



La place du Nucléaire en 2050

Ce travail a pu être réalisé grâce au programme Energie 2 du CNRS, dans le cadre du « Groupe d'Analyse Thématique « nucléaire du futur ». Il a pu être présenté, discuté, débattu et amélioré au long d'une série de séminaires organisés entre 2007 et 2009. Les auteurs du rapport tiennent donc à remercier les personnes suivantes, pour leur apport et l'enrichissement de ce travail : M. Aiche, G. Barreau, A. Bidaud, A. Bidaud, I. Billard, H. Doubre, L. Giot, A. Guertin, B. Haas, P. Hennequin, D. Heuer, B. Jurado, F.-R. Lecolley, J. Margueron, M. Pagel, G. Rudolf, J.-B. Saulnier, C. Simon, E. Simoni, J. Wilson.

A l'origine cette démarche a été entreprise pour tenter de déterminer quelle pourrait être la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique mondial d'ici 2050. Pour cela, il faut au préalable avoir une idée de la quantité totale d'énergie dont on devrait disposer raisonnablement en 2050 et pour combien d'individus. Mais ce n'est pas suffisant car la consommation d'énergie en 2050 ne ressemblera pas à celle d'aujourd'hui. Pour aborder ces questions de manière exhaustive et « oser » faire des prédictions, il faudrait intégrer un nombre de paramètres considérable, élaborer des modèles complexes et ce ne serait sans doute pas encore suffisant. Il ne s'agit donc pas ici de mener une étude précise et prédictive mais d'adopter une démarche plutôt intuitive et autant que possible étayée pour en dégager des informations et des tendances pertinentes à partir d'une représentation du monde économique et énergétique simplifiée, voire schématique, mais dont on maîtrise aisément les paramètres.

Résumé du rapport

L'étude présentée est le résultat d'une réflexion menée sur le paysage énergétique mondial de 2050. Il ne s'agit pas d'un travail de prospective, mais d'une construction du mix énergétique en 2050, basée sur des données et des hypothèses globales explicitées (consommation d'énergie, répartition mondiale, émission de CO₂).

Ce rapport a l'ambition de proposer une base de discussion solide et étayée. La démarche se veut donc simplifiée et transparente : chaque étape du cheminement est décrite dans sa totalité. Les résultats permettent de dégager des tendances pertinentes et d'apporter des informations quantitatives sur différents types de mix énergétiques en 2050 : au niveau mondial, par type de besoin (transport, industrie, résidentiel/tertiaire, électricité), par type de population, ou par zone géographique. Cette étude aboutit à une estimation de la demande d'énergie nucléaire en 2050, qui fait l'objet d'une description particulière.

Contexte énergétique et climatique

A l'échelle mondiale, les besoins en énergie sont actuellement couverts à 80 % par les combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon). Bien que leurs réserves soient très inégalement réparties dans le monde, ils sont massivement utilisés depuis plus de deux siècles pour satisfaire nos besoins en énergie car ils offrent des avantages qu'aucune autre source ne possède : ils ont une densité énergétique importante, ils sont stockables et transportables. Ils sont utilisables de manière flexible pour tous nos besoins (transport, chaleur à haute et basse température, électricité) et à toutes les échelles de production (de la chaudière individuelle aux centrales thermiques de grande puissance). Leur coût reste très compétitif et les technologies à mettre en œuvre pour leur utilisation sont maîtrisées. Mais il est désormais établi que

les émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques et principalement le CO₂ émis par l'usage des combustibles fossiles sont responsables du réchauffement climatique. A défaut de pouvoir l'enrayer, une réduction significative de la consommation mondiale d'énergie fossile dans les années à venir pourrait néanmoins limiter l'augmentation de la température moyenne de 2°C.

Par ailleurs, la consommation d'énergie dans le monde est très inégalement répartie. Bien que la population des pays riches actuels ne représente que 20 % de la population mondiale, elle consomme à elle seule plus de la moitié de l'énergie totale produite. Cependant, l'essor économique de certains pays émergents, tels la Chine et l'Inde, permet d'ores et déjà à une partie de leur population d'améliorer considérablement leur niveau de vie et se traduit par une augmentation importante de leur consommation d'énergie. Il n'en reste pas moins qu'une part importante de la population mondiale, en majorité celle des pays pauvres et émergents, et plus particulièrement les ruraux, présente un niveau de consommation extrêmement bas. Dans les années à venir, la population des pays riches actuels n'augmentera que très peu tandis que celle des pays émergents et pauvres ne va cesser de croître jusqu'en 2050 au moins. Ces derniers sont donc amenés à dominer la demande énergétique mondiale.

D'ici 2050, le monde devra donc satisfaire les besoins énergétiques croissants de sa population en augmentation tout en diminuant son recours à l'énergie fossile dans la perspective de limiter son impact sur le réchauffement climatique. S'ajoute à cela la gestion de la pénurie des ressources en pétrole conventionnel et en gaz naturel annoncée avant 2050.

Cette présentation très succincte du contexte énergétique mondiale actuel et de son évolution montre que les sources d'énergie non émettrices de CO₂ devront être développées autant que l'utilisation des combustibles fossiles sera réduite et que la demande énergétique sera élevée. Le déploiement d'ici 2050 de ces sources est multiparamétrique : maturité industrielle, respect des contraintes environnementales (emprise au sol, pollutions, ...), coût lié aux investissements, au fonctionnement et au combustible, acceptabilité sociale (nucléaire, éolien, séquestration du CO₂, ...). Malgré un développement soutenu des sources dites renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien, géothermie), il faudra compter sur le charbon « propre », c'est-à-dire la mise en œuvre du captage et de la séquestration du CO₂ émis par les centrales thermiques utilisant du gaz et du charbon. Mais ce ne sera sans doute pas suffisant et le recours à l'énergie nucléaire peut s'avérer incontournable. Estimer sa part dans le mix énergétique mondial en 2050 est complexe puisqu'elle dépend de la demande globale d'énergie, de la réduction de la consommation d'énergie fossile, du potentiel technico-économique des sources renouvelables et de la quantité totale de CO₂ que nous serons capables de séquestrer chaque année. Enfin, si l'ensemble de ces sources permet de répondre à la demande énergétique mondiale globale en 2050, toutes ne sont pas à même de satisfaire nos besoins en chaleur, en électricité et pour le transport. Il subsiste donc la question de leur adéquation à nos différents types de besoins (chaleur haute ou basse température, transport, électricité, ...).

Les hypothèses

L'étude que nous proposons consiste à construire une représentation de la demande énergétique mondiale en 2050 en prenant en compte de manière simple mais réaliste l'ensemble des paramètres dont elle dépend : population, consommation, contrainte climatique et potentiels des sources d'énergie disponibles. Le but de cette étude n'est pas de prédire l'évolution de ces paramètres de nos jours à 2050, mais de choisir comme hypothèses initiales leurs valeurs en 2050 et de décrire le monde énergétique qui en résulte. Les hypothèses initiales retenues pour notre étude sont les suivantes :

- une population mondiale en 2050, $P_{\text{total}}^{\text{Monde}} \sim 9$ milliards d'habitant (Ghab) (6,5 Ghab en 2006) ;
- une consommation énergétique mondiale en 2050, $E_{\text{total}}^{\text{Monde}} = 20$ Gtep/an (~ 11 Gtep/an en 2006), qui nous paraît être une moyenne « sobre » des différentes études de perspectives ;
- une réduction d'un facteur 2 d'ici 2050 des émissions de CO₂ liées à la production d'énergie, ce qui fixe une consommation d'énergie fossile en 2050 à $F_{\text{total}}^{\text{Monde}} = 4,2$ Gtep/an (~ 9 Gtep/an en 2006).

La répartition de la consommation énergétique

Notre démarche pour bâtir le mix énergétique mondial en 2050 à partir de ces hypothèses et notamment pour estimer la part de l'énergie nucléaire dans la consommation mondiale d'énergie, comporte plusieurs étapes que nous allons décrire successivement mais elle repose avant tout sur une approche particulière qu'il est important de définir. En effet, le contexte énergétique mondial peut être abordé de plusieurs

manières, la plus simple mais sans doute la plus réductrice est de se représenter le monde en huit grandes régions géographiques (Amérique du Nord, Pacifique, Ex-URSS, Europe, Moyen-Orient, Amérique Latine, Asie, Afrique), d'attribuer à chacune d'elle une consommation d'énergie moyenne par habitant et de les classer en conséquence dans l'une des trois catégories de développement économique : riche, émergent ou pauvre. Cette représentation n'est pas adaptée pour décrire la situation actuelle et future des pays émergents dans lesquels, il existe déjà de grandes disparités de consommation d'énergie entre les habitants de leur population. Aussi, à l'exception des populations des pays riches actuels (Amérique du Nord, Pacifique, Ex-URSS, Europe) qui maintiendront un niveau de consommation d'énergie globalement élevé en 2050, nous supposons qu'au sein de chacune des autres grandes régions du monde les inégalités persisteront et qu'une description plus réaliste de leur consommation d'énergie consiste à répartir leur population totale selon trois groupes P₁, P₂ et P₃, correspondant à trois niveaux de consommation, élevé, modéré et faible, C₁, C₂ et C₃. Cette approche implique que ces trois niveaux de consommation d'énergie seront les mêmes partout de par le monde.

Compte tenu de l'essor économique que connaissent aujourd'hui la Chine et l'Inde, et de leurs populations qui en 2050 représenteront à elles seules environ un tiers de la population mondiale, ces deux pays ont été traités à part du continent asiatique. De la même façon, une distinction est faite entre l'Afrique du Nord, l'Afrique du Sud et l'Afrique sub-saharienne qui présentent des consommations d'énergie par habitant très disparates. Ainsi des huit grandes régions géographiques initiales, nous avons divisé le monde en douze entités économiques.

Pour chacune d'elle, la répartition de la population en 2050 dans les groupe P₁, P₂ et P₃ est basée conjointement sur l'état de développement actuel et sur le taux d'urbanisation en 2050 (voir figure ci-dessous).

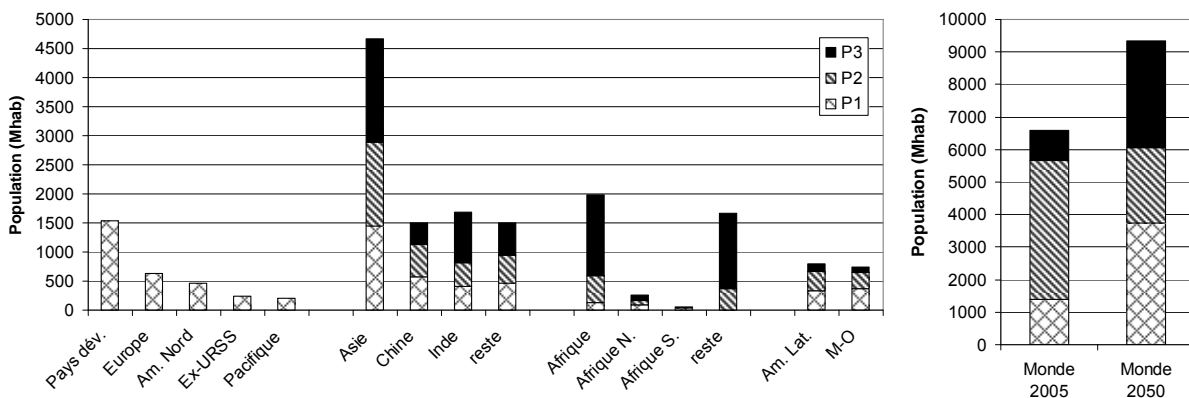


Figure 1 : répartition des groupes de population, P₁, P₂ et P₃ (millions d'habitants) en 2050 dans le monde et dans chacune des 12 entités économiques choisies.

Enfin, les trois niveaux de consommation d'énergie par habitant, C₁, C₂ et C₃, obéissent à la simple loi de somme :

$$\left(\sum_{\text{Monde}} P_1 \right) C_1 + \left(\sum_{\text{Monde}} P_2 \right) C_2 + \left(\sum_{\text{Monde}} P_3 \right) C_3 = E_{\text{total}}^{\text{Monde}} \Leftrightarrow \left[\left(\sum_{\text{Monde}} P_1 \right) \frac{C_1}{C_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_2 \right) \frac{C_2}{C_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_3 \right) \right] C_3 = E_{\text{total}}^{\text{Monde}}$$

A partir de cette relation, la première étape de notre analyse consiste à quantifier les trois niveaux de consommation d'énergie, élevé, modéré et faible, selon une « clé d'inégalité » $\frac{C_1}{C_3} / \frac{C_2}{C_3} / \frac{C_3}{C_3}$ choisie en

2050 et contraint par une consommation mondiale de 20 Gtep/an.

Convaincus qu'un accès à l'énergie partagé et plus équitable au niveau mondial ainsi qu'une volonté commune de ne pas amplifier d'avantage le dérèglement climatique sont sans doute des conditions nécessaires pour construire un monde futur plus juste et pacifié, nous avons opté pour une réduction de plus d'un facteur 2 des inégalités entre les niveaux C₁ et C₃ par rapport à la situation actuelle. La clé d'inégalité choisie est donc 4 / 2 / 1, ce qui conduit, dans un scénario « 20 Gtep/an », aux valeurs suivantes : C₁ = 3,5 tep/hab/an, C₂ = 1,75 tep/hab/an et C₃ = 0,87 tep/hab/an.

Une volonté de réduire les inégalités de la consommation mondiale d'énergie tout en améliorant le niveau d'une part importante de la population des pays pauvres et émergents actuels exige des populations les plus

riches de diminuer leur consommation en 2050 de manière significative (voir figure 2). Dans un scénario « 20 Gtep/an », cette diminution est en moyenne de 27 %. Cette contrainte est d'autant plus forte que la tendance actuelle indique une augmentation continue de la consommation d'énergie par habitant des populations les plus favorisées.

Quant aux populations les plus pauvres, leur consommation par habitant augmente de 75%, mais n'atteint pas encore 1 tep/hab/an en 2050, ce qui peut sembler encore insuffisant.

La contrainte sur les émissions de CO2

Dans une seconde étape, nous nous sommes attachés à évaluer les répercussions d'une consommation de combustibles fossiles fixée à 4,2 Gtep/an sur la demande énergétique mondiale en 2050. Comme précédemment, une clé d'inégalité portant cette fois sur l'utilisation de l'énergie fossile,

$\frac{F_1}{F_3} / \frac{F_2}{F_3} / \frac{F_3}{F_3}$, permet d'allouer à chaque catégorie de population, P_1 , P_2 et P_3 , la quantité de combustibles

fossiles qu'elle pourra utiliser c'est-à-dire avec émission de

$$CO_2 : \left[\left(\sum_{\text{Monde}} P_1 \right) \frac{F_1}{F_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_2 \right) \frac{F_2}{F_3} + \left(\sum_{\text{Monde}} P_3 \right) \right] F_3 = F_{\text{total}}^{\text{Monde}}$$

Nous considérons que les populations riches seront les plus à même de développer des nouvelles sources d'énergie, plus coûteuses et plus contraignantes que les combustibles fossiles. Ainsi, nous fixons une clé d'inégalité pour la consommation d'énergie fossile avec émission de CO₂ plus drastique que pour la consommation d'énergie, soit 2 / 1,4 / 1 en 2050, contre 13 / 2 / 1 actuellement. On obtient ainsi les valeurs suivantes :

$F_1 = 0,6$ tep/hab/an, $F_2 = 0,42$ tep/hab/an et $F_3 = 0,3$ tep/hab/an.

Une volonté de limiter d'un facteur 2 les émissions de CO₂ au niveau mondial conduit à des efforts drastiques de la part de la quasi-totalité des 12 entités économiques (voir figure 2). Les pays riches actuels devront mettre en œuvre des sources d'énergie alternatives aux combustibles fossiles, c'est-à-dire non émettrices de CO₂, pour couvrir environ 85 % de leurs besoins. Les pays en voie de développement devront limiter l'utilisation de l'énergie fossile et assurer l'augmentation de leur consommation avec des sources alternatives. A nouveau, cette contrainte climatique est d'autant plus forte que la tendance actuelle montre une consommation de combustibles fossiles en augmentation.

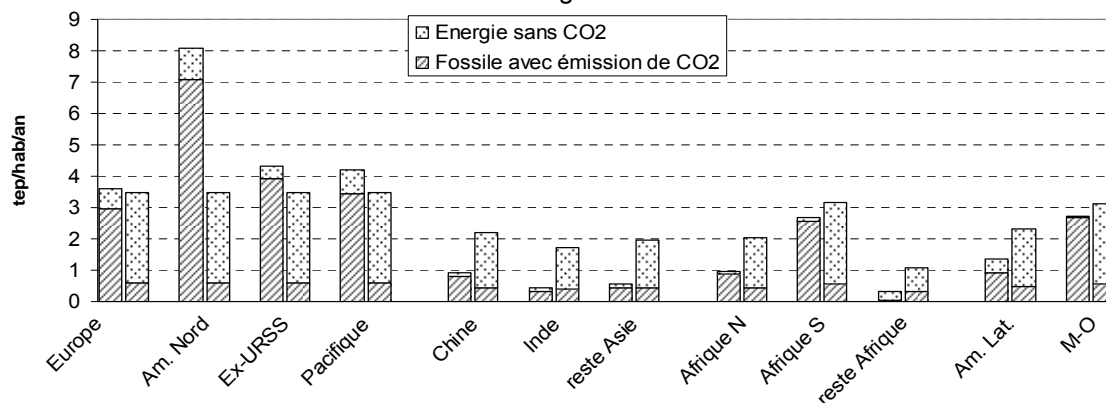


Figure 2 : pour chacune des 12 entités économique : la barre de gauche montre la consommation d'énergie moyenne par habitant (tep/hab/an) en 2005 ainsi que la part des combustibles fossiles avec émission de CO₂, la barre de droite montre les résultats obtenus pour 2050 compte tenu des clés d'inégalité choisies pour la consommation d'énergie et les émissions de CO₂.

Ces premiers résultats montrent de manière évidente que la façon dont on produit l'énergie devra radicalement changer d'ici 2050. Nous nous intéressons aux différents types d'utilisation de l'énergie, et donc de l'adéquation des sources et des besoins.

Construction du mix énergétique

La troisième étape, nécessaire à la construction du mix énergétique en 2050, porte sur la répartition des sources d'énergie disponibles en 2050 dans les différents secteurs de consommation : transport, industrie,

résidentiel/tertiaire et électricité. Pour chaque catégorie de population P_1 , P_2 et P_3 , l'attribution de la fraction de leur énergie totale consommée par secteur correspond à celle des pays riches, émergents et pauvres actuels, respectivement. On aboutit ainsi à une demande d'énergie en 2050 réparties selon le type de besoin : 5 Gtep/an pour les transports, 4 Gtep/an de chaleur à haute température pour l'industrie, 4 Gtep/an de chaleur à basse température pour le résidentiel/tertiaire et 7 Gtep/an pour les usages électriques.

Cette étude n'étant pas une étude de prospective, mais une tentative de description du monde énergétique qui répond à la contrainte climatique, le coût de chaque énergie n'est pas un critère de sélection. Ce critère est néanmoins présent indirectement, dans l'estimation du potentiel des différentes sources d'énergie.

Notre démarche a consisté à considérer en premier lieu l'énergie fossile avec émission de CO_2 et les énergies renouvelables. Le potentiel de l'ensemble des sources renouvelables retenu pour cette étude est d'environ 8 Gtep/an dont la moitié peut subvenir aux transports (biocarburants) et aux besoins en chaleur (biomasse, solaire thermique et à concentration, géothermie), l'autre moitié étant exclusivement réservée à la production d'électricité (hydraulique, solaire photovoltaïque et thermodynamique, éolien).

Nous avons réservé la majeure partie des combustibles fossiles avec émission de CO_2 au transport (70 %), du fait du potentiel estimé des biocarburants (~ 0,5 Gtep/an), de l'impossibilité à capter le CO_2 et de la difficulté à stocker l'électricité. Au final 30 % des transports sont assurés par l'électricité, ce qui semble compatible avec les transports urbains.

Le potentiel des énergies renouvelables dédiées à la production de chaleur est estimé à 3,2 Gtep/an, ce qui est inférieur aux besoins en chaleur qui s'élèvent à 8 Gtep/an au total. Ce premier constat met en évidence un problème d'adéquation entre les sources alternatives aux combustibles fossiles et nos besoins, notamment en chaleur. Pour éviter de reporter le déficit de chaleur sur l'électricité, il apparaît indispensable de développer la cogénération pour les centrales électriques utilisant les combustibles fossiles avec captage et séquestration du CO_2 , ainsi que l'énergie nucléaire dédiée uniquement à la production de chaleur. Néanmoins, l'éloignement de la production de chaleur aux sites industriels et la construction de réseaux performants pour approvisionner les habitations en chaleur limitent l'utilisation de la cogénération avec séquestration du CO_2 et de la chaleur nucléaire.

Lorsque l'on attribue successivement à chaque secteur, hors électricité, la part des combustibles fossiles avec émissions de CO_2 (4,2 Gtep/an), la chaleur produite par les sources renouvelables au maximum de leur potentiel estimé (~ 3,2 Gtep/an) puis celle issue de la cogénération (~ 2 Gtep/an) et du nucléaire (~ 0,5 Gtep/an), et enfin la part des biocarburants au transport (~ 0,5 Gtep/an), les besoins ne sont toujours pas intégralement couverts.

Le report sur l'électricité est effectué de façon optimale, notamment en prenant en compte l'utilisation de pompes à chaleur pour la production de chaleur, qui permet de diviser par 3 environ la consommation électrique pour un besoin donné. Une fois ce report effectué pour le transport, le résidentiel/tertiaire et l'industrie, la consommation électrique totale en 2050 s'élèvent à 11,5 Gtep/an et représente plus de la moitié de l'énergie mondiale. A nouveau, ces besoins sont supérieurs au potentiel des sources d'énergie renouvelables dédiées à la production électrique (4 Gtep/an).

Au final, le charbon « propre » et le nucléaire devront donc produire environ 6 Gtep/an d'électricité. A l'heure actuelle, les capacités du stockage du CO_2 sont incertaines, nous les avons estimées en 2050 à 12 Gt/an ce qui correspond à 3,5 Gtep/an de combustibles fossiles (en incluant la cogénération déjà évoquée). La part du nucléaire dans le mix énergétique mondiale en 2050 représente alors un peu moins de 5 Gtep/an, production de chaleur incluse, soit un facteur 8 par rapport à la production actuelle.

Dans notre représentation du monde énergétique en 2050, la totalité des besoins sont couverts en part à peu près égale par l'énergie fossile avec émission CO_2 , le charbon « propre », les sources renouvelables productrices de chaleur, les sources renouvelables productrices d'électricité, et l'énergie nucléaire. Leur répartition dans chaque secteur de consommation ainsi que le report sur l'électricité des besoins pour le transport, l'industrie et le résidentiel/tertiaire sont résumés dans la figure suivante.

* Le principe de la cogénération est de produire l'électricité tout en récupérant la chaleur rejetée par les centrales thermiques à plus ou moins haute température pour des usages industriels ou pour le résidentiel/tertiaire.

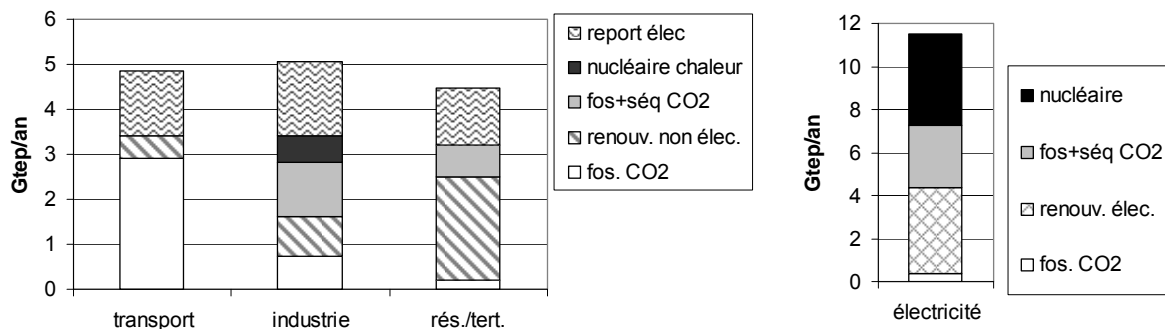


Figure 3 : pour chaque secteur, part des différents types de sources : combustibles fossiles avec émission de CO₂, renouvelables non électriques (biocarburant pour les transports, et production de chaleur pour l'industrie et le résidentiel/tertiaire), les combustibles fossiles avec séquestration de CO₂ et le nucléaire, ainsi que les reports sur l'électricité des besoins pour les transports, l'industrie et le résidentiel/tertiaire.

Ces sources ont été réparties entre les différents secteurs et pour chaque type de population P₁, P₂ et P₃. La répartition des sources entre les types de population a été effectuée au prorata de leurs besoins ou en tenant compte de certaines tendances fortes actuelles : l'utilisation de la biomasse traditionnelle est concentrée sur la population P₃, et le nucléaire est envisagé uniquement pour les populations P₁ et P₂.

Ainsi, connaissant la contribution des populations P₁, P₂ et P₃, à la population totale de chaque entité économique, on obtient le mix énergétique de chacune d'elle en 2050 (voir figure 4) et plus particulièrement la part de l'énergie nucléaire.

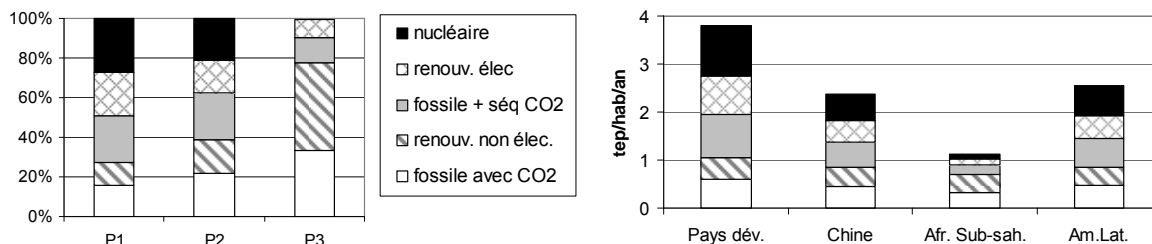


Figure 4 : Mix énergétique pour les trois types de population P₁, P₂ et P₃ et pour quelques régions clés.

A l'exception de l'Afrique sub-saharienne, on observe un nivellement des émissions de CO₂ par habitant de l'ordre de 1,7 tonnes/an pour toutes les entités. Aucune ne pourra échapper au développement de la technologie de la séquestration et du stockage du CO₂, le recours au charbon « propre » étant uniformément utilisé dans le monde à hauteur d'environ 20 %. De même, toutes les entités devront compter sur les sources d'énergie renouvelables productrices de chaleur dans des proportions variant de 10 % pour les pays occidentaux jusqu'à 40 % pour l'Afrique sub-saharienne dont la consommation repose déjà en grande partie sur la biomasse.

Enfin, le déploiement d'un facteur 8 de l'énergie nucléaire en 2050 (soit ~ 1750 réacteurs de type EPR de puissance 1,65 GW_{élec}) ne sera pas homogène dans le monde puisque sa production sera essentiellement concentrée en Asie (~ 2 Gtep/an) et dans les pays occidentaux (~ 1,6 Gtep/an). Il est donc fort probable que les choix énergétiques futurs que feront la Chine et l'Inde, qui maîtrisent déjà la technologie nucléaire, auront des répercussions sur le mix énergétique mondial. Ceci reflète également le difficile accès à l'énergie nucléaire car sa technologie est complexe et contraignante, notamment du point de vue de la sûreté. Sa production centralisée réclame aussi des réseaux électriques étendus et performants, ce qui peut limiter son déploiement dans certaines régions. Néanmoins, la production nucléaire ramenée au nombre d'habitants sera la plus importante dans les pays développés actuels avec environ 1 tep/hab/an, ce qui reste inférieure à la production française actuelle (1,45 tep/hab/an). Dans notre représentation, la part de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique des entités en 2050, à l'exception de l'Afrique sub-saharienne, est assez homogène puisqu'elle varie de 20 % à 25 %, contre 39 % actuellement en France.

En conclusion

La méthode proposée pour décrire la demande énergétique mondiale en 2050 repose sur des valeurs de paramètre et de choix d'hypothèses simples, argumentés et explicites. Elle permet d'apporter un éclairage quantitatif sur ce que peut être le monde énergétique en 2050 contraint par une production d'énergie donnée et soucieux d'endiguer le réchauffement climatique. Cette étude pourrait être poursuivie par une analyse plus détaillées de la sensibilité aux hypothèses de départ (consommation totale, émissions de GES, clés d'inégalités), afin d'avoir une vision lisible des différents scénarios énergétiques, en termes de consommation d'énergie par habitant et de mix énergétiques des grandes régions du monde. Cette méthodologie pourrait également servir de base à une inter-comparaison de scénarios énergétiques produits par différentes institutions ou instituts de prospectives, nationaux ou internationaux.