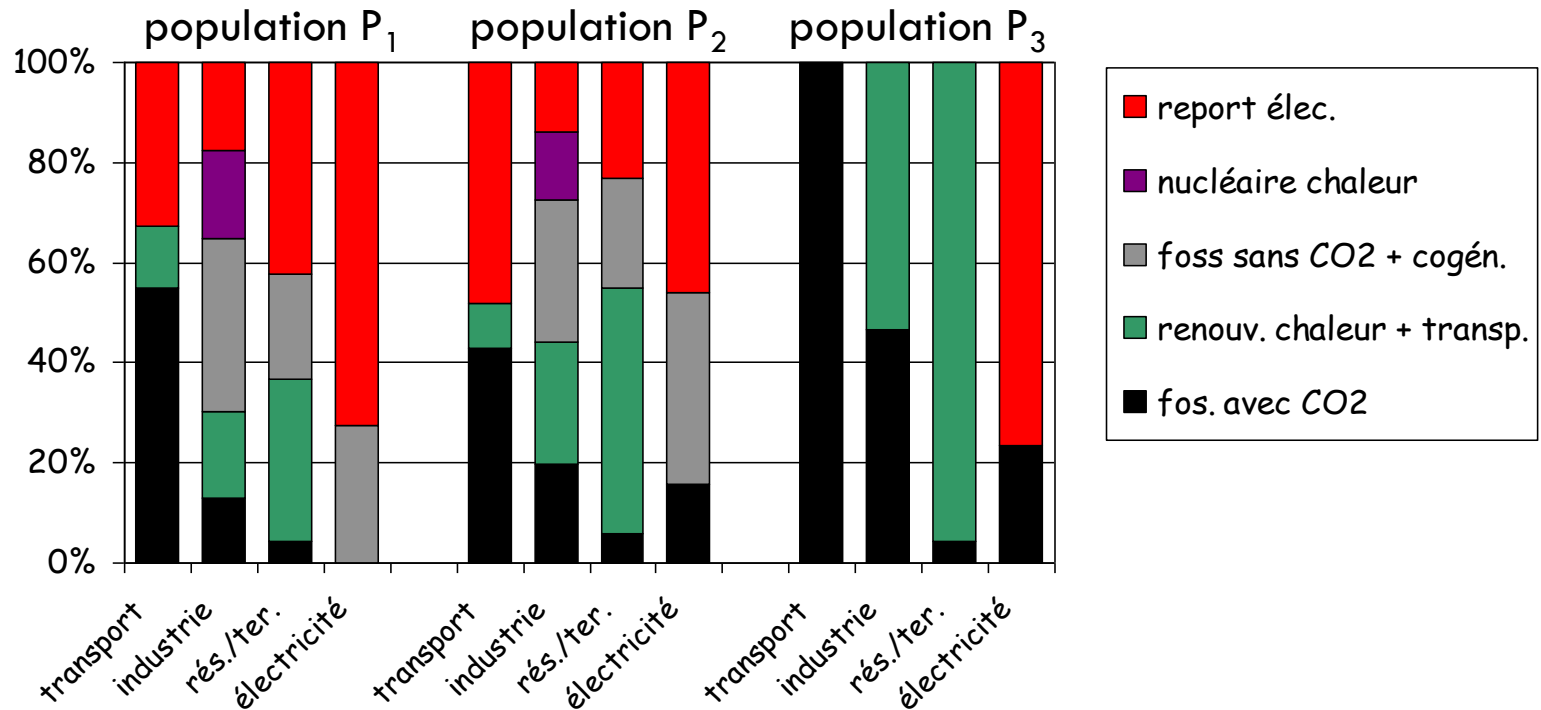
### Limitations :

- proximité site séquestration CO<sub>2</sub> / site industriel
- sites de production éloignés des habitations (réseaux de chaleur performants)
- nucléaire : besoins en chaleur « industrielle » nécessairement concentrés

### Étape 3/4 :

- ⇒ fossiles avec séquestration de CO<sub>2</sub> ~ 25 % des besoins en chaleur (~ 2 Gtep/an)
- ⇒ « chaleur nucléaire » ~ 8 % des besoins en chaleur (0,6 Gtep/an)

## Étape 4/4 : reports sur l'électricité



l'énergie manquante « ultime » est reportée sur l'électricité.

Au final :

- usages classiques ~ 7,1 Gtep/an
- 30 % des transports ~ 1,4 Gtep/an
- report chaleur industrie ~ 1,5 Gtep/an
- report chaleur rés./ter. ~ 1,8 Gtep/an
- hypothèse : la moitié des besoins = PAC ( $\varepsilon = 3$ )  
⇒ 1,2 Gtep/an
- production électrique par cogénération ~ 1,9 Gtep/an

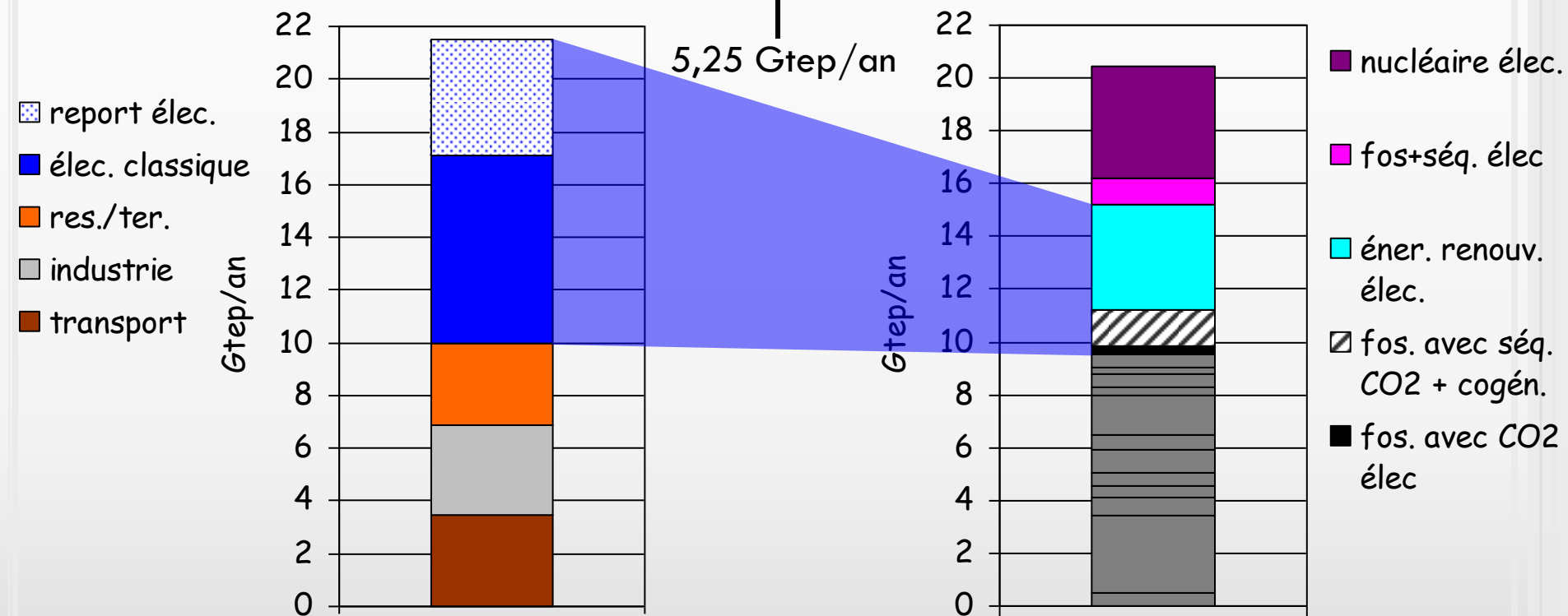
} = 9,3 Gtep/an



**Étape 4/4 : répartition des sources non émettrices de CO<sub>2</sub> et productrices d'électricité au maximum de leur potentiel (solaire PV, éolien, hydraulique, solaire à concentration) au prorata des besoins des populations P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> et P<sub>3</sub>**

énergie manquante  
pour la production électrique

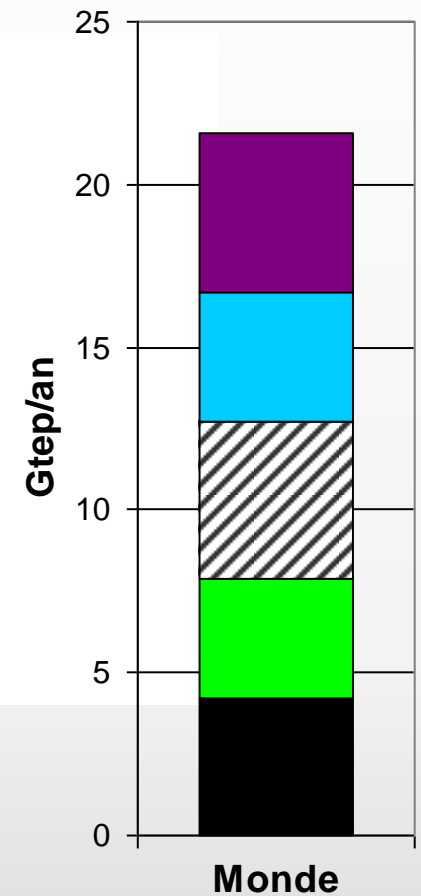
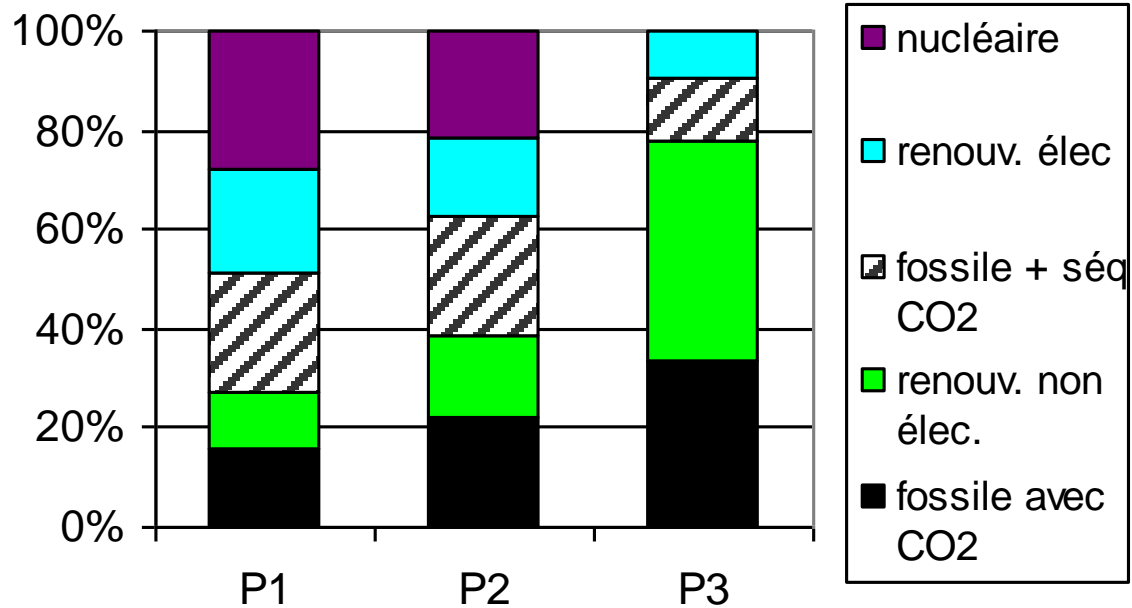
5,25 Gtep/an



**Fossiles avec séquestration = 2,7 Gtep/an (cogénération) + 1 Gtep/an (électricité « pure ») ⇒ besoins en séquestration du CO<sub>2</sub> en 2050 d'environ 12 GtCO<sub>2</sub>/an**

**Nucléaire = 0,6 Gtep/an (chaleur) + 4,25 Gtep/an (électricité « pure »)**

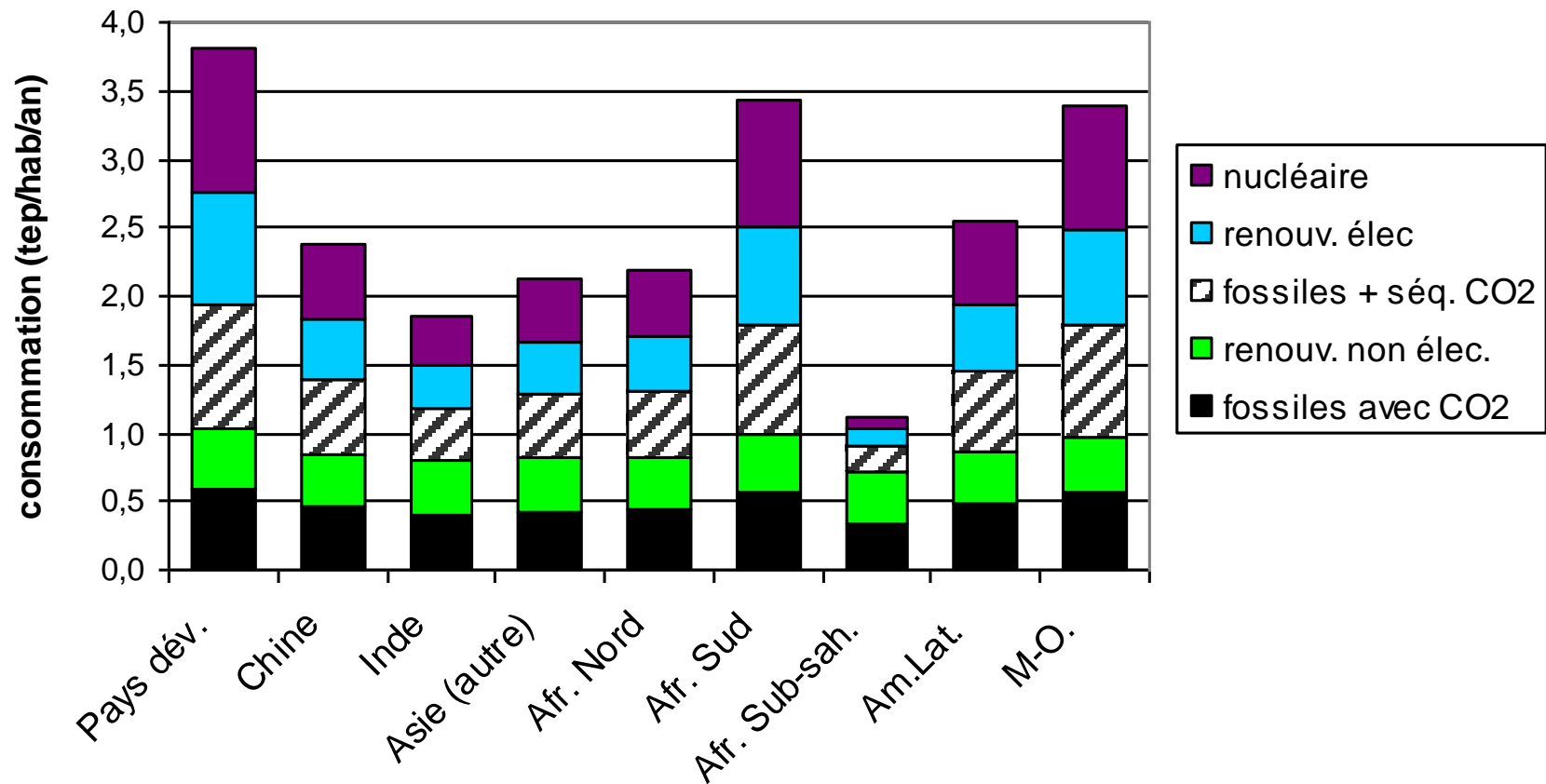
## Mix énergétique pour chaque groupe de population $P_1/P_2/P_3$



✓ Changement « radical » pour  $P_1$  et  $P_2$ , par rapport aux pays développés actuels (80 % de fossiles actuellement)

✓ Mix pour  $P_3$  assez proche de la situation actuelle des pays pauvres (fossiles + biomasse), mais renouvelable électrique et séquestration  $\text{CO}_2$  tout de même nécessaires

## Mix énergétique pour chaque entité économique



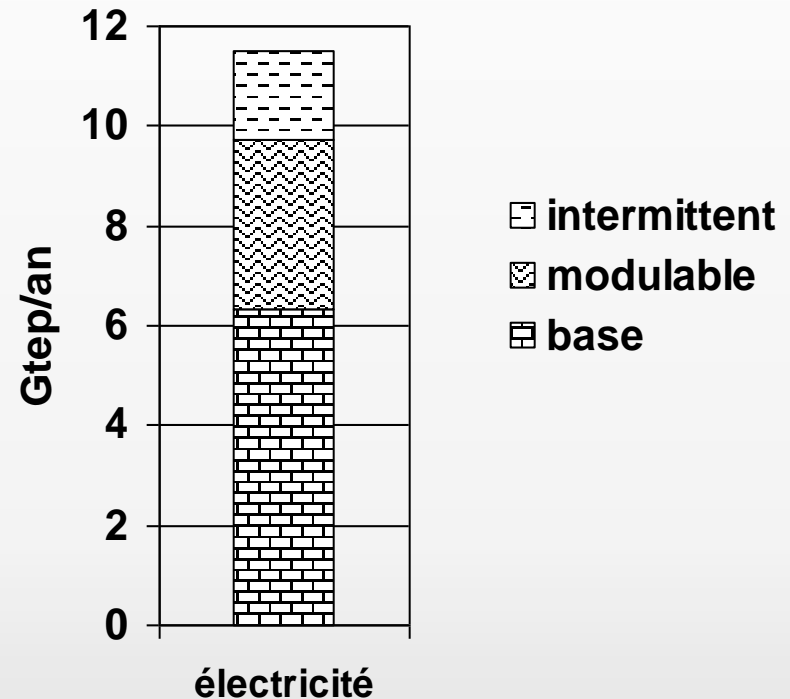
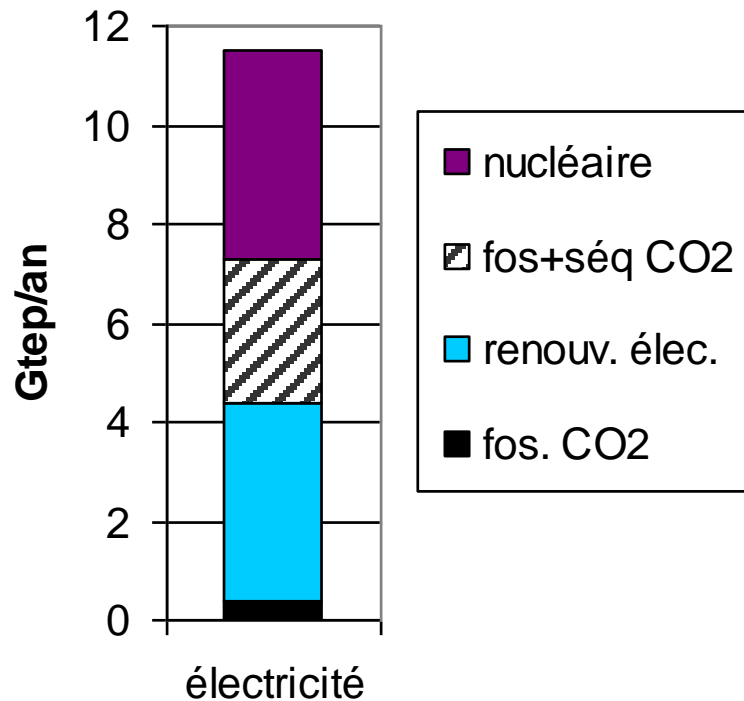
- ✓ Emissions de CO<sub>2</sub> / hab homogènes au niveau de la planète ~ 1,7 tCO<sub>2</sub>/hab/an
  - ✓ Les renouvelables « chaleur » se répartissent de manière homogène ~ 0,5 tep/hab/an
  - ✓ La part des renouvelables « électriques » augmente avec le niveau de développement
- Idem pour le nucléaire et la séquestration de CO<sub>2</sub>

## Focus sur l'électricité

Base : nucléaire + fossile avec cogénération

Modulable : hydraulique + fossile sans cogénération

Intermittent : PV + éolien + solaire à concentration



Rapport intermittent / total électricité = 15,6 %

Rapport intermittent / (modulable+intermittent) = 35 % (25 % si cogénération modulable)

Gestion intermittence facilitée par le transport « électrique » : 12,6 % de l'électricité

➔ Stockage électricité, gestion des réseaux, modulation cogénération et nucléaire, ...

## Focus sur le nucléaire

### Rappels :

- Production centralisée essentiellement électrique
  - Adaptée aux populations urbaines  $P_1$  et  $P_2$ 
    - Population des pays riches (même s'il ne s'agit pas uniquement de population urbaine, les réseaux existent déjà à l'heure actuelle)
    - Population urbaine des pays émergents et en voie de développement, besoin d'une production centralisée d'électricité
  - Mise en évidence d'un besoin de chaleur « nucléaire » ( $\sim 0,6 \text{ Gtep/an}$ ) de l'ordre de grandeur de la production actuelle
  - Production d'électricité « pure »  $\sim 4,25 \text{ Gtep/an}$
- ⇒ Au niveau mondial  $\sim 4,85 \text{ Gtep/an}$  soit 8 fois plus qu'aujourd'hui

Réacteur de référence : EPR, 1 650 MWe, f = 90 %, soit 13 TWh/an = 2,8 Mtep/an

1 Gtep/an : 360 réacteurs = 594 GWe installé = 4680 TWh/an

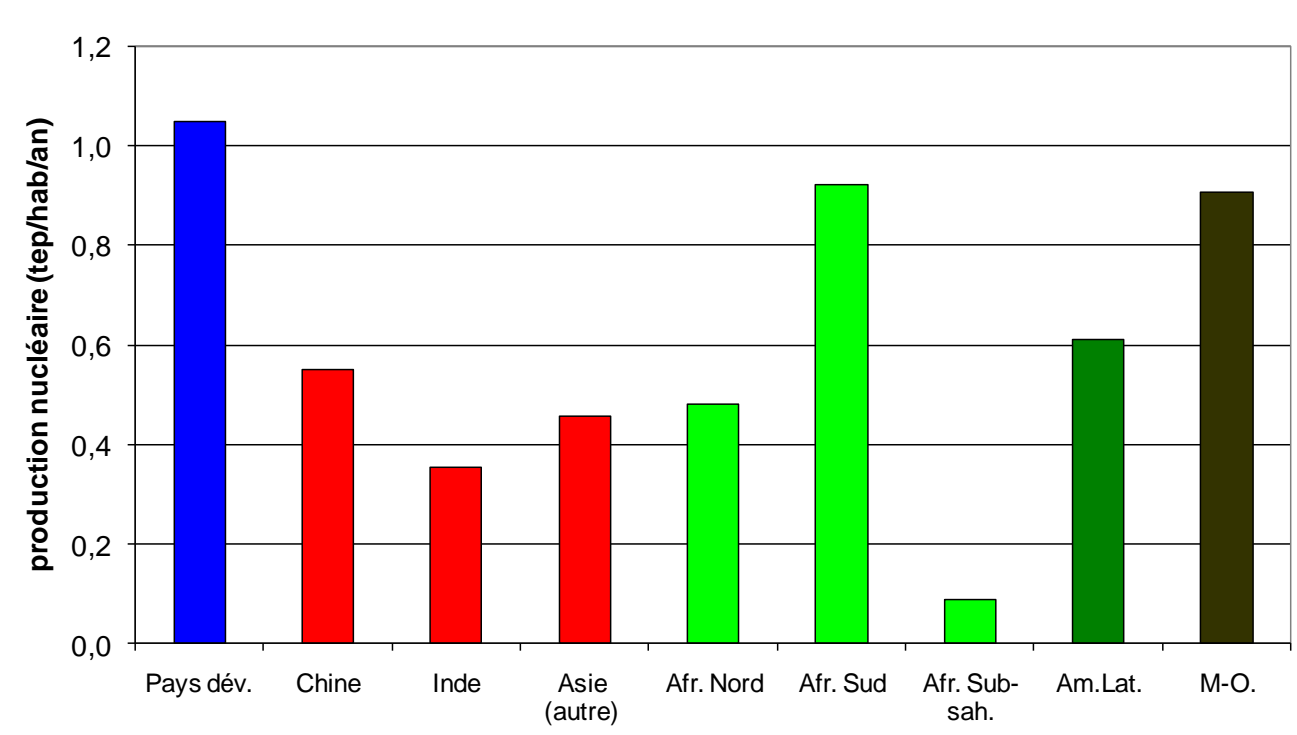
Au niveau mondial 4,85 Gtep/an

= 8 fois plus qu'aujourd'hui (~0,6 Gtep/an)

= 1750 réacteurs, soit ~4 fois plus qu'aujourd'hui

~200 réacteurs / milliard d'habitants contre 65 aujourd'hui, soit un facteur 2,7

### Consommation par habitant



France (2005) = 1,45 tep/hab/an

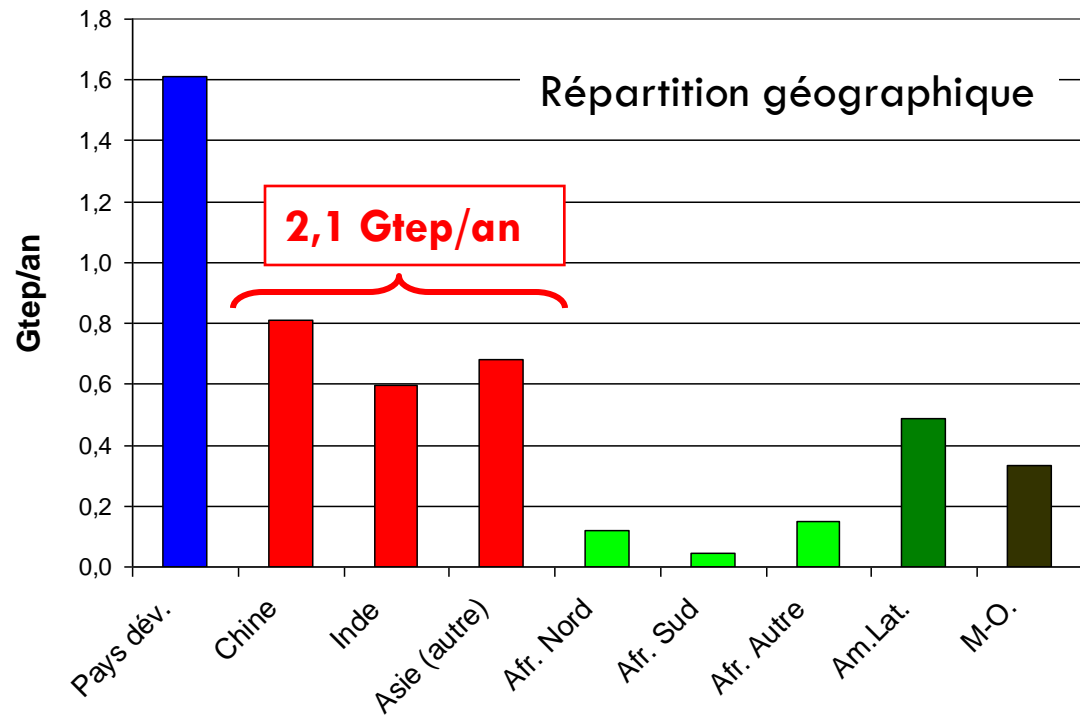
## Déploiement

Cas français ~ 60 réacteurs construits en 20 ans (1975 → 1995) pour 60 Mhab

Avec le même déploiement pour 6 Ghab ⇒ 6000 réacteurs en 20 ans

Si relance forte du nucléaire entre 2030 et 2050 ~1750 réacteurs à construire en 20 ans

⇒ 3 fois moins que la France dans les années 70 !



## Les questions soulevées par 4,85 Gtep/an de nucléaire en 2050

- ressources en uranium ?
- quelles technologies durables du point de vue des ressources (gen4) ?
- quelle gestion des déchets ?
- mise en place de règles de sûreté internationales
- contrôle et gestion des flux de matière fissile
- formation des techniciens, ingénieurs et chercheurs
- disponibilité des capitaux
- ...

## Conclusions ...

- ✓ Dans la continuité, étude systématique et de sensibilité aux différentes hypothèses (demande d'énergie, clés d'inégalité, contrainte climatique, ...)
- ✓ Etude simple, intuitive mais basée sur des hypothèses réalistes, qui nous aide à mieux comprendre les enjeux des études de scénarios énergétiques
- ✓ Comparaison à des études « technico-économiques » dans le but de déterminer les scénarios compatibles avec nos résultats et identifier ainsi les hypothèses « technico-économiques » qui n'apparaissent pas explicitement dans notre méthodologie :
  - ⇒ croissance, PIB, intensité énergétique, déploiement de nouvelles technologies ....