

document de travail

mars 2011

106

Les enjeux d'un bon usage de l'électricité :

Chine, Etats-Unis, Inde et Union européenne

Benjamin Dessus et Bernard Laponche avec la collaboration de
Sophie Attali (*Topten International Services*), Robert Angioletti (Ademe),
Michel Raoust (Terao)

Contact : Nils Devernois, département de la Recherche, AFD (devernoisn@afd.fr)

Département de la Recherche

Agence Française de Développement 5 rue Roland Barthes
Direction de la Stratégie 75012 Paris - France
Département de la Recherche www.afd.fr

Remerciements

Nous remercions Enerdata pour la mise à disposition des statistiques utilisées dans cette étude et pour les nombreux échanges que nous avons eus avec ses équipes

Avertissement

Les analyses et conclusions de ce document de travail sont formulées sous la responsabilité de ses auteurs. Elles ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'Agence Française de Développement ou de ses institutions partenaires.

Directeur de la publication : Dov ZERAH

Directeur de la rédaction : Robert PECCOUD

ISSN : 1958-539X

Dépôt légal : 1^{er} trimestre 2011

Mise en page : Anne-Elizabeth COLOMBIER

Sommaire

	Introduction	5
1.	L'électricité : un vecteur énergétique aux caractéristiques particulières	7
1.1	La production d'électricité	7
1.2	Le transport et la distribution d'électricité	11
1.3	Les usages de l'électricité	12
1.4	Courbes de charge et monotone de puissance : une problématique essentielle	15
2.	Critères d'un bon usage de l'électricité	19
2.1	Les critères	19
2.2	Les émissions de gaz à effet de serre (GES)	20
2.4	Les questions d'environnement local	21
2.3	La préservation des ressources et la sécurité énergétique	21
2.5	Les questions économiques	22
2.6	Et à l'horizon de 20 ans ?	24
3.	La consommation d'électricité en Chine, Etats-Unis, Inde et Union européenne	25
3.1	Quatre grands ensembles aux situations contrastées	25
3.2	Les consommations d'énergie, leur évolution et leurs indicateurs globaux	28
3.3	Production, transport et distribution de l'électricité	41
3.4	Les consommations finales d'électricité	46
3.5	Les émissions de gaz carbonique des systèmes électriques	54
3.6	La consommation d'électricité en Inde : l'exemple de la Région Nord	59
3.7	La consommation d'électricité en Chine : l'exemple de la province du Shandong	63
3.8	Les visions prospectives de la consommation d'électricité en Chine, Inde, Union Européenne et Etats-Unis	67
4.	Le secteur de l'industrie	71
4.1	La consommation d'électricité dans l'industrie	71
4.2	Economies et substitution d'électricité à des énergies fossiles dans l'industrie en Chine, aux Etats-Unis, en Inde et dans l'Union européenne	80
5.	Le secteur des transports	87
5.1	La consommation d'électricité dans les transports	87
5.2	Les économies et substitution d'électricité à des énergies fossiles dans les transports en Chine, aux Etats-Unis, en Inde et dans l'Union européenne	92

6.	Les secteurs résidentiel et tertiaire	97
6.1	Les consommations d'énergie des secteurs résidentiel et tertiaire	97
6.2	Les consommations d'électricité dans les secteurs résidentiel et tertiaire	102
6.3	L'enseignement de la pratique : un exemple en Chine	104
6.4	Une estimation prospective des enjeux de la consommation d'énergie dans les bâtiments	107
6.5	Instruments et mesures pour économiser l'électricité dans les bâtiments : l'expérience européenne	112

	Eléments de conclusion	125
--	-------------------------------	------------

	Liste des sigles et abréviations	127
--	---	------------

Introduction

Chacun sait bien que l'électricité est un produit noble et de très grande utilité pour le développement des sociétés, mais dont la production, le transport et la distribution exigent des investissements lourds et entraînent des frais de maintenance importants, alors que les rendements de production restent souvent modestes et parfois franchement mauvais : de l'ordre de 10 à 15 % pour l'électricité photovoltaïque ou la géothermie, 20 à 25 % pour la biomasse, 30 % pour le nucléaire actuel, 35 à 45 % pour le charbon et le fuel, 50 à 55 % pour le gaz naturel, et de 95 % pour l'hydraulique.

D'autre part, aucune des énergies dont est issue l'électricité n'est sans inconvénient, local ou global, même si les degrés de nuisances et de risques couvrent un très large éventail (accidents majeurs, prolifération, matières dangereuses et déchets pour le nucléaire, pollution de l'air et émissions de CO₂ et de méthane pour les combustibles fossiles, déforestation, dégâts à la biodiversité et concurrence avec les besoins alimentaires pour les plantations énergétiques, déplacements de population et dégâts environnementaux pour les grands barrages, problèmes paysagers pour les éoliennes, etc.).

Les coûts mondiaux d'investissement des outils de production d'électricité sont en forte augmentation depuis plusieurs années, en particulier dans le nucléaire (avec des coûts multipliés par 2,5 en 5 ans) mais aussi, dans une moindre mesure, dans les filières à combustibles fossiles, et la raréfaction des ressources fossiles et fissiles qui laisse augurer d'un renchérissement durable des coûts moyens de l'électricité.

Enfin, dans un proche avenir, les énergies renouvelables (à l'exception de l'hydraulique et de l'éolien à court-moyen

termes) ne suffiront pas à produire les quantités d'électricité bon marché indispensables au développement.

Devant l'importance des impacts sociaux, économiques et environnementaux liés au bon usage de ce vecteur énergétique noble, rare et durablement onéreux, en particulier dans des pays émergents comme la Chine et l'Inde, où la croissance économique est très rapide, il a paru important à l'AFD de consacrer une étude à l'électricité délibérément axée sur la demande d'électricité plutôt que sur sa production.

L'enjeu, en Chine et en Inde (et plus largement dans l'ensemble des pays émergents) d'un bon usage de l'électricité (au sens de sa rationalité et de son économie) justifie pleinement cette approche dans un contexte de tension croissante sur les approvisionnements énergétiques et sur les questions d'environnement à court et moyen terme, et donc des prix, avec leurs conséquences sur l'activité économique, le revenu des ménages et les inégalités sociales.

Il serait en effet paradoxal et totalement contradictoire de s'engager, comme y incite fortement la raréfaction des ressources fossiles et la croissance des émissions de gaz à effet de serre liées aux consommations d'énergie, dans une politique vigoureuse d'efficacité énergétique dans tous les secteurs d'activités et donc de diminuer les consommations d'énergie à service rendu égal ou supérieur, et d'exempter l'électricité de cet effort indispensable de sobriété et d'efficacité énergétiques.

Les auteurs de cette étude ont eu l'occasion récemment de s'intéresser à cette question du bon usage de l'électricité en Europe et en France. Ils ont pu à cette occasion développer une méthodologie d'approche originale de

ces questions et mettre en évidence pour les grands pays européens l'évolution de la demande sectorielle d'électricité de ses usages principaux, et leurs déterminants. L'étude parue sous le titre « *Du gâchis à l'intelligence : le bon usage de l'électricité* »¹ comporte une série de données et de résultats sectoriels pour les pays européens qu'il nous a semblé intéressant de mettre en regard de ceux de la Chine et de l'Inde ; ils peuvent en effet potentiellement préfigurer les évolutions à moyen terme des consommations d'électricité et alerter les décideurs des pays émergents sur les priorités d'action. De plus, il nous a semblé intéressant d'élargir cette comparaison aux Etats-Unis dont les caractéristiques démographiques et géographiques, ainsi que le modèle économique sensiblement différent du modèle européen peuvent apporter des éléments utiles d'analyse pour les orientations futures des pays émergents.

Cette étude centrée sur la demande d'électricité et son évolution s'impose d'autant plus que les politiques actuelles de nombreux pays s'appuient sur des conventions souvent dépassées et des chiffres qui ne reflètent parfois ni la réalité physique ni la vérité économique et environnementale, justifiant ainsi à tort un développement non pertinent des usages de l'électricité.

L'étude est composée de trois parties. La première est consacrée à la description des caractéristiques qui font la particularité de l'électricité et aux différents critères d'un « bon usage » de ce vecteur énergétique très particulier. La deuxième dresse l'état des lieux des consommations

d'électricité en Chine et en Inde et de leur évolution par rapport à deux grands ensembles géographiques, les Etats-Unis et l'Union européenne : les consommations globales et leur évolution, les bilans énergétiques et électriques, les bilans de production et les bilans CO₂, les consommations sectorielles et leurs évolutions depuis 1992 (industrie, transports, résidentiel tertiaire). On remarquera l'absence de l'agriculture dans cette liste. Les statistiques concernant la consommation de l'agriculture, souvent agrégées aux statistiques du résidentiel tertiaire² ne permettent pas une analyse spécifique détaillée, malgré l'importance de ce secteur dans l'économie rurale de ces deux pays. Cette partie se conclut sur une analyse de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) des perspectives de consommation électrique des différents scénarios.

La troisième partie présente les potentiels et perspectives de « bon usage » de l'électricité en Chine et en Inde dans chacun des grands secteurs socioéconomiques, et leurs conséquences sur l'environnement, la protection des ressources naturelles et l'économie de ces pays. La comparaison avec les Etats-Unis et l'Union européenne (UE) permet de montrer le contraste des trajectoires de consommation d'électricité dans certains des secteurs selon la nature des choix stratégiques qu'engageront les gouvernements de la Chine et de l'Inde.

La conclusion reprend les principaux résultats de l'étude et souligne les enjeux les plus importants d'un bon usage de l'électricité pour les décennies à venir, en Chine et en Inde.

¹ Les Cahiers de Global Chance, n°27, janvier 2010, Global Chance et Association NégaWatt, disponible sur <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC27.pdf>

² Cette lacune importante et les caractéristiques très particulières de la consommation d'énergie du secteur agricole dans ces pays (importance du pompage pour l'irrigation) nous ont conduit à exclure l'agriculture de notre analyse.

1. L'électricité : un vecteur énergétique aux caractéristiques particulières

L'électricité telle que nous la connaissons, au bout d'une prise électrique, n'est pas directement disponible dans la nature. Elle est produite à partir d'autres ressources énergétiques : fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), fissiles (uranium, plutonium) ou renouvelables (soleil, eau, vent, géothermie, biomasse). Elle est ensuite transportée et distribuée, des lieux de production à l'utilisateur final, grâce à des câbles de capacités décroissantes, qui forment le « réseau électrique ». On parle donc d'un « vecteur énergétique » pour l'électricité, plutôt que d'une « énergie ».

1.1 La production d'électricité

On peut produire de l'électricité à partir de nombreuses énergies primaires :

- l'énergie mécanique directe comme dans le cas de l'hydraulique, de l'éolien, des marées ou des vagues ;
- l'énergie mécanique produite à partir de la transformation d'une énergie thermique (solution retenue dans les centrales thermiques à combustion de charbon, bois, pétrole et gaz), à partir de la chaleur géothermique ou de la chaleur solaire, ainsi que dans les centrales nucléaires où la chaleur est produite à partir de la fission de l'uranium et du plutonium. Dans tous ces cas, l'énergie mécanique obtenue par une turbine à partir de la chaleur produite est à son tour transformée en énergie électrique, grâce à un alternateur qui fournit

L'électricité présente deux particularités majeures : elle se transporte d'un point à un autre à la vitesse de la lumière dans un milieu « conducteur » (273 000 km/ seconde dans le cuivre), mais on ne sait pas la stocker (sauf à petite échelle dans des batteries). Ces deux caractéristiques structurent très fortement le système de production et de transport de l'électricité ainsi que ses usages.

un courant électrique alternatif de fréquence déterminée (50 hertz en Europe) ;

- l'énergie de rayonnement, en particulier solaire dans le cas de l'électricité photovoltaïque où les photons sont directement transformés en électricité, cette fois-ci continue. Si cette énergie doit être déversée sur le réseau, elle est transformée en courant alternatif grâce à un onduleur ;
- l'énergie chimique comme dans les piles à combustible où elle est également directement transformée en électricité.

Toutes ces opérations de transformation incluent des pertes d'énergie plus ou moins importantes selon les filières.

Encadré 1. Les unités de mesure de l'électricité

L'intensité du courant électrique (I) se mesure en ampère (A)

La tension électrique (U) se mesure en volts (V)

La puissance électrique, quantité d'énergie par seconde, se mesure en watt (W) (1 ampère sous une tension de 1 volt), ou en ses multiples :

1 000 watts = 1 kilowatt (kW)

1 000 kilowatts = 1 mégawatt (MW)

1 000 mégawatt = 1 gigawatt (GW)

L'énergie électrique se mesure en joule (J) (1 watt pendant une seconde) ou plus souvent en wattheure (Wh) (1 watt pendant 1 heure ou 3 600 secondes)

(1 Wh vaut 3 600 joules) ou en ses multiples :

1 000 wattheures = 1 kilowattheure (kWh)

1 000 kilowattsheures = 1 mégawattheure (MWh)

1 000 mégawattsheures = 1 gigawattheure (GWh)

1 000 gigawattsheures = 1 térawattheure (TWh)

1 TWh = 1 milliard de kWh

Dans la comptabilité énergétique, on utilise également la tonne équivalent pétrole (tep) :

1 TWh = 0,086 Mtep.

1.1.1 Les filières de production d'électricité

Les puissances unitaires des unités les plus courantes de production varient dans de grandes proportions pour les diverses filières, allant de quelques dizaines de watts pour les dispositifs photovoltaïques décentralisés à 1 500 MW pour les réacteurs nucléaires les plus importants.

Les différentes filières se distinguent aussi par les caractéristiques temporelles de leur production. Certaines des filières, comme la filière nucléaire *Pressurized Water Reactor* (PWR)³ actuelle, sont adaptées à des productions

quasiment continues (pour des raisons techniques et économiques). D'autres, comme l'hydraulique de barrage, sont adaptées à la fourniture, de quelques centaines à un ou deux milliers d'heures, de puissances importantes que nécessitent les pointes de consommation électrique journalière. D'autres enfin présentent des caractéristiques de production plus ou moins aléatoires (l'éolien en fonction du régime des vents), ou intermittentes (l'électricité solaire).

Les principales caractéristiques des filières de production électrique les plus utilisées sont données dans le tableau 1.

³ Le *Pressurized Water Reactor* (PWR), réacteur nucléaire à eau ordinaire sous pression et uranium enrichi, qui équipe toutes les centrales nucléaires françaises.

Tableau 1. Ordre de grandeur des paramètres principaux des principales filières de production d'électricité utilisées au monde

	Puissance unitaire usuelle	Rendement électricité / Energie primaire	Durée usuelle heures/an	Productible kW/hkW.an	Emissions GES g eq. CO ₂ /kWh	Intermittent et/ou aléatoire
Centrales thermiques						
Charbon	200-700 MW	35-40 %	5 000-8 000	8 000	780-900	non
Nucléaire	500-1 500 MW	30 -33 %	5 000-8 000	7 500	10-100	non
Gaz naturel cycle combiné	300-1 000 MW	55- 65 %	1 000-8 000	8 000	380-450	non
Fuel	300 -600 MW	38-42 %	3 000-6 000	8 000	570- 670	non
Turbine à gaz	20-100 MW	40 %	50-200	8 000	530	non
Bois	1-20 MW	20-25 %	3 000-8 000	8 000		non
Géothermie	2-20 MW	5-10 %	8 000	8 000	15-60	non
Solaire à concentration	1-10 MW	10 -12 %	1 000-1 800	1 000-1 200	6-15	oui
Energie mécanique						
Photovoltaïque	1 kW-10 MW	10 -15 %			20-130	oui
Hydraulique						
Fil de l'eau	1-1 000 MW	80-95 %	3 000-8 000	3 000-8 000	4-10	non
Retenues	1-1 000 MW	80-95 %	< 2 000	1 000-2 000	4 -10	oui
Eolien	10 kW-5 MW	40-50 %	2 000-3 000	2 000-3 000	50-30	oui
Energie Chimique						
Piles à combustible	5 kW- 2 MW	35-60 %			50 -1 200*	non

*En fonction des modes d'obtention du combustible hydrogène de la pile.

Source : petit mémento des énergies renouvelables, Cahiers de Global Chance, septembre 2007.

Parmi les centrales thermiques, les rendements électriques (rapport de l'électricité produite à l'énergie primaire mise en œuvre⁴) varient dans de grandes proportions : de 5 à 10 % pour la géothermie haute température à plus de 60 % pour les meilleures centrales à gaz à cycle combiné. La valeur de ces rendements est en effet principalement liée à la différence de température entre la source chaude (la température du gaz ou de la vapeur qui fait tourner la turbine) et la source froide (la température des gaz à l'échappement de la turbine ou la température à laquelle la vapeur d'eau se condense après la turbine). Pour la géothermie, cette différence de température n'excède souvent pas 150 ou 170°C, et pour le nucléaire 250°C, alors qu'elle peut atteindre plus de 700 à 800°C pour une turbine à gaz. La part d'énergie perdue l'est sous forme de chaleur à basse ou moyenne température. C'est ainsi qu'un réacteur nucléaire de 1 000 MW électrique produit en même temps 2 000 MW de chaleur, qui se dissipent dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau et d'eau (les panaches des centrales) et sont ainsi perdus.

Ce n'est plus le cas quand la proximité d'un usage de la chaleur produite permet ce qu'on appelle la cogénération électricité-chaleur (cf. Section 1.1.2.).

Les filières électriques renouvelables, à l'exception notable du bois et de l'hydraulique, se caractérisent par des productibles modestes (1 000 à 3 000 kWh/kW.an) et l'intermittence de leur production.

La colonne émission de gaz à effet de serre (GES) du tableau 1 qui donne les ordres de grandeur des émissions totales de GES des différentes filières (du puits à la tombe) montre des écarts considérables de performances, de quelques grammes à quelques dizaines de grammes par kWh pour l'hydraulique, l'éolien, le solaire et le nucléaire, à plus d'un kilo par kWh pour une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène électrolytique, si l'électricité est d'origine charbon.

1.1.2 La cogénération chaleur électricité

Toutes les filières thermiques de production d'électricité fournissent à la fois de l'électricité et de la chaleur en quantité et à des températures qui dépendent à la fois du rendement et des caractéristiques techniques de la filière de

⁴ L'énergie primaire prise en compte dans le cas des centrales nucléaires est la quantité de chaleur produite dans le réacteur et transmise à la turbine.

transformation de l'énergie primaire en électricité. Souvent considérée comme un sous-produit sans intérêt, cette chaleur, à condition de se présenter à des températures compatibles avec l'usage que l'on veut en faire (par exemple dans une chaudière industrielle ou un chauffage domestique), peut trouver une utilisation dans le secteur industriel, tertiaire ou domestique. Cela permet alors de mieux valoriser l'énergie primaire mise en œuvre : on parle alors de cogénération électricité-chaleur.

Les outils les plus couramment employés pour cet usage sont les moteurs à combustion alimentés au fioul ou au gaz naturel pour des puissances de quelques kW à quelques MW, et les turbines à combustion, issues de l'aéronautique, dont la turbine fournit l'électricité et les gaz de combustion, qui permettent d'alimenter une chaudière. Ces turbines, de quelques MW, sont alimentées par du gaz naturel ou par du fioul (domestique ou lourd). Depuis quelques années se développent sur le même principe des microturbines de quelques kW à quelques centaines de kW.

Enfin, certaines des piles à combustibles dont les pertes de chaleur s'effectuent à des températures suffisantes sont également susceptibles d'être utilisées en cogénération. Le tableau 2 rassemble les caractéristiques principales de ces moyens de cogénération.

Ce tableau montre l'intérêt de cette opération de cogénération, quand elle est possible, les rendements globaux (chaleur + électricité) pouvant atteindre 75 à 80 %, contre 55 % à 60 % pour les meilleures filières de production d'électricité (cycle combiné à gaz naturel), avec des conséquences évidemment très positives sur les émissions globales de GES.

En Europe, on constate cependant de très fortes disparités de recours à la cogénération (4 % en France, 16 % en Allemagne, 32 % en Italie).

En Inde et en Chine par contre, le recours à la cogénération reste encore marginal.

Tableau 2. Ordre de grandeur des paramètres principaux des principales filières de cogénération utilisées en Europe

Puissance unitaire usuelle	Rendement électricité / énergie primaire	Rendement chaleur/ Energie primaire	Total
5 kW-5 MW	37-42 %	35-38 %	72-80 %
5 MW-10 MW	33-40 %	40 %	73-80 %
5 kW-200 kW	30-35 %	35-40 %	65-75 %
10 kW-100 kW	35-55 %	25-25 %	60-80 %

Source : petit mémento énergétique, Cahiers de Global Chance, janvier 2003.

1.2 Le transport et la distribution d'électricité

1.2.1 Transport, distribution et pertes

L'alimentation en électricité des différents usagers, entreprises, collectivités locales, locaux tertiaires, habitations, s'effectue la plupart du temps grâce à un réseau de câbles conducteurs, depuis les centrales de production jusqu'au consommateur final. Dans le réseau dit « maillé », un même poste de consommation est alimenté par plusieurs voies différentes. Tous les différents moyens de production peuvent donc l'atteindre. Les moyens de production branchés sur le réseau doivent, quant à eux, tourner à la même vitesse, en synchronisme. On dit qu'un tel réseau est interconnecté.

Comme les pertes de transmission sont proportionnelles au carré du courant qui parcourt les câbles⁵ et à la longueur du trajet, le transport sur de longues distances des puissances élevées produites aux bornes des sites de centrales s'effectue sous des tensions très élevées (de l'ordre de 300 000 à 500 000 volts en Europe, mais jusqu'à 1 100 000 volts en Chine) de façon à minimiser le courant qui traverse les câbles et donc les pertes électriques. La pénétration dans les concentrations urbaines ou l'éclatement en réseaux locaux s'effectue en général à des tensions plus faibles, 200 000 volts ou 90 000 volts, grâce à des postes de transformation de tension (ou « transformateurs »). A partir de là, d'autres postes électriques ramènent la tension à une valeur de l'ordre de 20 000 volts. Enfin, au plus près des consommateurs (quelques centaines de mètres) la tension est abaissée à des valeurs de 100 à 380 volts.

Néanmoins, dans les zones rurales des pays émergents, on peut trouver des réseaux qui ne sont pas interconnectés ni maillés, mais purement locaux, alimentant quelques dizaines de familles ou d'artisans, et dont la source d'électricité est un moyen unique de production (diesel, micro-hydraulique, centrale photovoltaïque). Enfin, en zone très isolée, on peut également trouver de petits systèmes de production électrique (souvent photovoltaïques), destinés à l'alimentation d'une seule famille.

1.2.2 La gestion du système de production et distribution d'électricité

Le fait que l'électricité ne se stocke pratiquement pas (sauf pour des quantités d'énergie minimales dans les batteries⁶) implique qu'elle soit disponible à tout instant, en tout point d'utilisation, en fonction de la demande des usagers. Il ne suffit donc pas de disposer des moyens pour produire globalement la quantité d'électricité appelée à un instant donné. Il faut aussi disposer, avec une marge de sécurité, des moyens de produire et de faire parvenir en un point quelconque du réseau toute la puissance nécessaire, à tout moment, sans risquer de déstabiliser le réseau électrique.

Quand les besoins d'électricité des différents consommateurs se cumulent pour donner ce qu'on appelle la « pointe de consommation » la plus grande partie des moyens de production est mobilisée, y compris des moyens de production très coûteux (par exemple les turbines à gaz alimentées au fioul domestique). Aux heures creuses (la nuit par exemple), le réseau pourra recourir à des moyens de production moins coûteux. Comme les rapports de coûts de production entre électricité en période creuse et en période de pointe peuvent atteindre un facteur de plus de 10, pour satisfaire la demande, les producteurs d'énergie « empiètent » les moyens de production dont ils disposent en commençant par ceux qu'ils considèrent comme les moins coûteux à exploiter, compte tenu du temps pendant lequel chacun est utilisé, et dont la puissance est la moins facile à moduler. En bas de la pile en France par exemple, les centrales hydrauliques « au fil de l'eau », les éoliennes dont la production a un caractère fatal, puis les centrales nucléaires ou à charbon ou des cycles combinés au gaz naturel, puis les centrales à fioul et les turbines à gaz, enfin les centrales hydrauliques de barrage.

⁵ La puissance transportée sur un câble est proportionnelle à la tension et au courant : $P = V \cdot I$
Les pertes de transmission sont proportionnelles à la résistance du câble et au carré de l'intensité qui le traverse : $P = R \cdot I^2$

⁶ C'est le cas, par exemple, pour les petits systèmes photovoltaïques familiaux.

En Chine, en bas de la pile l'hydraulique au fil de l'eau, importante dans certaines provinces, et les éoliennes, puis le nucléaire et les centrales à charbon qui utilisent un combustible domestique, enfin le gaz, le pétrole et l'hydraulique

de barrage pour les pointes de consommation. Même type de schéma en Inde, avec des déclinaisons variables selon les Etats et les régions, puisque les interconnexions ont des rôles variables.

1.3 Les usages de l'électricité

A son tour, chez l'utilisateur final, l'électricité se transforme en de nouvelles formes d'énergie :

- énergie mécanique (les moteurs) ;
- énergie chimique (électrolyse, accumulateurs, synthèses chimiques, etc.) ;
- énergie de rayonnement (éclairage, micro-ondes, ondes électromagnétiques, etc.) ;
- énergie thermique à des températures très diverses (de la conservation par le froid à la climatisation, du chauffage basse température des locaux à des procédés industriels à températures très élevées, par exemple avec les torches à plasma).

Certains de ces usages, comme l'éclairage ou les moteurs, sont considérés comme quasiment captifs de l'électricité, soit parce qu'il n'existe pas d'alternative, soit parce que l'emploi de l'électricité pour cet usage présente des avantages évidents. On parle alors d'électricité spécifique ; c'est le cas de l'éclairage, des moteurs, de procédés industriels particuliers comme la filtration sur membranes, les torches à plasma, la chimie à très haute température, les télécommunications, l'audiovisuel, etc.

1.3.1 L'éclairage

Le cas de l'éclairage est particulièrement intéressant. Jusqu'à une date récente, l'éclairage électrique était assuré par des ampoules à incandescence ; en faisant chauffer à haute température un filament de tungstène, 1 500 - 2 000°, on provoque l'émission d'un rayonnement lumineux dont le spectre de longueurs d'onde se rapproche de celui de la lumière du jour. Mais il s'accompagne d'émissions infrarouges très importantes, ce qui explique le faible rendement lumineux de l'opération (cf. encadré 2). Il s'agit donc d'une application thermique haute température (effet joule) de l'électricité. Sa spécificité doit plus s'entendre, dans ce cas, comme son côté pratique que comme une réelle spécificité physique, puisqu'on peut envisager le chauffage d'un corps à cette température par d'autres moyens (gaz, pétrole, etc.). D'autres technologies d'éclairage existent, comme les tubes à décharge ou les diodes électroluminescentes qui reposent sur des principes physiques complètement différents et ne sont pas envisageables sans apport d'électricité, mais présentent des rendements lumineux bien supérieurs. Il s'agit là réellement d'un usage spécifique de l'électricité.

Encadré 2. Les technologies d'éclairage

Les technologies d'éclairage utilisent des phénomènes lumineux associés à différents principes physiques :

- l'incandescence, une émission de lumière due à la chaleur. Tout corps chauffé à haute température (>1 200°C) émet des rayonnements électromagnétiques dans le spectre visible. C'est sur ce principe que l'éclairage électrique s'est développé tout au long du XXe siècle ;
- l'électro-fluorescence, un phénomène optique associé à l'ionisation d'un gaz (par une décharge électrique ou par induction électromagnétique). C'est sur ce principe que reposent les tubes fluorescents et les ampoules fluo compactes qui sont en fait des tubes repliés sur eux-mêmes ;
- l'électroluminescence, un phénomène optique et électrique durant lequel un matériau semi conducteur émet de la lumière en réponse à un courant électrique qui le traverse, ou à un fort champ électrique. C'est sur ce principe que sont élaborées les diodes électroluminescentes qui équipent nombre de nos appareils électroniques et qui permettent aujourd'hui de fabriquer des lampes d'éclairage à plusieurs leds pour reproduire la lumière du jour.

Tableau 3. Efficacités lumineuses des différentes technologies d'éclairage

Technologie	Rendement (lumen* par watt, lm/W)	Durée de vie moyenne (heures)
Lampe incandescente	12 - 20 lm/W	1 000 h - 1 200 h
Lampe incandescente	60 - 100 lm/W	6 000 h - 15 000 h
Lampe à LED	≥ 100 lm/W	50 000 h - 100 000 h

*1 lumen = 1,464 · 10⁻³ W pour un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 555$ nm correspond au maximum de sensibilité de l'œil (vert-jaune).

Source : Cahier de Global Chance, n° 27.

Tableau 4. Rendement lumineux d'éclairages de différentes technologies et pour différents moyens de production d'électricité

Ampoule	Fluocompacte	LED	Incandescence
Electricité charbon Rdt = 25- 35%*	3 % - 5,5 %	> ou = 5,5 %	0,6 % - 1 %
Electricité nucléaire Rdt = 27- 30%*	2,8 % - 5 %	> ou = 5 %	0,6 % - 1 %

*Compte tenu des pertes du réseau électrique.

Source : Calcul des auteurs.

Dans tous les cas le rendement Energie utile (l'éclairage) sur Energie primaire reste très faible comme le montre le tableau 4.

1.3.2 Les usages thermiques

D'autres usages de l'électricité, en particulier les usages thermiques à basse ou moyenne température, peuvent entrer directement en concurrence avec des moyens de production plus directs de chaleur (combustibles fossiles ou biomasse, soleil, géothermie, etc.). C'est en particulier le cas du chauffage par effet joule (dissipation de chaleur dans une résistance électrique).

L'intérêt de ces usages non spécifiques de l'électricité sur le plan économique et environnemental doit être examiné au cas par cas, en tenant compte des technologies utilisées et des durées annuelles d'utilisation de ces usages. On sait en effet que les durées d'appel annuel d'électricité correspondant aux différents usages déterminent très largement le type d'outil de production électrique appelé sur un réseau électrique donné. Dans le cas d'un chauffage par effet joule, l'usage de l'électricité peut entraîner des émissions nettement supérieures à celle d'un chauffage au fuel ou au gaz naturel. L'installation de pompes à chaleur de performances suffisantes peut cependant redresser la situation, même pour cet usage saisonnier (cf. encadré 3).

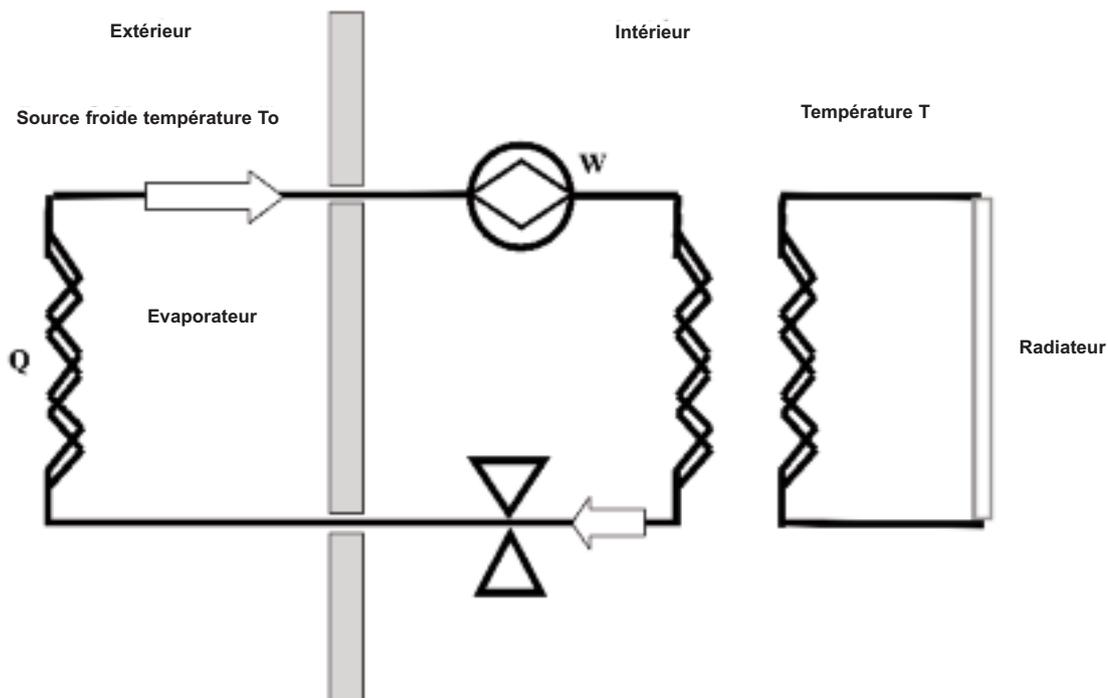
Encadré 3. Pompe à chaleur

La pompe à chaleur est un dispositif qui permet de transférer de la chaleur (des calories) d'un milieu froid vers un milieu plus chaud en y injectant par exemple de l'énergie mécanique fournie par de l'électricité. Pour cela, on utilise les calories du milieu froid à température T_0 (l'air extérieur ou l'eau d'une nappe phréatique à quelques degrés par exemple) pour évaporer un liquide sous faible pression, dont la température d'évaporation est proche de T_0 . Cette évaporation se fait par absorption d'une quantité de chaleur Q à ce milieu extérieur « froid ». On comprime ensuite cette vapeur grâce à un compresseur alimenté en électricité qui fournit une énergie W . La vapeur comprimée intègre l'énergie de compression W et sa température s'élève. Cette vapeur à haute pression est ensuite condensée. Elle se

transforme en liquide sous pression et cède l'énergie ($W+Q$), à travers un échangeur, au milieu que l'on veut chauffer à la température T . Le liquide est enfin détendu pour atteindre une pression assez basse et se vaporiser à nouveau au contact du milieu extérieur plus froid.

Grâce à l'énergie mécanique fournie pour la compression de vapeur, la pompe à chaleur prélève au milieu extérieur des calories basse température (qui ne sont pas directement utilisables) et les transfère à des températures suffisamment élevées (plusieurs dizaines de degrés) pour être utilisables.

Schéma 1. Schéma d'une pompe à chaleur de chauffage domestique

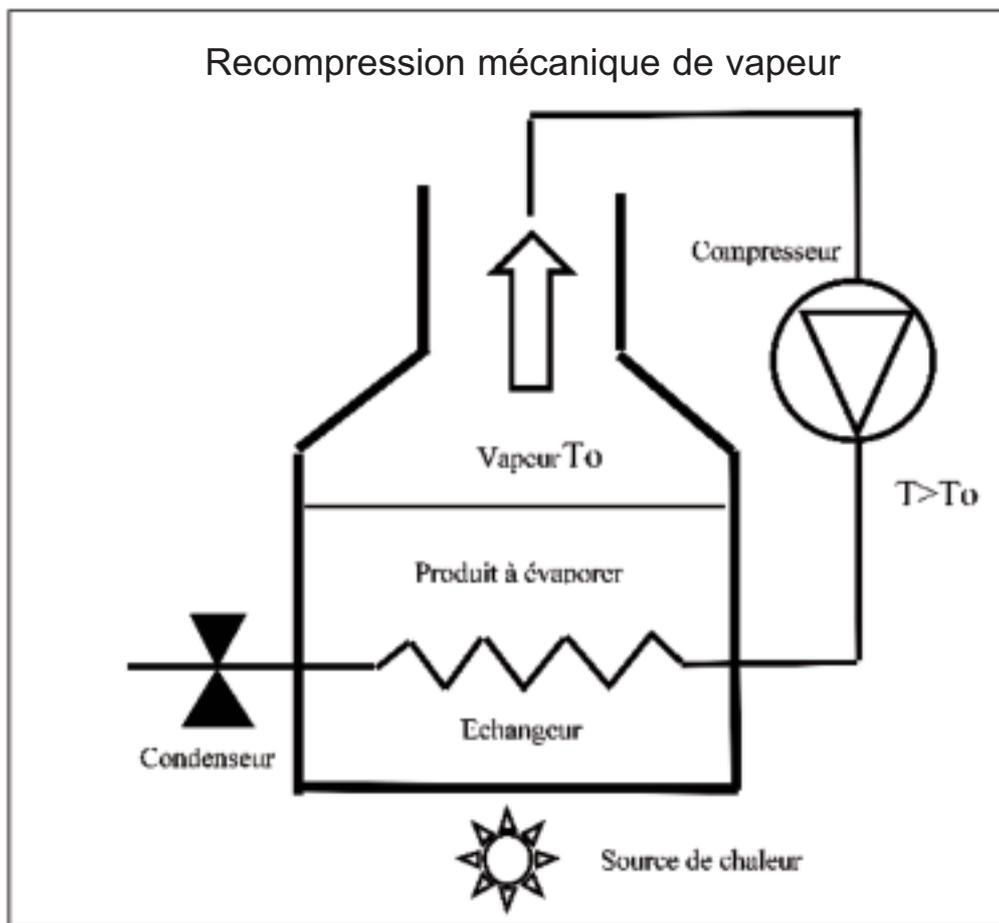


On peut ainsi transférer du milieu extérieur vers le milieu intérieur deux, trois ou quatre fois plus d'énergie (Q) à basse température que l'énergie électrique dépensée (W), et la restituer à la température T de chauffage (par exemple, 60°C).

De même, dans le domaine industriel, certaines applications thermiques de l'électricité présentent une efficacité intéressante. C'est le cas par exemple de la recompression mécanique de vapeur (RMV) qui permet, grâce à une dépense supplémentaire d'énergie électrique, de récupérer une grande partie de l'énergie thermique contenue dans des vapeurs au cours d'un processus de concentration d'un liquide.

Dans les processus industriels où l'on fait évaporer un liquide pour le concentrer, la vapeur est souvent perdue. La RMV consiste à récupérer cette vapeur, à augmenter sa température en la comprimant puis à réinjecter cette vapeur à plus haute température à travers un échangeur pour contribuer à réchauffer le liquide. On peut ainsi récupérer une grande partie de l'énergie thermique contenue dans la vapeur et l'utiliser (cf. schéma 2).

Schéma 2. Illustration de la recompression mécanique de vapeur (RMV)



Source : schéma des auteurs.

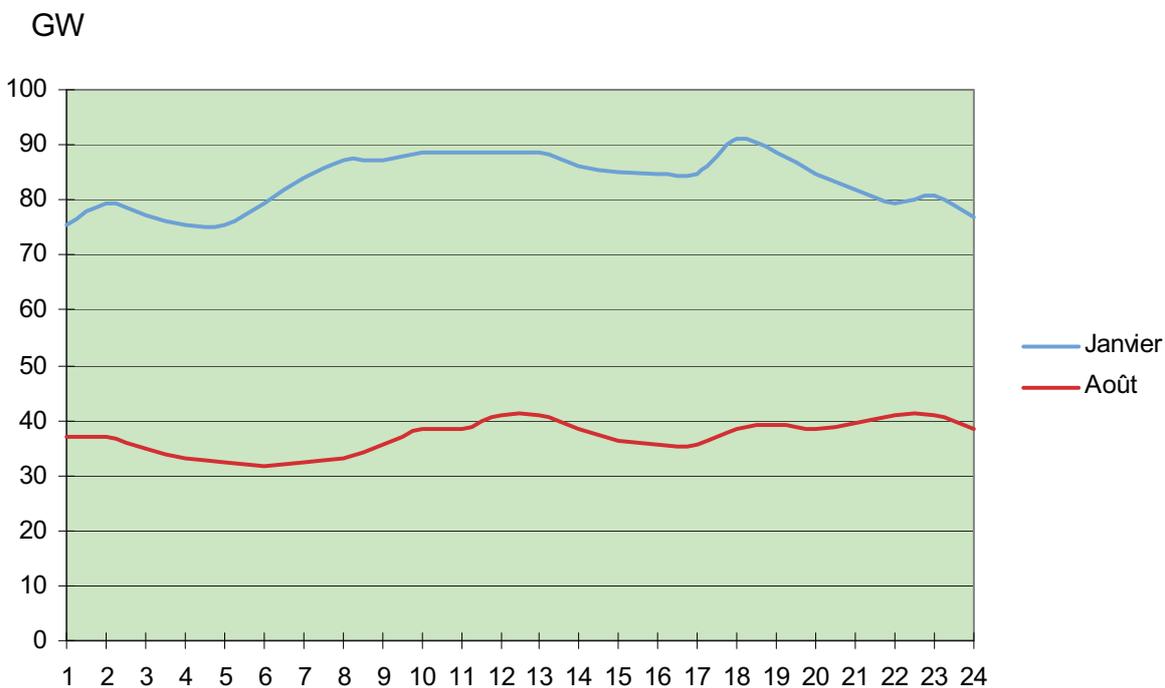
1.4 Courbes de charge et monotone de puissance : une problématique essentielle

Chacun des usages de l'électricité présente des caractéristiques temporelles spécifiques : pointe journalière du soir, entre 19 et 21 heures, pour la télévision et l'éclairage, pointe saisonnière des 4 mois les plus froids pour le chauffage des logements, besoins d'électricité de pompage agricole aux saisons sèches, besoins de climatisation aux heures chaudes pour les pays chauds, fonctionnement quasi continu de certains procédés industriels.

Ce sont les évolutions de la somme de ces usages, à chaque instant, qui constituent la courbe de charge de

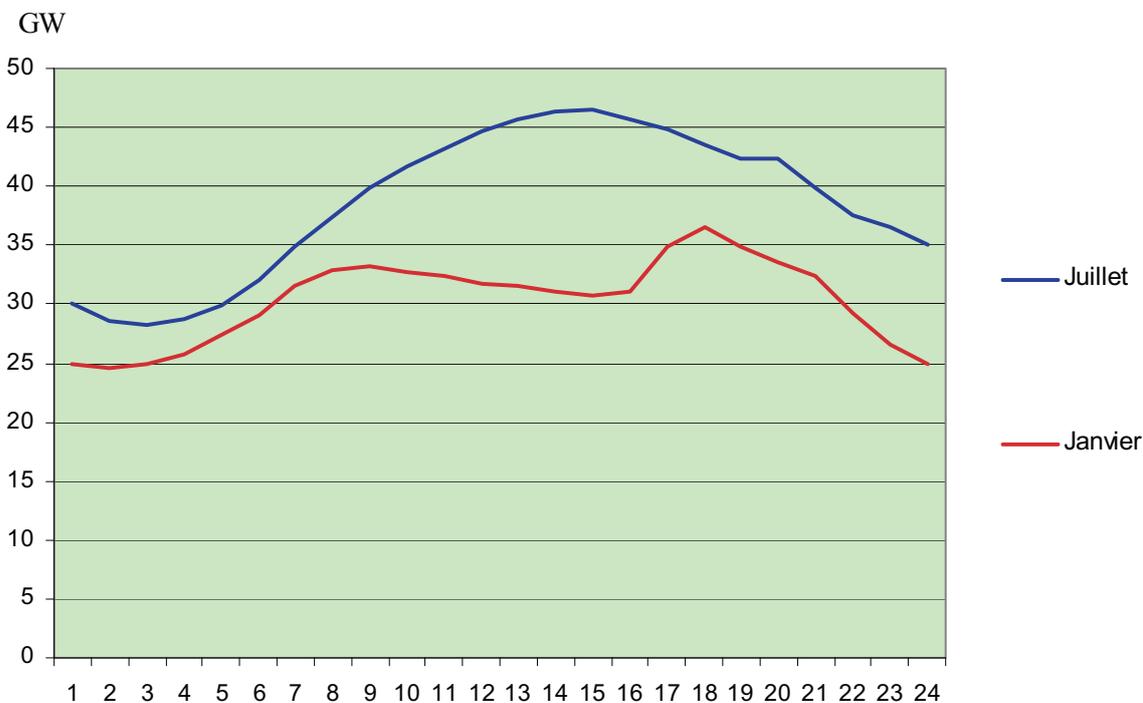
consommation d'électricité à laquelle les producteurs d'énergie doivent répondre. Ces courbes de charge peuvent différer fortement, selon les pays, les saisons et la nature des activités économiques qui contribuent à la consommation électrique (cf. graphiques 1, 2 et 3). En France, par exemple, la pointe saisonnière a lieu en hiver, avec une pointe horaire du soir située entre 19 et 22 heures. En Californie, la pointe saisonnière a lieu en été, avec une pointe journalière qui se situe entre 12h et 16 heures, qui sont les plus chaudes de la journée.

Graphique 1. Courbes de charge horaire hiver et été en France



Source : Réseau de transport de l'électricité (RTE).

Graphique 2. Courbes de charge horaire hiver et été en Californie



Source : California Energy Commission⁷.

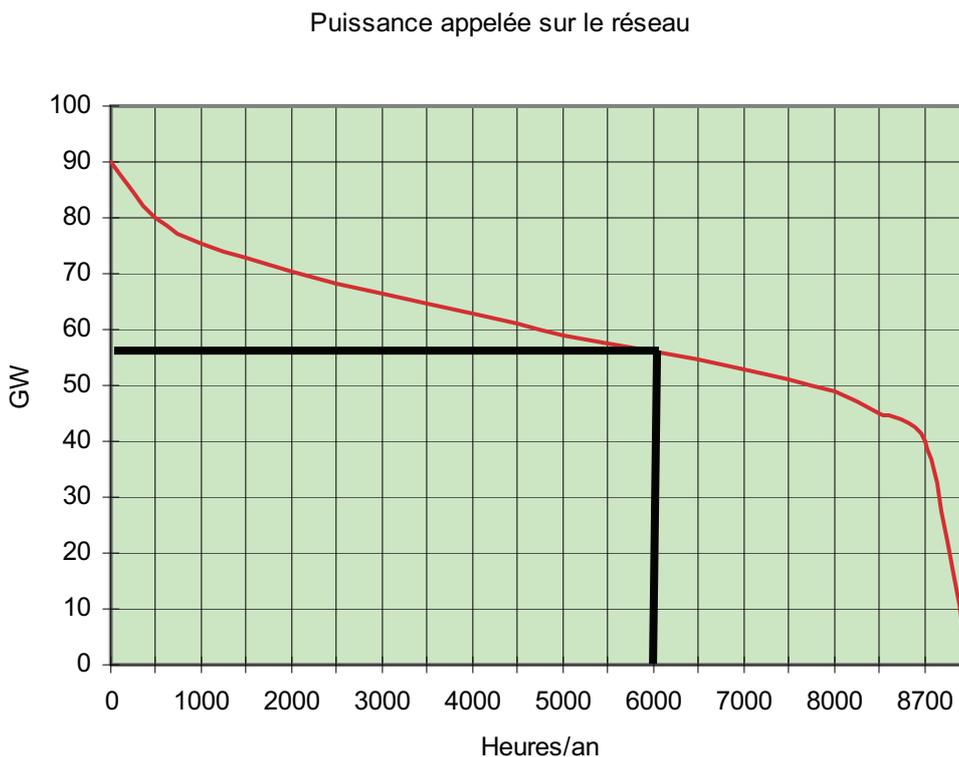
⁷ www.energyc.ca.gov/2007_publication/CEC-500-2007-2009.

Les électriciens ont l'habitude de représenter l'appel de puissance correspondant à l'ensemble des usages électriques d'un pays sous la forme d'une « monotone de puissance ». Cette courbe indique la puissance totale appelée sur le réseau en fonction de la durée annuelle de cet appel.

Le graphique 3 se lit ainsi : pendant 6 000 heures, au moins 55 GW de puissance ont été appelés sur le réseau français, ce qui représente 80 % de l'énergie électrique totale consommée pendant l'année 2005 (aire sous-tendue par la courbe jusqu'à 6 000 h) et pendant 1 000 heures au moins 75 GW, soit moins de 2 % de l'énergie.

Dans un pays comme la France, un peu plus de 80 % de l'énergie électrique appelée est pour des usages en « base », dont la durée dépasse 6 000 heures par an. Par contre, la pointe (moins de 1 000 heures de fonctionnement par an), qui suppose la mise à disposition d'une puissance plus importante (de l'ordre de 35 %), ne représente pas plus de 2 % de l'énergie appelée au cours de l'année. En résumé, ce vecteur énergétique présente des caractéristiques spécifiques : demande et offre sont liés à chaque instant et en tout point, avec les contraintes que cela entraîne en termes de parcs de production, de création, de maintenance et de régulation des réseaux de transport et de distribution.

Graphique 3. Monotone de puissance de la France en 2008



2. Critères d'un bon usage de l'électricité

2.1 Les critères

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'électricité était un produit noble, dont la production et la distribution exigeaient la mise en œuvre de technologies complexes et le recours fréquent à des matières premières rares et/ou épuisables. En outre, la plupart des filières de production d'électricité présentent divers dangers pour l'environnement (accidents, déchets, rejets liquides et gazeux, GES, etc.).

Au cœur de la question d'un « bon usage » de l'énergie, se pose tout particulièrement la question du bon usage de l'énergie électrique.

Encore faut-il préciser ce concept de « bon usage ». On conçoit bien en effet que ce terme n'ait pas le même sens pour les producteurs et distributeurs d'électricité que pour les ménages, les entreprises, les collectivités nationales ou la communauté scientifique internationale des climatologues préoccupée de réchauffement climatique. Plusieurs critères complémentaires entrent en jeu :

- les questions de ressources naturelles (rareté, coût, échéances d'épuisement, concurrences d'usage, etc.) ;
- les questions de sécurité (fourniture, accidents, etc.) ;
- les questions d'environnement local et global ;
- les questions économiques et sociales (avec leurs conséquences en termes de développement, d'égalité de traitement, de précarité énergétique, etc.).

Une prise en compte trop partielle ou partielle de ces critères peut conduire à des erreurs. Par exemple, focaliser le débat sur la question des émissions de GES peut amener à favoriser l'usage d'électricité, quand elle présente un

faible contenu en carbone, dans des applications où son emploi peut en fait conduire à des contre-performances en termes de sécurité, d'économie, ou d'environnement local et global. Pour les opérations qui concernent les économies d'électricité et pour les opérations de substitution de l'électricité à d'autres sources énergétiques, la question se pose en effet différemment. Dans le cas des opérations d'économie d'électricité, on est raisonnablement sûr de satisfaire simultanément aux trois premiers critères que sont la protection des ressources naturelles, la sécurité et la protection de l'environnement. Demeure le critère économique et social, à examiner au cas par cas.

Pour une substitution ou un usage nouveau de l'électricité dans une application traditionnellement réservée à d'autres sources d'énergie (le transport individuel en voiture électrique, par exemple), c'est le bilan comparatif sur les quatre critères précédents qu'il faut examiner. Ainsi, en substituant, par exemple, de l'électricité d'heures creuses de nuit en France à une combustion de gaz naturel, on diminuera les émissions de GES, mais, vu la part importante de nucléaire dans la fourniture d'électricité d'heures creuses, on augmentera d'autant les risques inhérents au nucléaire (en particulier la masse de déchets). En développant en Chine un parc de véhicules électriques de consommation finale d'électricité par kilomètre inférieure à celle des véhicules thermiques actuels, on permettra à la Chine de réduire sa dépendance pétrolière. Mais, dans la mesure où l'essentiel de la production d'électricité est assurée par des centrales à charbon dans ce pays, le bilan en termes d'émissions de CO₂ risque d'être négatif et les contraintes sur le réseau électrique fortement augmentées.

Il faut donc se préoccuper des conséquences marginales d'une action de substitution aux utilisations actuelles ou de placement nouveau d'électricité, en lieu et place d'une

énergie conventionnelle, en fonction des caractéristiques de cet usage et du parc de production actuel ou prévisible, qui servira à alimenter en électricité cette application.

2.2 Les émissions de gaz à effet de serre (GES)

La répartition du parc de production appelé pour répondre à une consommation d'électricité est fondamentale pour mesurer les impacts environnementaux associés à cette consommation, notamment les émissions de GES. Cette répartition s'opère selon un empilement des moyens de production, de la base vers la pointe, déterminé par des critères techniques et par les conditions de marché, sur un réseau plus ou moins interconnecté, selon les ensembles régionaux ou pays étudiés.

A titre d'exemple, nous allons décrire la situation d'un pays comme la France dans un ensemble plus vaste, l'Europe, partiellement interconnecté, et analyser les conséquences de la prise en compte de cet empilement des moyens de production, actuel et prévisible, à l'horizon 2020, sur le réseau européen, pour l'évaluation des émissions de CO₂ d'un kWh électrique.

Jusqu'en 2006, dans une France considérée comme pratiquement fermée au marché de l'électricité, la méthode de calcul des émissions au kWh consistait à définir soit un contenu moyen du kWh en CO₂ (en divisant les émissions totales du parc électrique par la production annuelle d'électricité on trouve un contenu moyen de 65 grammes de CO₂ par kWh, en 2008), soit des contenus saisonnalisés par usage :

- un régime dit « saisonnalisé », effet de l'adaptation du système électrique aux variations de consommation de chauffage et d'éclairage ;

- un régime fixe pour les applications qui fonctionnent de façon continue ou pseudo continue.

Le régime « saisonnalisé » dans ce calcul représente environ 20 % de la production, mais 50 % des émissions. Cette méthode des contenus « saisonnalisés », qui reflétait la situation de fonctionnement électrique français des années 2000-2004, produisait les résultats présentés par le tableau 5 pour le chauffage, l'éclairage, les usages intermittents et enfin les usages en base.

Mais ces méthodes ne permettent pas de mesurer le contenu en CO₂ du kWh associé à de nouvelles actions, qu'il s'agisse de nouveaux placements d'électricité ou d'économies d'électricité. Cela a conduit à proposer la méthode du « contenu marginal » : chaque incrément de consommation électrique supplémentaire ou de consommation économisée entraîne une sollicitation supplémentaire ou économisée de moyen de production marginal. Le calcul affecte donc à cet incrément (positif ou négatif) les émissions engendrées par ce surcroît (ou cette diminution) de production selon la règle « d'ordre de mérite » utilisée par les gestionnaires du réseau⁸ pour se fournir en électricité (à la fois sur le réseau national et sur le réseau européen). Actuellement, les situations dans lesquelles un incrément de consommation électrique fait appel à une augmentation de la production nucléaire représentent en France moins de 25 % du temps, très majoritairement en creux de nuit et en week-end, ce qu'on appelle la « marginalité nucléaire ». Le reste du temps, ce sont les autres moyens de production

Tableau 5. Emissions de CO₂ par kWh à partir du parc français : méthode des contenus saisonnalisés par usage

Application	Chauffage	Eclairage	Usages intermittents	Usages en base
Emissions de CO ₂ par kWh	180 grammes	100 grammes	60 grammes	40 grammes

Source : Cahiers de Global Chance, n°27.

⁸ Il s'agit de l'empilement des moyens de production selon un coût croissant de production. En France, les renouvelables fatales (vent hydraulique au fil de l'eau) puis le nucléaire, puis le charbon et le gaz, et enfin les turbines de pointe et l'hydraulique de pointe.

Tableau 6. Emissions de CO₂ par kWh : méthode des contenus marginaux en Europe

Application	Chauffage	Eclairage	Usages intermittents	Usages en base
Emissions actuelles de CO ₂ /kWh	500-600 grammes	600-700 grammes	600-700 grammes	450-550 grammes
Emissions prévisionnelles de CO ₂ /kWh	440 grammes	520 grammes	520 grammes	400 grammes

Source : Cahiers de Global Chance, n°27.

qui sont sollicités : le charbon (950 g CO₂/kWh), les cycles combinés à gaz (400 g CO₂/kWh), le fioul (800 g CO₂/kWh).

Cette méthode, beaucoup mieux adaptée que la précédente à l'évaluation environnementale des conséquences d'actions d'économie ou de substitution d'électricité, donne des résultats très différents, comme le montre le tableau 6.

Cette méthode permet aussi de dessiner l'évolution des émissions en fonction de l'évolution du parc de production européen : ainsi, sur la base des hypothèses du mix éner-

gétique du bilan prévisionnel européen, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) et du Réseau de transport de l'électricité (RTE) proposent un contenu de 400 grammes par kWh pour les usages de base en 2020 (cf. tableau 6).

Les écarts de résultat avec les méthodes de contenu moyen sont donc considérables. Cet exemple montre bien les précautions à prendre quand on veut analyser les conséquences, en termes d'émissions de GES, de politiques d'économie ou de substitutions d'électricité à d'autres formes d'énergie.

2.3 La préservation des ressources et la sécurité énergétique

En ce qui concerne la préservation des ressources épuisables et la sécurité de fourniture, une substitution ou un usage nouveau de l'électricité, qui engendre un surcroît d'appel au réseau électrique, entraîne des conséquences négatives, modulées selon la durée de cet appel : augmentation des importations d'énergie ou de recours aux ressources nationales et risques accrus de défaillance du réseau de transport d'électricité pour une application en pointe par exemple.

En contrepoint, une opération d'économie d'électricité est toujours positive sur le plan de la sécurité : économie de combustible, moindre sollicitation du réseau, etc. Il en est de même pour la lutte contre la précarité énergétique qui se développe, y compris dans tous les pays européens⁹, et dont la solution passe le plus souvent par des mesures d'efficacité énergétique et non d'abord de substitution d'énergie.

2.4 Les questions d'environnement local

Les questions d'environnement global, malgré leur importance pour l'avenir de la planète, ne doivent pas masquer les questions d'environnement liées à la production d'énergie, l'importance de leurs impacts, locaux ou régionaux, sur les populations et leur développement.

Dangers des centrales thermiques :

- les pollutions atmosphériques des centrales thermiques, en particulier les oxydes de soufre et d'azote, qui outre des effets très nocifs sur la santé des populations, contribuent à l'acidification des sols et des lacs, et menacent les espaces forestiers ;

⁹ Un foyer européen sur sept est estimé en danger de pauvreté, le prix de l'électricité ayant progressé en moyenne de 14 % entre 2005 et 2007, alors que 60 % des habitations ont été construites avant l'introduction des réglementations thermiques de l'habitat.

- la pollution thermique des fleuves par les rejets thermiques des centrales, d'autant plus importantes que les rendements des cycles utilisés sont plus faibles ;
- la pollution et les risques radioactifs des cycles nucléaires, depuis les mines d'uranium jusqu'aux déchets ultimes, en passant par les rejets et effluents des installations.

Pour l'ensemble de ces filières se posent souvent, en outre, des questions de concurrence d'usage des sols entre utilisation agricole et utilisation industrielle de la terre (c'est le cas en Inde aujourd'hui, par exemple).

2.5 Les questions économiques

Les questions économiques et financières revêtent un caractère très particulier dans le cas de l'électricité car on ne sait pas la stocker. Il faut, sur les réseaux maillés, produire chaque instant une puissance électrique juste suffisante pour satisfaire une demande très variable dans le temps et dans l'espace (cf. section 1). Un défaut de puissance disponible se traduirait par une chute de la fréquence de l'électricité pouvant entraîner l'effondrement du réseau. Sur les installations isolées, pour assurer une desserte à tout moment, un stockage de l'électricité ou un recours à un auxiliaire (un diesel, par exemple) sera souvent indispensable comme appui au principal moyen de production, renouvelable ou fossile.

2.5.1 Les moyens de production

Il existe une grande variété de moyens de production d'électricité de caractéristiques économiques très diverses :

- des énergies fatales comme l'hydraulique au « fil de l'eau », l'éolien ou le photovoltaïque, produites en fonction des caractéristiques météorologiques, ou les alternances jour-nuit sans lien avec l'intensité de la demande d'électricité, que les producteurs ont intérêt à écouler en priorité sur le réseau, quelque soit leur coût réel de production ;
- des énergies comme le nucléaire dont le coût de production est grevé de charges fixes très importantes (amortis-

Dangers des centrales à énergie renouvelable :

- les déplacements de population, les atteintes aux écosystèmes, l'érosion, les modifications sédimentaires, les émissions de méthane éventuellement entraînées par l'édification des installations hydrauliques ;
- la concurrence d'usage des sols et des nuisances diverses (paysage, bruit, entrave à la navigation) potentiellement entraînées par l'installation de parcs éoliens et de centrales photovoltaïques ;
- la concurrence d'usage des sols et une déforestation éventuelle pour les centrales à biomasse.

sement des investissements et frais de personnel), mais de charges variables faibles (dont le combustible uranium), à réserver de préférence à des usages de très longue durée ; leur coût augmente très vite quand leur temps de mobilisation annuelle décroît¹⁰ ;

- des énergies comme le charbon, avec une part de combustible plus élevée dans un coût total encore largement dépendant de frais fixes, avec des coûts qui varient de 40 % environ entre une utilisation en continu et une utilisation de 3 000 heures par an ;
- le gaz naturel, qui fournit une électricité dont le coût total est très sensible au coût du combustible (qui représente, selon les filières, 60 à 75 % du coût total) ;
- le fioul, réservé aux utilisations de courte durée - quelques centaines d'heures par an - tant le poids du combustible est important dans la constitution du coût total.

Globalement, les coûts de production sont très variables, en fonction des filières et des caractéristiques de leur mise en œuvre temporelle, pouvant conduire à des rapports de coûts de production de 1 à 10 entre l'électricité produite en période creuse (un week-end d'été en Europe, par exemple) et en période de pointe saisonnière (un jour de semaine de grand froid sur l'Europe, un jour de grande chaleur en Californie, etc.).

¹⁰ Le coût de production du nucléaire est multiplié par 2,5 quand on passe d'une durée d'utilisation annuelle de 8 000 heures à une durée de 3 000 heures.

Ces caractéristiques de coût variables différencient fortement l'électricité de sources d'énergie telles que le charbon, le pétrole, le gaz ou le bois, dont les coûts ne dépendent pratiquement pas des caractéristiques temporelles de la demande, ces combustibles étant plus ou moins facilement stockables.

2.5.2 Les réseaux de transports et de distribution

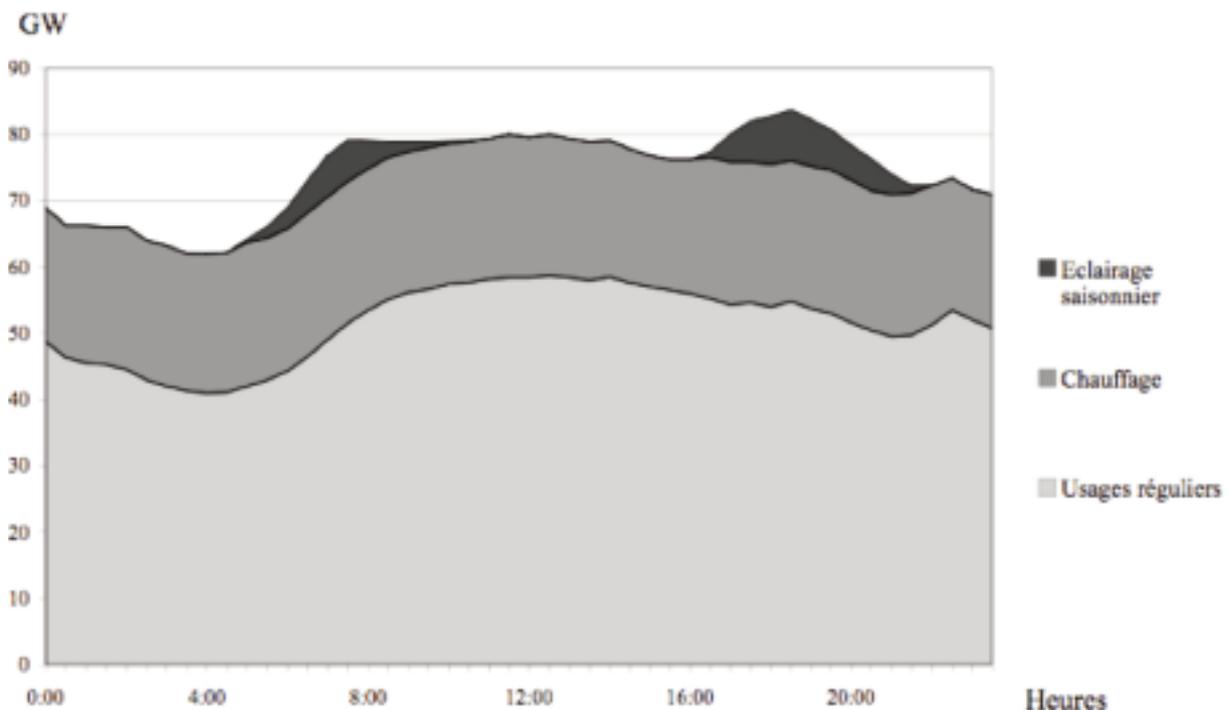
Le réseau est dimensionné par la *puissance instantanée* à acheminer aux clients finaux à chaque instant. C'est le cas pour les échanges internationaux d'énergie haute tension, mais aussi au niveau régional ou local, où le réseau doit pouvoir absorber, à tout moment, les surconsommations journalières ou saisonnières qu'entraînent les demandes des clients finaux.

Le graphique 4, qui décrit grossièrement l'appel de puissance au cours de 24 heures, un jour d'hiver en France, montre l'ampleur de cette contrainte et des coûts économiques inhérents pour le réseau.

La bande inférieure du graphique regroupe un ensemble d'usages réguliers d'électricité, quelle que soit la saison, avec un creux de puissance vers 4 heures du matin, autour de 40 GW. La bande intermédiaire représente la puissance appelée sur le réseau par le chauffage électrique un jour d'hiver, de l'ordre de 20 GW, et qui se présente comme un ruban quasi constant au cours des 24 heures. Au jour le plus froid de 2009, le 7 janvier, l'épaisseur de ce ruban atteignait 34 GW. S'ajoutent deux pointes d'hiver, qui tiennent principalement aux nécessités supplémentaires d'éclairage, autour de 7 à 9 heures et surtout de 19 à 22 heures. On voit sur cet exemple que le seul chauffage électrique, qui représente moins de 15 % des besoins d'énergie électriques annuels, exige de sur dimensionner globalement le réseau électrique pour pouvoir acheminer 35 GW supplémentaires (70 % de plus), avec les conséquences locales, en termes d'investissement et d'entretien du réseau, que cela peut entraîner, selon les régions.

Les comparaisons économiques entre situation initiale et finale, à la suite d'une opération d'économie ou de substitution d'électricité, ne peuvent donc être faites sans tenir

Graphique 4. Puissance électrique appelée au cours d'une journée d'hiver



Source : cahiers de Global Chance, n°27.

compte de la durée moyenne annuelle du recours à l'application envisagée. Il faudra donc apprécier les gains économiques éventuels engendrés par l'économie ou la substitution de combustibles en tenant compte de leurs coûts, et éventuellement de leur évolution, ainsi que des caractéristiques de coût de l'électricité pour l'usage envisagé.

2.6 Et à l'horizon de 20 ans ?

A terme, par exemple à l'horizon de 2020 ou 2030, la situation peut évoluer sous l'influence de plusieurs paramètres : extension des réseaux électriques vers des zones non encore électrifiées, décarbonisation croissante des parcs électriques, pénétration plus complète des procédés économes, arrivée à maturité de ruptures technologiques dans les procédés.

En particulier, concernant les émissions de CO₂, on peut imaginer des pénétrations plus ou moins rapides d'électricité renouvelable et/ou nucléaire dans les différents ensembles. Dans des ensembles comme l'Europe ou les Etats-Unis, où le taux de croissance des besoins prévisible est très limité, le taux de pénétration ne peut être au maximum que proche de celui du remplacement des unités obsolètes. Avec l'hypothèse d'une durée de vie moyenne des installations de production, de l'ordre de 40 ans¹¹, le taux maximum de renouvellement est de 2,5 % par an.

L'inertie du système de production électrique dans ces pays est donc très forte, et le mixage de production restera assez constant jusqu'à 2025, au moins. La situation est différente en Inde et en Chine, où s'ajoutent à des besoins de renouvellement du même ordre qu'en Europe des besoins importants de production nouveaux pour satisfaire l'accroissement de la demande d'électricité (à des rythmes respectifs de 6,5 % et de 9 % par an, enregistrés ces 20 dernières années).

Mais il faut aussi prendre conscience que le taux de pénétration des énergies non carbonées dans les bilans électriques dépendra au moins autant de la rigueur du contrôle de la demande électrique dans les différents ensembles que des efforts accordés aux énergies électriques

En résumé, des émissions de GES, des conséquences sur l'environnement local, des coûts économiques très contrastés, souvent dans un rapport de 1 à plus de 15, pour la fourniture ou l'économie d'un kWh final, selon le lieu géographique et la temporalité de l'usage qui en est fait, caractérisent les consommations d'électricité.

non carbonées. On retrouve là une contradiction potentielle entre l'accroissement des efforts de substitution par de l'électricité dans des applications traditionnellement réservées aux combustibles fossiles et la volonté de réduire la part d'électricité carbonée dans le parc électrique d'un pays, et donc les émissions de ce parc au kWh.

La pénétration plus complète de procédés économes en énergie électrique, ou de procédés innovants économes en électricité, échappe à cette critique et contribue, par la détente qu'elle apporte en termes de demande électrique, à l'efficacité de pénétration de l'électricité non carbonée dans le système de production électrique des ensembles concernés.

Les procédés en rupture les plus porteurs à terme concernent essentiellement la sidérurgie. Dans ce domaine dominé par l'usage de combustibles fossiles, les projets de Recherche & Développement abondent : recyclage des gaz de gueulard après décarbonatation, capture et stockage du CO₂, qui ne concernent pas l'électricité. Certaines autres ruptures plus radicales, comme le recours à l'hydrogène pour réduire l'oxyde de fer ou l'électrolyse, porteuses d'économies importantes de combustibles fossiles supposent le recours à l'électricité. Les quantités d'énergie primaire et de CO₂ réellement économisées dépendront à la fois de l'efficacité de ces procédés, du rendement moyen de production et du taux de décarbonisation des parcs de production d'électricité au moment de leur usage.

¹¹ De 35 à 50 ans pour le nucléaire, 45 ans pour le charbon, 35 pour le gaz naturel, 40 pour le pétrole, >100 pour l'hydraulique, 20 pour l'éolien et le photovoltaïque.

3. La consommation d'électricité en Chine, Etats-Unis, Inde et Union européenne

3.1 Quatre grands ensembles aux situations contrastées

La Chine, l'Inde, l'Union européenne et les Etats-Unis constituent quatre grandes entités géographiques et politiques puissantes par leur population et leur niveau économique, et représentatives de situations contrastées : deux entités « riches », l'Union européenne et les Etats-Unis, au

modèle de développement assez différent, et deux grands pays émergents qui se situent à des niveaux différents de puissance économique.

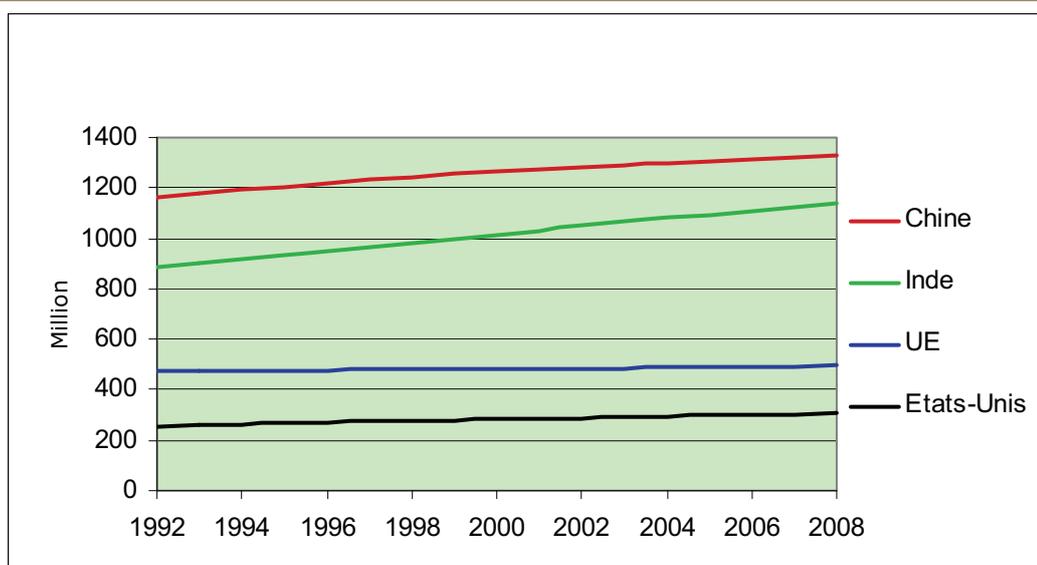
3.1.1 Population

Tableau 7. Population

2008	Superficie	Population			
	million km ²	totale million	croissance % par an	urbaine (2006) %	densité hab/km ²
Chine	9,6	1 328	0,6	41	140
Inde	3,3	1 141	1,39	28	350
UE	4,4	496	0,42	73	115
Etats-Unis	9,6	305	0,98	80	32

Source : Enerdata.

Graphique 5. Evolution des populations



Source : graphique des auteurs, données Enerdata.

La population totale des quatre ensembles, de 3 270 millions d'habitants, représente 49 % de la population mondiale. La croissance démographique est nettement plus forte en Inde qu'en Chine et aux Etats-Unis, qu'en Union européenne. La densité de population de la Chine apparaît relativement faible par rapport à celle de l'Inde, mais sa superficie, presque trois fois plus importante, recouvre d'immenses régions peu peuplées.

Comme le montre le graphique 5, c'est en Inde que la croissance de la population est la plus forte durant les vingt-six dernières années.

3.1.2 Produit intérieur brut

Le produit intérieur brut (PIB) mesure l'activité économique d'un pays. Il est couramment mesuré aux prix du marché (PIB courant). Le PIB aux prix du marché est la somme de la valeur ajoutée (mesure de la production nette d'une branche ou d'un secteur en unités monétaires) au coût des facteurs, plus les taxes indirectes, moins les subventions.

Pour supprimer l'effet de l'inflation, les valeurs monétaires peuvent être mesurées à prix constant d'une année de référence : on calcule ainsi le PIB à prix constant (ici prix constant de 2005).

Le taux de parité de pouvoir d'achat (PPA) mesure le taux de conversion de la monnaie qui égalise le pouvoir d'achat

des différentes monnaies. Une somme d'argent donnée, convertie en monnaies différentes au taux PPA, permet d'acheter la même quantité de biens et services dans tous les pays. En d'autres termes, le PPA élimine les différences de niveaux de prix entre plusieurs pays. De plus, les taux PPA ne fluctuent pas comme les taux de change, ce qui permet en particulier une comparaison plus stable des intensités énergétiques.

Les taux de change à PPA utilisés pour calculer les PIB à PPA de la base de données Enerdata sont issus des publications de la Banque mondiale (ces valeurs sont universellement utilisées, notamment par le Fonds monétaire international [FMI]). Or, la Banque mondiale, qui n'avait pas révisé ses données depuis très longtemps, l'a fait en 2007, ce qui a entraîné des modifications considérables des valeurs des PIB à PPA, surtout pour les pays à forte évolution économique. C'est ainsi que pour la Chine, à quelques mois d'intervalle, le PIB à PPA pour l'année 2005 est passé de 8 819 milliards de dollars dans l'ancienne évaluation à 5 333 dans la nouvelle évaluation (soit un rapport de 1,65). Cet écart varie évidemment d'un pays à l'autre.

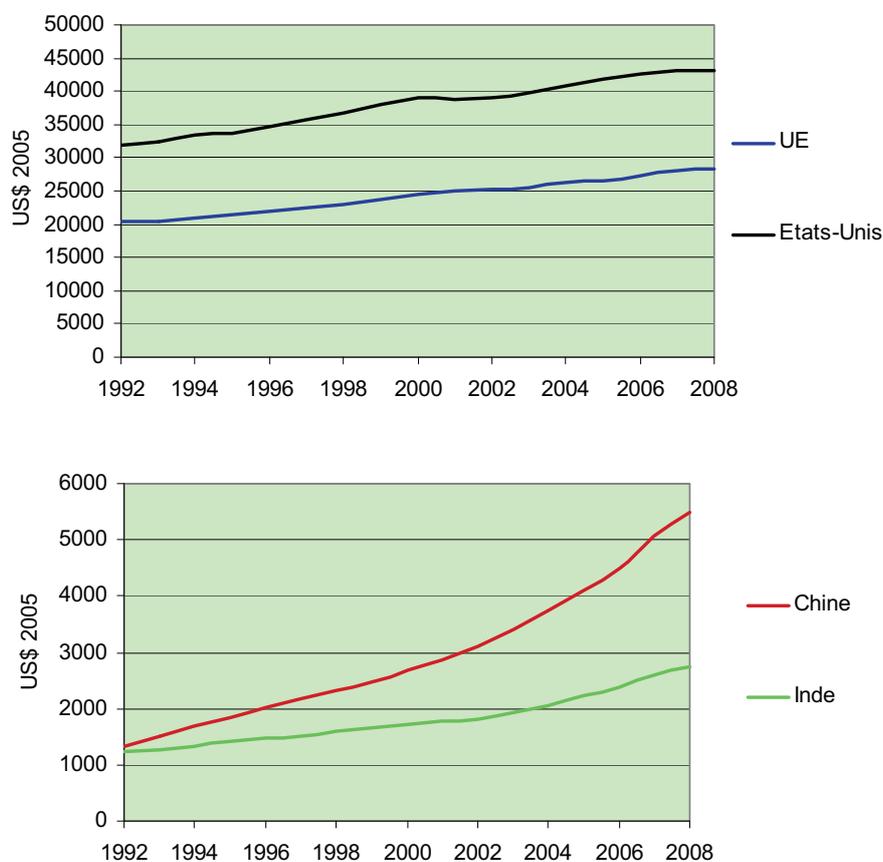
Une telle modification a des implications importantes dans la comparaison des pays (notamment sur les valeurs des intensités énergétiques). Le tableau 8 indique les nouvelles valeurs des PIB à PPA.

Tableau 8. PIB en 2008

2008	PIB				
	courant	à prix constant 2005	à PPA 2005	croissance	par habitant
	USD courant milliardsUSD	USD 2005 milliards USD	USD 2005 milliards USD	% par an	PPA USD 2005
Chine	4 110	3 059	7 272	9	5 477
Inde	1 267	1 036	3 114	7,3	2 729
UE-27	18 235	14 641	14 010	1,1	28 243
Etats-Unis	14 499	13 156	13 156	1,1	43 095

Source : Enerdata et Banque mondiale.

Graphique 6. Evolution des PIB à PPA par habitant



Source : Enerdata.

En valeur courante, le PIB de l'Union européenne est nettement supérieur à celui des Etats-Unis, lui-même 3,5 fois supérieur à celui de la Chine et 11 fois supérieur à celui de l'Inde. Les écarts sont moins importants sur les PIB à PPA mais, en valeur par habitant, le PIB à PPA des Etats-Unis est 1,5 fois celui de l'Union européenne, près de huit fois celui de la Chine et 16 fois celui de l'Inde.

Le graphique 6 met en évidence cet écart, ainsi que les taux de croissance très différenciés de la Chine et de l'Inde.

Tableau 9. Structure du PIB (valeurs ajoutées)

	Industrie %	Services %	Agriculture %
Chine	50	40	10
Inde	25	52	15
UE-27	24	62	2
Etats-Unis	18	74	2

Source : Enerdata.

Le tableau 9 indique la part des grands secteurs d'activités (valeurs ajoutées) dans les PIB. La somme des parts est de 100 % pour la Chine mais inférieure pour les trois autres entités (du fait des taxes et subventions). Ce tableau est cependant intéressant car il montre la place notable qu'occupe encore l'agriculture dans les deux pays émergents, notamment en Inde.

Si en Chine l'industrie représente encore la moitié du PIB, ce sont les services qui occupent la première place dans les trois autres pays : dans sa structure du PIB, l'Inde est plus proche que la Chine des pays riches.

3.2 Les consommations d'énergie, leur évolution et leurs indicateurs globaux

3.2.1 Les consommations d'énergie et leur évolution

Le stade de « l'énergie primaire » correspond aux matières premières énergétiques fossiles (charbon et lignite, pétrole, gaz naturel, biomasse - bois, végétaux, déchets), à l'énergie directement fournie par l'hydraulique, l'éolien, le solaire (thermique ou photovoltaïque) et la chaleur fournie par les réacteurs nucléaires dans les centrales nucléaires¹².

Le stade de « l'énergie finale » correspond aux produits énergétiques qui sont livrés au consommateur. Dans certains cas, le produit final peut être identique au produit primaire, ou très proche de celui-ci, comme pour le gaz naturel et le charbon. Dans la plupart des cas, le produit final résulte d'une transformation effectuée à partir des produits primaires : c'est le cas de l'électricité produite par les centrales à combustibles fossiles ou à biomasse et des carburants et autres produits pétroliers produits à partir du pétrole brut dans les raffineries. Pour des raisons de cohérence, on inclut dans la consommation d'énergie finale la consommation des usages non énergétiques des produits énergétiques : matières premières, essentiellement produits pétroliers et gaz naturel, des industries chimiques (matières plastiques, engrais, etc.).

La majeure partie de la différence entre la valeur de la consommation d'énergie primaire et celle d'énergie finale vient du fait qu'une quantité importante d'énergie est perdue sous forme de chaleur dans les centrales électriques thermiques (à combustibles fossiles, à biomasse, ou nucléaires) .

La consommation primaire totale des quatre entités est de 6 738 Mtep, soit 55 % de la consommation mondiale de 12 214 Mtep. Les Etats-Unis, la Chine et l'Union européenne sont les trois plus grands consommateurs mondiaux. L'Inde est en cinquième position, derrière la Russie (691 Mtep) et devant le Japon (508 Mtep).

La consommation par habitant, primaire ou finale, des Etats-Unis est deux fois celle de l'Union européenne, cinq fois celle de la Chine et quatorze fois celle de l'Inde.

Le graphique 7 montre les évolutions de consommations d'énergie depuis 1992. En 2008, les trois ensembles Chine, Union européenne et Etats-Unis ont des consommations totales voisines du fait de la très forte croissance économique de la Chine depuis 2000. La consommation d'énergie de l'Inde a augmenté à un rythme beaucoup plus faible.

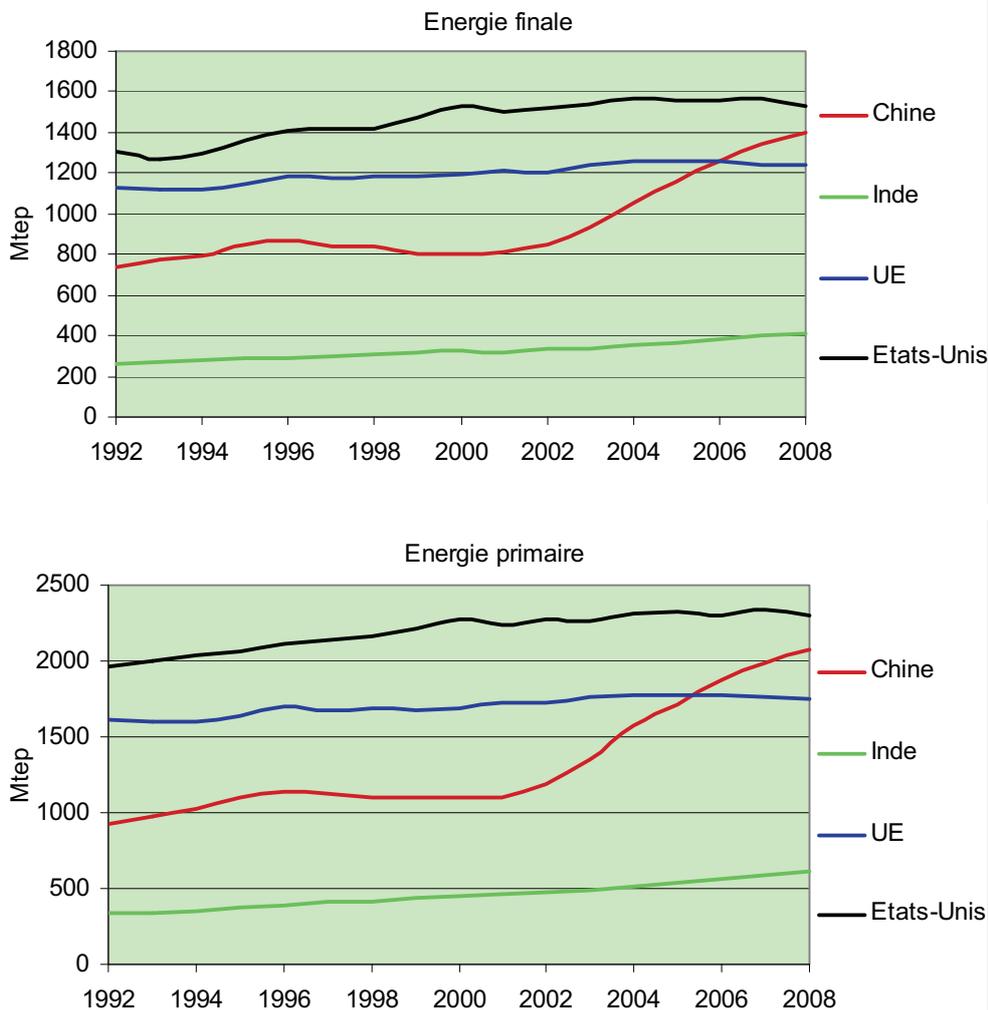
Tableau 10. Consommations d'énergie en 2008

	Consommation d'énergie primaire		Consommation d'énergie finale	
	totale Mtep	par habitant Tep	totale Mtep	par habitant Tep
Chine	2 071	1,56	1 401	1,05
Inde	611	0,54	408	0,36
UE	1 754	3,54	1 245	2,51
Etats-Unis	2 302	7,54	1 529	5,01

Source : Enerdata.

¹² Par une convention très discutable, cette chaleur est comptabilisée comme « électricité primaire », ce qui conduit à une comptabilité différente en énergie primaire pour l'électricité d'origine nucléaire et, par exemple, l'électricité d'origine hydraulique. Ainsi, une valeur de 1 Mtep d'énergie primaire pour l'électricité d'origine nucléaire correspond à une production brute d'électricité de 3,85 TWh tandis que 1 Mtep d'énergie primaire pour l'électricité hydraulique, éolienne ou photovoltaïque correspond à une production brute d'électricité de 11,63 TWh.

Graphique 7. Evolution des consommations totales d'énergie



Source : Enerdata.

Le graphique 8 montre l'évolution des consommations par habitant. Depuis 1992, ces consommations sont restées stables pour l'Union européenne et pour les Etats-Unis, ont peu augmenté pour l'Inde, mais plus nettement pour la Chine (tout en restant nettement inférieures à celles des « pays riches »).

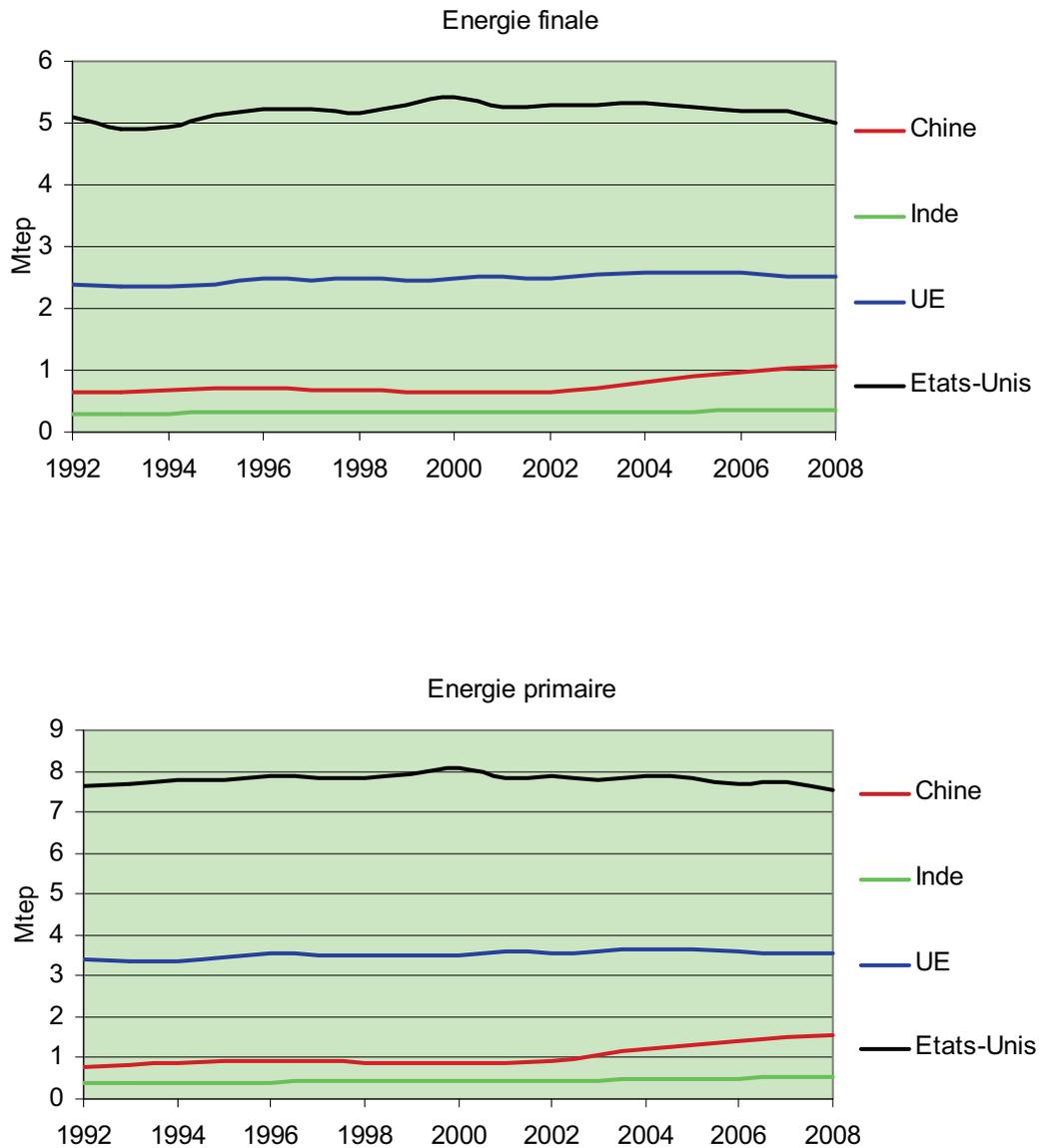
Les consommations sectorielles par habitant de l'Union européenne et des Etats-Unis sont pratiquement stables sur l'ensemble de la période, avec une légère croissance des transports qui semble s'atténuer, voire se renverser légèrement ces dernières années.

Ce qui est plus surprenant est de constater la faible augmentation des secteurs autres que l'industrie en Inde et

surtout en Chine où l'on constate pour ces secteurs une quasi stabilité jusqu'en 2000 et une faible croissance depuis, tandis que l'augmentation considérable de la consommation de l'industrie « tire » la consommation totale vers le haut.

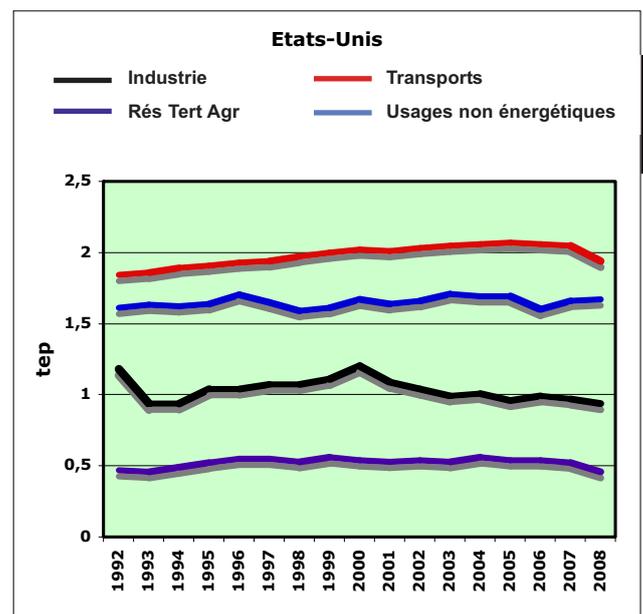
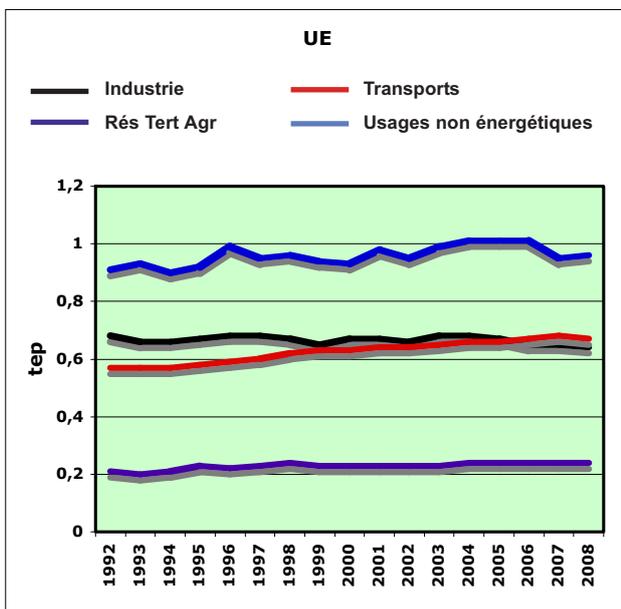
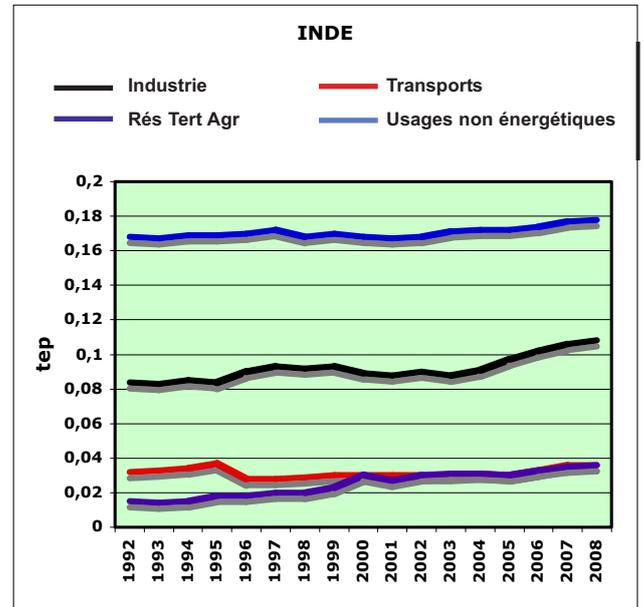
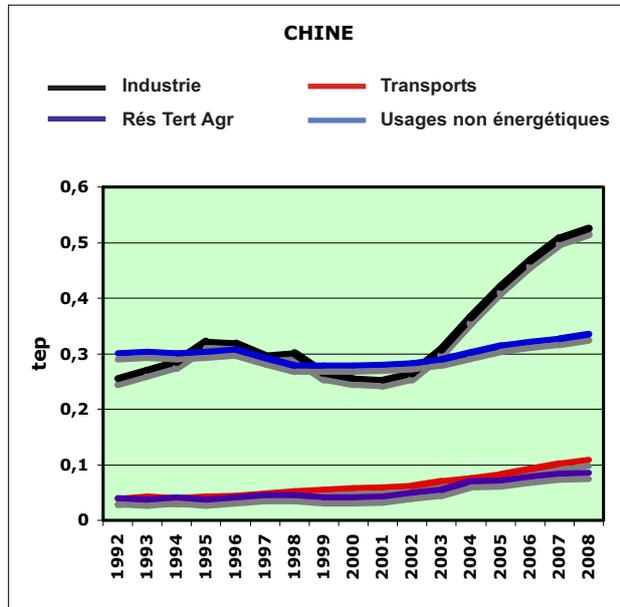
Nous verrons à la section 3.3 consacrée à l'analyse secteur par secteur, que l'évolution quantitative des consommations d'énergie est accompagnée d'une évolution des consommations de chaque produit énergétique, notamment du secteur résidentiel et tertiaire (baisse de la consommation finale de biomasse et de charbon au profit notamment de l'électricité).

Graphique 8. Evolution de la consommation d'énergie par habitant



Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

Graphique 9. Evolution des consommations d'énergie finales par habitant et par secteur



Source : calcul des auteurs, données Enerdata

3.2.2 Les intensités énergétiques

Pour comparer les pays entre eux, outre la consommation par habitant, on utilise un autre indicateur, « l'intensité énergétique », rapport de la consommation d'énergie (primaire ou finale) au produit intérieur brut, calculé à PPA afin de tenir compte des différences de niveau de vie¹³.

Cet indicateur (qui s'exprime en général en tonne équivalent pétrole/1000 US\$ - tep/1000 US\$ ou en kilo équivalent pétrole/ US\$ - kep/US\$) caractérise le degré de « sobriété énergétique » ou de « voracité énergétique » d'un pays ou d'un mode de développement en mesurant la quantité d'énergie consommée pour un même niveau de production de biens et de services.

L'intensité énergétique dépend de facteurs comme le climat (plus il fait froid, plus on consomme d'énergie pour se chauffer, à niveau économique égal) et de la structure de l'économie (si un pays a beaucoup d'industries lourdes, fortes consommatrices d'énergie, son intensité énergétique sera plus élevée). Mais, lorsque l'on compare des pays à structures économiques voisines, le facteur essentiel est l'efficacité avec laquelle l'énergie est produite et consom-

mée ; très schématiquement, plus l'intensité énergétique est basse, plus l'efficacité est grande¹⁴.

Le tableau 11 montre une progression nette de l'intensité énergétique depuis celle de l'Union européenne jusqu'à celle de la Chine. Dans le couple des pays riches, les Etats-Unis sont nettement plus « énergivores » que l'Union européenne. Du côté des pays émergents, l'Inde paraît relativement « sobre en énergie » tandis que l'intensité de la Chine est très élevée, nettement au-dessus de celle des Etats-Unis¹⁵. Cette forte intensité de la Chine est très probablement liée en premier lieu au poids de l'industrie lourde dans son économie mais également, si on la compare à l'Inde, à la rigueur du climat dans une moitié de la Chine.

Le graphique 10 montre que les intensités énergétiques des quatre ensembles ont toutes diminué sur la période 1992-2008. Une diminution régulière et relativement forte pour l'Inde, plus modérée mais significative pour l'Union européenne et les Etats-Unis, très forte pour la Chine entre 1992 et 2000, puis stabilisée et reprenant une décroissance depuis 2005, tendance qui devrait se poursuivre du fait des objectifs de réduction fixés par le gouvernement chinois.

Tableau 11. Intensités énergétiques en 2008

Kep par US\$ PPA05	Intensité énergétique finale	Intensité énergétique primaire
Chine	0,193	0,285
Inde	0,131	0,196
UE	0,089	0,125
Etats-Unis	0,116	0,175

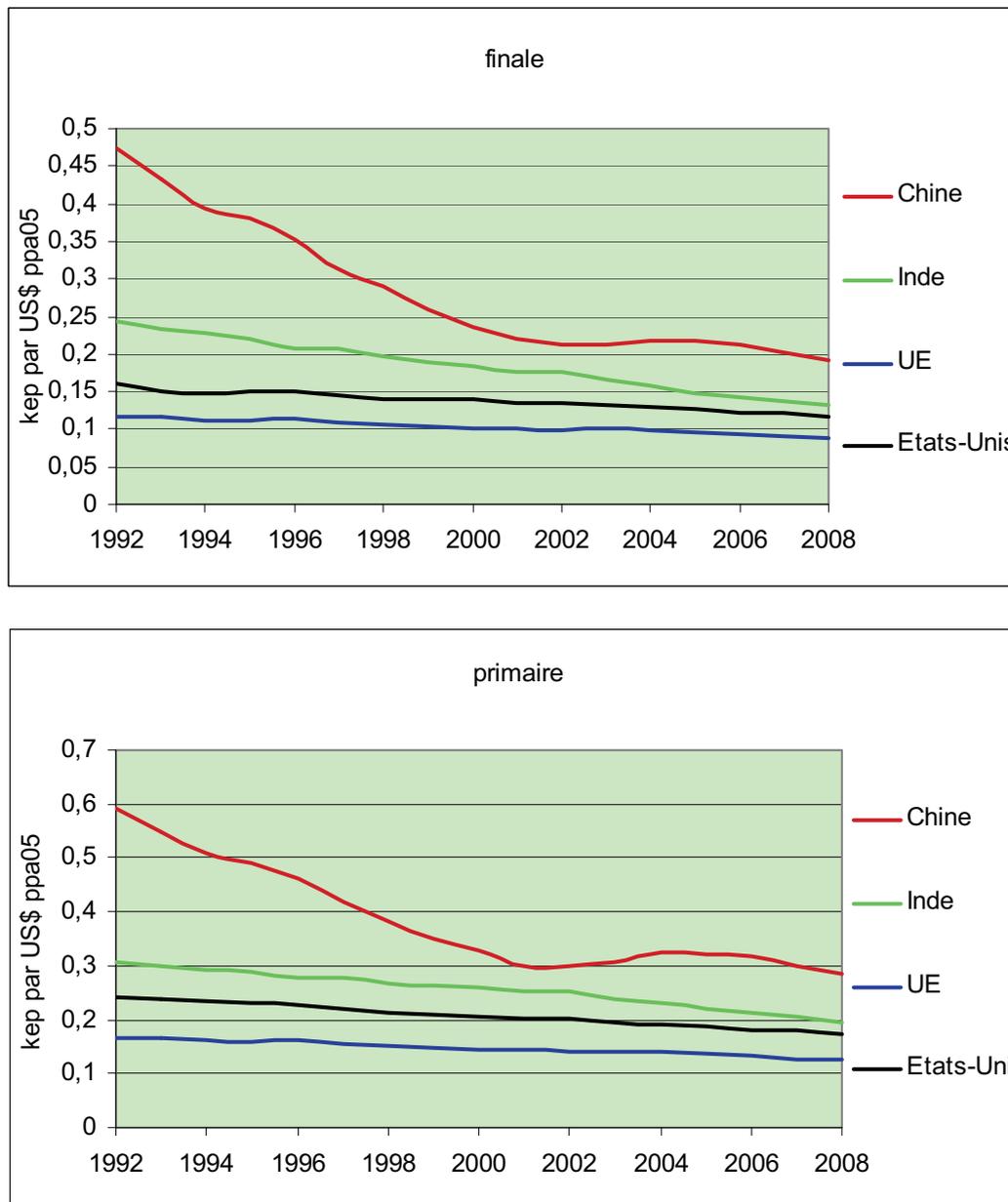
Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

¹³ Avec toutes les réserves sur l'évaluation des PPA signalées plus haut.

¹⁴ Une étude récente *Evaluation de l'efficacité énergétique dans l'Union européenne (15)* de la Commission européenne et l'Ademe, réalisée par quatorze équipes nationales (réseau Odyssee-MURE), présente une analyse détaillée de l'efficacité énergétique dans l'UE-15. L'étude identifie les facteurs qui déterminent l'intensité énergétique d'un pays, permet d'en séparer les effets, de définir et d'évaluer un indicateur proprement dit de l'efficacité énergétique (en ligne sur le lien www.odyssee-indicators.org).

¹⁵ Avec les « anciens » PIB à PPA, l'intensité énergétique de la Chine était égale à celle des Etats-Unis.

Graphique 10. Evolution des intensités énergétiques



Source : Calcul des auteurs, données Enerdata.

3.2.3 Les bilans énergétiques

Avant de se consacrer à l'analyse des consommations d'électricité de chaque pays ou région il est utile d'avoir en tête le bilan énergétique en 2008 de chacune de ces entités.

Chine

Le bilan énergétique de la Chine fait apparaître l'importance du charbon dans la consommation finale d'énergie (38 %) et sa prééminence dans le bilan primaire (66 %), du fait que la production d'électricité en dépendant à 80 %. On peut noter dans ce bilan que la Chine importe plus de la moitié de sa consommation primaire de pétrole et produits

Tableau 12. Bilan énergétique de la Chine (2008)

Unité : Mtep	Charbon, lignite	Pétrole brut	Produits pétroliers	Gaz	Hydro, Nucléaire	Éolien	Electricité **	Chaleur	Biomasse	Total
PRODUCTION PRIMAIRE	1 405	190,1		63,7	17,7	52		5,3***	195,9	1 929,8
Importation	28	178,8	46,1	3,6			0,3			256,9
Exportation	-39,2	-2,8	-20	-2,4			-1,2			-65,7
Soutes maritimes et aériennes			-11							-11
Variation de stocks	-30,2	-8,4	-0,6							-39,2
CONSOMMATION PRIMAIRE	1 363,6	357,8	14,4	64,9	17,7	52	-0,9	5,3	195,9	2 070,8
Raffineries		-345,1	337,1							-7,9
Centrales électriques	-725,3	-0,2	-9,3	-8,8	-17,7		297,8		-0,8	-516,2
Autoconsommation, pertes*	-107,8	-8	-25,6	-6,5			-53,9	56,1	-0,5	-146,1
CONSOMMATION FINALE	530,6		321,3	49,6			243	61,4	194,6	1 400,5
Industrie	428,5		40,3	20,8			169,6	38,3		697,5
Transport	3,6		137,5	0,1			2,4		1,3	144,8
Résidentiel, tertiaire, agriculture	71,3		66,9	19,5			71	23,1	193,4	445,3
Non énergétique	27,2		76,5	9,2						113

* Y compris retours et transferts de chauffage urbain.

** Y compris géothermie haute température et solaire photovoltaïque (faibles).

*** Chaleur primaire : solaire thermique (chauffage de l'eau) et géothermie basse température.

Source : Enerdata.

pétroliers, les produits pétroliers étant le second poste de consommation finale d'énergie. Le nucléaire reste encore négligeable dans le bilan primaire (<1 %). Le gaz naturel n'y compte que pour 3 %. L'électricité, très majoritairement utilisée dans le secteur industriel (70 %), arrive en troisième position dans l'énergie finale. La chaleur, avec 4,6 % de la consommation finale d'énergie joue un rôle supérieur à celui du gaz (3 %). Les usages non énergétiques (essentiellement la chimie ex pétrole et charbon) représentent 8,1 % de la consommation finale d'énergie.

La ligne « centrales électriques » permet de calculer la part de la consommation d'énergie primaire consacrée à la production d'électricité : 36,8 %.

Le rendement du système énergétique chinois (Energie finale/Energie primaire) est de 68 % (inférieur de 4 % à celui de l'Union européenne).

Inde

Le bilan énergétique de l'Inde montre, dans la consommation d'énergie finale, une moindre importance du charbon qu'en Chine. La consommation finale n'est que de 13 % du total, loin derrière la biomasse (premier produit final) et les

produits pétroliers. Néanmoins, l'électricité étant produite à 75 % par du charbon, le bilan primaire le situe au premier rang pour 41 % du total suivi du pétrole, dont 80 % sont importés. Le nucléaire ne représente que 0,6 % du bilan primaire.

L'électricité, utilisée à 51 % dans le secteur résidentiel tertiaire agriculture, et à 47 % dans l'industrie arrive en quatrième position dans la consommation finale (12 %), très loin derrière la biomasse (39 %), les produits pétroliers (31 %), et derrière le charbon (13 %) mais devant le gaz naturel (4 %). L'utilisation finale d'énergie sous forme de chaleur (pas de réseaux de chaleur) est pratiquement inexistante. Les usages non énergétiques de l'énergie (à base de pétrole et de gaz) représentent 9,5 % de la consommation finale d'énergie.

La ligne « centrales électriques » permet de calculer la part de la consommation d'énergie primaire consacrée à la production d'électricité : 37 %.

Le rendement du système énergétique indien, de 67 %, reste du même ordre que celui de la Chine malgré le mauvais rendement de la production d'électricité, car la part de l'électricité dans son bilan est modeste.

Tableau 13. Bilan énergétique de l'Inde (2008)

Unité : Mtep	Charbon, lignite	Pétrole brut	Produits pétroliers	Gaz	Hydro, Nucléaire	Éolien	Electricité **	Chaleur	Biomasse	Total
PRODUCTION PRIMAIRE	224,6	38,8		24,3	3,8	11		0,2***	164,2	466,8
Importation	32,5	128,8	22,8	10,1			0,5			194,7
Exportation	-0,8	0	-39,3				0			-40,1
Soutes maritimes et aérienne			-5,1							-5,1
Variation de stocks	-5,1		0							-5,1
CONSOMMATION PRIMAIRE	251,1	167,7	-21,6	34,4	3,8	11	0,5	0,2	164,2	611,2
Raffineries		-165,8	163,7							-2,1
Centrales électriques	-187,8		-8,8	-13,6	-3,8	-11	70,8		-1,1	-155,3
Autoconsommation, pertes *	-8	-1,8	-12,2	-2,4			-21,3	0	0	-45,7
CONSOMMATION FINALE	55,3		121,1	18,4			50	0,2	163,1	408
Industrie	44,4		20,1	7,2			22,6		28,3	122,7
Transport	0		38,7	1,3			1		0,2	41,1
Résidentiel, tertiaire, agriculture	10,9		30,6	0,9			26,3	0,2	134,6	203,5
Non énergétique			31,7	9						40,7

* Y compris retours et transferts de chauffage urbain.

** Y compris géothermie haute température et solaire photovoltaïque (faibles).

*** Chaleur primaire : solaire thermique (chauffage de l'eau) et géothermie basse température.

Source : Enerdata.

Union européenne

Le bilan énergétique de l'Union européenne fait apparaître une utilisation très marginale du charbon en termes d'énergie finale (5 %). La consommation primaire de charbon n'en est pas moins importante (17 % du total dont la moitié importée), du fait de la production d'électricité. Le nucléaire, contrairement aux deux pays précédents, compte pour 14 % de l'énergie primaire, et le gaz (dont les deux tiers importés), pour 24 %.

En termes de consommation finale, les produits pétroliers dominent nettement avec 46 % de la

consommation totale, devant le gaz naturel (21 %) et l'électricité (19 %). La biomasse et la chaleur se partagent les 14 % restants en parts quasiment égales. Le secteur résidentiel et tertiaire est le premier consommateur final d'électricité (59 %), loin devant l'industrie (40 %). La consommation finale des usages non énergétiques est de 9 % du total.

La ligne « centrales électriques » permet de calculer la part de la consommation d'énergie primaire consacrée à la production d'électricité : 38,3 %. Le rendement du système énergétique (72 %) est de 4 à 5 points supérieur à celui de la Chine et de l'Inde.

Tableau 14. Bilan énergétique de l'Union européenne (2008)

Unité : Mtep	Charbon,		Pétrole brut	Produits pétroliers	Gaz	Hydro, Nucléaire	Éolien	Electricité **	Chaleur	Biomasse	Total
	lignite										
PRODUCTION PRIMAIRE	183,3	114		169,5	243	45,3		2,3***		100,6	857,9
Importation	162,1	654,3		346,8				26,2		5,1	1 492,4
Exportation	-26,9	-72,6		-73,7				-24,9		-2,1	-481,6
Soutes maritimes et aérienne	0			-99							-99
Variation de stocks	-6,8	0,4		-6,7	-2,4					-0,1	-15,6
CONSOMMATION PRIMAIRE	311,7	696,1	-89,3	440,2	243	45,3	1,3	2,3		103,5	1 754,2
Raffineries	-0,4	-729,3	725,5	-0,2							-4,3
Centrales électriques	-233,4	-0,1	-24,6	-141,6	-243			288,7	52,4	-36,1	-382,9
Autoconsommation, pertes *	-15,6	35,8	-74,3	-23,3				-45,1	4,4	-4	-122,1
CONSOMMATION FINALE	62,3		539,8	275,2			244,9	59,2		63,4	1 244,8
Industrie	50		39,9	91,4			98,1	17		19,9	316,3
Transport	0		315,6	0,8			6,2			9,8	332,4
Résidentiel, tertiaire, agriculture	11,1		81,5	168,5			140,6	42,2		33,7	477,6
Non énergétique	1,2		102,8	14,6							118,6

* Y compris retours et transferts de chauffage urbain.

** Y compris géothermie haute température et solaire photovoltaïque (faibles).

*** Chaleur primaire : solaire thermique (chauffage de l'eau) et géothermie basse température.

Source : Enerdata.

Etats-Unis

La consommation d'énergie finale des Etats-Unis est largement dominée par les produits pétroliers (51 %), suivis du gaz et de l'électricité, à 20 et 21 %, de la biomasse (4,6 %), du charbon (2,2 %), et de la chaleur (0,6 %). La consommation d'énergie primaire est dominée par le pétrole (38 %), suivi du charbon, essentiellement consommé pour la production d'électricité et du gaz (24 %), du nucléaire (9 %), de la biomasse (4 %), de l'hydraulique et éolien (2 %) et de la chaleur (0,1 %).

La ligne « centrales électriques » permet de calculer la part de la consommation d'énergie primaire consacrée à la production d'électricité : 41,5 %. Cette part est sensiblement supérieure à celle des autres ensembles.

Le rendement du système énergétique (67 %) est inférieur de 5 points à celui de l'Union européenne, du fait de la plus forte contribution de la production d'électricité dans la consommation primaire.

Une première conclusion de ce bilan est que la production d'électricité, pour les quatre ensembles étudiés, représente entre 37 % et 42 % de la consommation d'énergie primaire.

Tableau 15. Bilan énergétique des Etats-Unis (2008)

Unité : Mtep	Charbon, lignite	Pétrole Brut	Produits pétroliers	Gaz	Nucléaire	Hydro, Éolien **	Electricité	Chaleur	Biomasse	Total
PRODUCTION PRIMAIRE	579,9	312,6		480,4	218,7	35,2		2,3***	88,9	1 718,2
Importation	20,6	581,3	97,1	92,5			4,9		2,3	798,8
Exportation	-48	-6,3	-83,2	-22,5			-2,1		-2,2	-164,2
Soutes maritimes et aérienne	0		-43,8							-43,8
Variation de stocks	-2,9	-6,6	1,5	0,6					0	-7,3
CONSOMMATION PRIMAIRE	549,7	881,2	-28,3	551,1	218,7	35,2	2,8	2,3	89	2 301,7
Raffineries		-826,4	823,4				-3			-3
Centrales électriques	-517,3		-11,5	-168,3	-218,7	-35,2	370,2	15,2	-19,3	-584,9
Autoconsommation, pertes *	1,8	-54,8	-10,2	-70,2			-44,9	-6,9	0	-185,1
CONSOMMATION FINALE	34,3		773,5	312,6			328,2	10,6	69,7	1 528,8
Industrie	32,7		23,6	111,5			77,5	6,7	35,8	287,7
Transport	0		571,2	0,7			0,7		19,7	592,3
Résidentiel, tertiaire, agriculture	1,6		54,1	185,4			250	3,9	14,3	509,3
Non énergétique			124,5	15						139,5

* Y compris retours et transferts de chauffage urbain.

** Y compris géothermie haute température et solaire photovoltaïque (faibles).

*** Chaleur primaire : solaire thermique (chauffage de l'eau) et géothermie basse température.

Source : Enerdata.

3.3 Production, transport et distribution de l'électricité

3.3.1 Les bilans électriques

Le tableau 16 présente les bilans électriques de chaque pays ou région considérés pour l'année 2008.

Tableau 16. Les bilans électriques (2008)

Unité : TWh	Chine	Inde	UE	Etats-Unis
PRODUCTION BRUTE, dont	3 462,87	823,41	3 357,02	4 305,06
Hydraulique dont	585,23	113,10	355,42	278,08
pompage	0,00	0,00	31,97	26,16
Géothermie	0,00	0,00	5,79	17,22
Nucléaire	68,26	14,64	938,44	839,28
Eolien	18,16	14,33	119,03	51,77
Thermique, dont	2 791,10	681,32	1 930,29	3 116,62
ex-charbon	2 716,47	576,10	931,44	2 095,49
ex-pétrole	56,14	34,61	104,39	53,91
ex-gaz naturel	37,21	68,63	784,51	895,15
ex-biomasse	2,33	1,98	109,45	72,09
IMPORTATIONS	3,23	5,64	304,63	57,02
EXPORTATIONS	-14,13	-0,20	-289,00	-24,08
DISPONIBILITÉ BRUTE	3 451,97	828,85	3 372,65	4 338,00
Autoconsommation	-272,46	-54,96	-167,11	-157,68
Production nette*	3 190,41	768,46	3 189,91	4 147,37
Consommation de pompage	0,00	0,00	-42,81	-32,09
DISPONIBILITÉ INTÉRIEURE	3 179,51	773,89	3 162,73	4 148,22
Pertes de transport et de distribution	-207,57	-192,42	-202,18	-236,30
CONSOMMATION TOTALE	2 971,95	581,47	2 961,63	3 911,92
Consommation du secteur de l'énergie	146,38	nc	113,85	95,92
CONSOMMATION FINALE, dont	2 825,56	581,47	2 847,78	3 816,00
Industrie	1 972,02	263,32	1 140,70	900,91
Transport	27,82	12,10	72,31	7,65
Résidentiel, tertiaire, agriculture	825,72	306,04	1 634,77	2 907,44

*Production nette = production brute- autoconsommation (ou : disponibilité brute – importation + exportation – autoconsommation).

Source : Enerdata.

3.3.2 La production d'électricité

Répartition de la production brute d'électricité par filière

Le tableau 17 indique la répartition par filière de la production brute d'électricité. En Chine, en Inde et aux Etats-Unis, la production d'électricité est dominée par les

centrales à charbon à hauteur, respectivement, de 78, 70 et 49 %. Viennent ensuite les renouvelables pour la Chine (17 %) ; les renouvelables (16 %) et le gaz (8 %) pour l'Inde ; le gaz (21 %), le nucléaire (20 %) et les renouvelables (10 %) pour les Etats-Unis. L'Union européenne présente une structure de production assez différente, avec environ quatre « quarts » : nucléaire (28 %), charbon (28 %), gaz (23 %), renouvelables (18 %).

Tableau 17. La part de chaque filière dans la production d'électricité

2008	Production brute totale TWh	Centrales thermiques à combustible fossile					Centrales non thermiques renouvelables				Total renouvelables %
		pétrole %	gaz %	charbon, lignite %	nucléaire uranium %	renouvelables					
						biomasse %	géothermie %	hydraulique %	éolien %	solaire %	
Chine	3 463	1,01	1,07	78,45	1,97	0,07		16,9	0,52	0,004	17,49
Inde	823	4,2	8,33	69,97	1,78	0,24		13,74	1,74	0,002	15,72
UE	3 357	3,1	23,31	27,75	27,95	3,26	0,17	10,59	3,55	0,158	17,73
Etats-Unis	43 05	1,25	20,79	48,67	19,5	1,67	0,4	6,46	1,2	0,022	9,75

Source : Enerdata.

Tableau 18. Le rendement des systèmes de production d'électricité

2008	Centrales thermiques						Prod. brute électricité Mtep	Rendement %
	Pétrole Mtep	Gaz Mtep	Charbon, lignite Mtep	Entrants Biomasse Mtep	Nucléaire Mtep	Total Mtep		
Chine	9,5	8,8	725,3	0,8	17,7	762,1	245,9	32,3
Inde	8,8	13,6	187,8	1,1	3,8	215,1	59,9	27,8
UE	24,7	141,6	233,4	36,1	242	677,8	246,5	36,4
Etats-Unis	11,5	168,3	517,3	19,3	218,7	935,1	340,2	36,4

2008	Toutes centrales		
	Entrants	Production brute élec.	Rendement
	Mtep	Mtep	%
Chine	814,1	297,8	36,6
Inde	226,1	70,8	31,3
UE	723,1	288,7	39,9
Etats-Unis	970,3	370,2	38,2

Source : Enerdata.

De la consommation primaire à la production brute d'électricité

Le tableau 18 indique le rendement du système de production brute d'électricité, qui est le rapport entre la quantité d'électricité produite et la quantité d'énergie primaire nécessaire pour la produire.

En termes d'énergie primaire, dans l'Union européenne, la production d'origine thermique (90 % du total de l'électricité produite) repose à 37 % sur le nucléaire, à 34 % sur le charbon, 20 % sur le gaz naturel et 4 % sur les produits pétroliers. En Inde, la part de production d'électricité thermique, de 86 % du total, repose en termes d'énergie primaire à 88 % sur le charbon, très loin devant le gaz naturel (6 %), le pétrole (3,5 %), et le nucléaire (1,7 %). En Chine, dont la production thermique d'électricité atteint 84 % du total, la prééminence du charbon est majeure (95 %) et rejette dans la marginalité les autres sources d'énergie primaire (nucléaire 2,5 %, pétrole et gaz 1,2 % chacun). Aux Etats-Unis, en termes d'énergie primaire, la production d'électricité d'origine thermique repose à 55 % sur le charbon, à 23 % sur le nucléaire et à 18 % sur le gaz (les contributions du pétrole et de la biomasse sont marginales).

Les rendements du système de production (brute) d'électricité s'échelonnent de 31,3 % pour l'Inde à près de 40 % pour l'Union européenne. Il faut noter que dans l'Union européenne, on assiste à une coproduction de 52,4 Mtep de chaleur (cogénération), qui sont donc économisés dans d'autres secteurs.

L'amélioration de ces rendements est un facteur important d'amélioration potentielle de l'intensité énergétique et, par conséquent, de l'efficacité globale du système énergétique. Cette amélioration peut se faire selon trois voies :

- l'amélioration du rendement pour une filière donnée (centrales à charbon, par exemple) ;
- le changement de filière : passage au cycle combiné au gaz ou aux énergies renouvelables non thermiques ;
- la production combinée d'électricité et de chaleur (cogénération), qui n'améliore pas forcément le rendement de la production d'électricité, mais qui améliore le rendement global, du fait de l'ajout de la production de chaleur.

3.3.3 L'autoconsommation du système de production d'électricité

Pour passer de la production brute d'électricité à la consommation d'électricité hors système électrique, il faut ajouter les importations nettes (très faibles dans le cas de ces grands ensembles) et déduire les consommations d'électricité du système de production d'électricité :

- a) l'autoconsommation d'électricité des centrales elles-mêmes : consommations internes des centrales électriques : pompes, accessoires, etc. ;
- b) la consommation d'électricité du pompage ;
- c) la consommation d'électricité de l'industrie nucléaire (essentiellement enrichissement de l'uranium) ;
- d) la consommation d'électricité de l'extraction du charbon (au prorata de la part de la consommation totale de charbon consacrée à la production d'électricité).

Le tableau 19 indique ces valeurs (dont beaucoup ne sont pas fournies).

Tableau 19. Autoconsommation du secteur de la production d'électricité

TWh	Chine	Inde	UE	Etats-Unis
Autoconsommation	272,5	55	167,1	157,7
Pompage ¹⁶			42,8	32,1
Industrie nucléaire			16,2	
Extraction charbon	32,3		12,8	12,2
TOTAL	240,2	55	238,9	202

Source : Enerdata.

3.3.4 Les pertes dans le transport et la distribution d'électricité

Dans les grands ensembles territoriaux que constituent la Chine, l'Inde, l'Union européenne et les Etats-Unis, l'interconnexion des réseaux provinciaux ou nationaux est encore partielle. Les Etats indiens, qui possèdent tous des sociétés d'électricité, restent le plus souvent quasiment autonomes et l'interconnexion y est mineure. La Chine est plus avancée dans l'interconnexion des provinces. En Union européenne, l'interconnexion gagne rapidement du terrain avec le marché européen de l'électricité. Dans un pays comme la France, les capacités d'échange de puissance électrique avec les pays voisins approchent 15 % de la puissance maximale de production du pays. Le chiffre élevé de pertes de transport et distribution en Inde appelle une explication. Il tient, à 75 % environ, à de l'électricité non facturée aux clients ou des non recouvrements de factures plutôt qu'à des pertes physiques d'électricité.

Dans l'Union européenne, à de rares exceptions près, l'ensemble des ménages, des services et des entreprises est relié à un réseau entièrement maillé au niveau de chaque pays membre (taux d'électrification > 99 %). Ces réseaux sont en outre partiellement connectés entre eux, permettant des échanges d'électricité haute tension entre les différents pays.

En Chine, l'électrification est très avancée ; elle atteignait 98 % en 2002¹⁷ après un programme de 20 ans d'électrification, qui a permis l'accès à l'électricité de plus de 700 millions d'habitants supplémentaires, en zone urbaine et rurale.

En Inde, la situation est beaucoup moins favorable. On ne dispose pas de chiffres très récents sur cette question. En 1997, le taux d'accès des ménages à l'électricité était de l'ordre de 46 %. Le tableau 21 donne la répartition entre électrification urbaine et rurale.

Tableau 20. Les pertes de transport et distribution

2008	Chine	Inde	UE	Etats-Unis
Pertes en TWh	207,6	192,4	202,2	236,3
En % de la disponibilité intérieure	6,5	24,9	6,4	5,7

Source : Enerdata.

¹⁶ Employé aux Etats-Unis et en Europe, le pompage consiste à utiliser deux réserves d'eau à des altitudes différentes : on produit de l'électricité en heure de pointe en faisant s'écouler l'eau du barrage haut vers celui du bas, on pompe l'eau en heures creuses du barrage bas au barrage haut pour reconstituer la réserve d'eau. Le rendement de l'opération est de l'ordre de 80 %. Cette technologie présente en Europe (64 TWh) n'est utilisée ni en Inde ni en Chine (d'après les données à notre disposition).

¹⁷ *World Energy Outlook 2002*, Agence internationale de l'énergie (AIE), p 373.

Tableau 21. Accès des ménages à l'électricité en 1997 en Inde

Taux d'accès total	46 %
Taux d'accès en zone rurale	33 %
Taux d'accès en zone urbaine	82 %
% de population rurale	74
% de population urbaine	26

Source : AIE, *Electricity in India*.

Les éléments plus récents disponibles¹⁸ ne permettent pas de préciser complètement ces chiffres. L'état d'électrification des villages est indiqué sur les bases suivantes : on considère qu'un village est électrifié si l'électricité est fournie à des services publics comme l'école, les dispensaires, les bureaux des municipalités, etc. et à 10 % au moins des habitations du village.

Le tableau 22 indique les taux d'électrification rurale en 2008, selon cette définition restrictive et montre les très fortes disparités régionales d'accès des villages ruraux à l'électricité.

3.3.5 L'énergie primaire nécessaire pour produire l'électricité finale

Le tableau 23 indique les différentes étapes du calcul de la quantité de kWh d'énergie primaire nécessaire pour obtenir un kWh d'électricité délivrée aux secteurs

d'activités hors secteur de la production d'électricité. Cette quantité (Conso 2) est égale à la somme de la consommation d'électricité finale (délivrée aux secteurs industrie, transports, résidentiel, tertiaire, agriculture), de la consommation d'électricité du secteur de l'énergie (hors activités contribuant à la production d'électricité - industrie nucléaire et extraction du charbon destiné aux centrales électriques¹⁹), et des exportations nettes.

La quantité d'énergie primaire nécessaire pour assurer cette fourniture d'électricité est égale à la production brute divisée par le rendement (cf. tableau 18).

On voit qu'il faut 3,21 kWh en Chine, 4,57 kWh en Inde, 2,88 kWh en Union européenne et 2,91 kWh aux Etats-Unis pour fournir 1 kWh au consommateur final²⁰. La valeur élevée de ce facteur pour l'Inde est essentiellement due aux pertes (physiques ou commerciales) sur le réseau.

Tableau 22. Taux d'électrification rurale en Inde en 2008 (en %)

Région Nord	87
Région Ouest	94
Région Sud	99,5
Région Est	60,3
Région Nord Est	73,2
Total	82,3

Source : *All India Electricity Statistics, General review 2009, chap. 11*.

¹⁸ All India Electricity Statistics, *General review 2009*, ministry of Power, India.

¹⁹ Cf. tableau 19.

²⁰ Du fait de l'absence de données sur les consommations d'électricité pour les activités du secteur énergétique liées à la production d'électricité, la valeur, pour les Etats-Unis notamment, est légèrement sous-estimée.

Tableau 23. Nombre de kWh primaires pour 1 kWh final

2008	Chine	Inde	UE	Etats-Unis
Elec finale	2 825,6	581,5	2 847,8	3 816
Elec Sec En*	114,1		84,9	83,7
Conso 1	2 939,7	581,5	2 932,7	3 899,7
Import	3,2	5,6	304,6	57
	2 936,5	575,9	2 628,1	3 842,7
Export	14,1	0,2	289	24,1
Conso 2	2 950,6	576,1	2917,1	3 866,8
Prod brute	3 462,9	823,4	3 357	4 305,1
Rendement	0,366	0,313	0,399	0,382
En Primaire	9 461,5	2 630,7	8 413,5	11 269,9
kWh primaire	3,21	4,57	2,88	2,91

* Consommation d'électricité du secteur énergétique hors des consommations des activités contribuant à la production d'électricité.

Source : Enerdata.

3.4 Les consommations finales d'électricité

3.4.1 Les consommations finales d'électricité, leur évolution et leurs indicateurs globaux

Les consommations d'électricité en 2008

La consommation finale par habitant d'électricité des Etats-Unis est supérieure d'un facteur 2,2 à celle de l'Union européenne, de 5,9 à celle de la Chine, et 24,5 à celle de l'Inde.

Evolution des consommations finales d'électricité

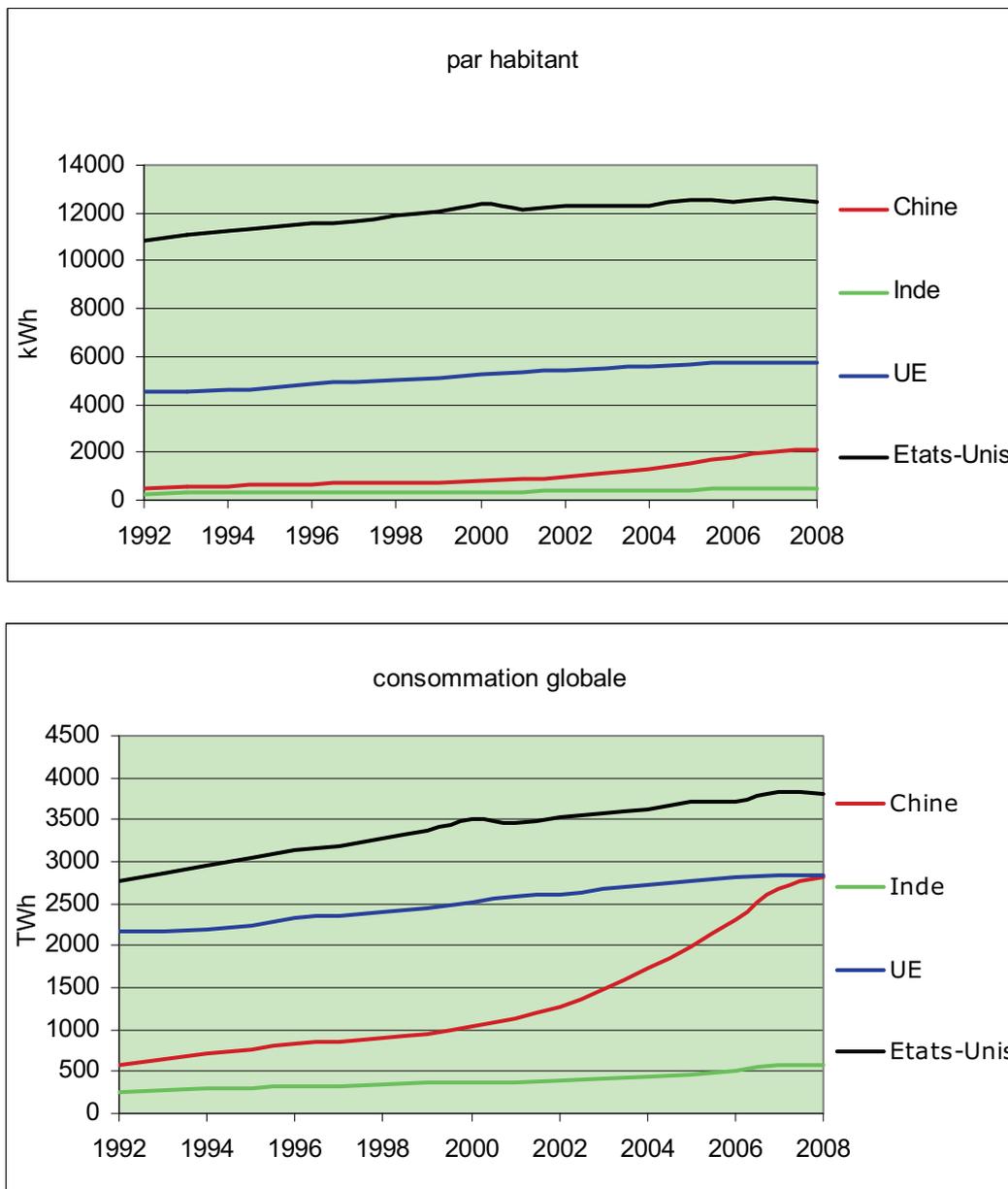
Les consommations finales d'électricité n'ont cessé de croître sur la période 1992-2008. On constate, de même que pour la consommation totale d'énergie, la très forte croissance de la consommation d'électricité de la Chine, depuis 2000.

Tableau 24. Consommations finales d'électricité totale et par habitant (2008)

2008	Population million	Consommation finale totale TWh	Consommation par habitant kWh
Chine	1 328	2 826	2 128
Inde	1 141	581	510
UE	496	2 848	5 741
Etats-Unis	305	3 816	12 500

Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

Graphique 11. Evolution des consommations finales d'électricité



Source : Enerdata.

La consommation totale d'électricité de la Chine atteint celle de l'Union européenne mais, comparativement, sa consommation par habitant reste beaucoup plus faible.

Les consommations par habitant de l'Union européenne et des Etats-Unis ont continué à augmenter sur toute la période, contrairement aux consommations d'énergie finale.

Les intensités électriques et leur évolution

L'intensité électrique est le rapport de la consommation finale d'électricité au produit intérieur brut à PPA.

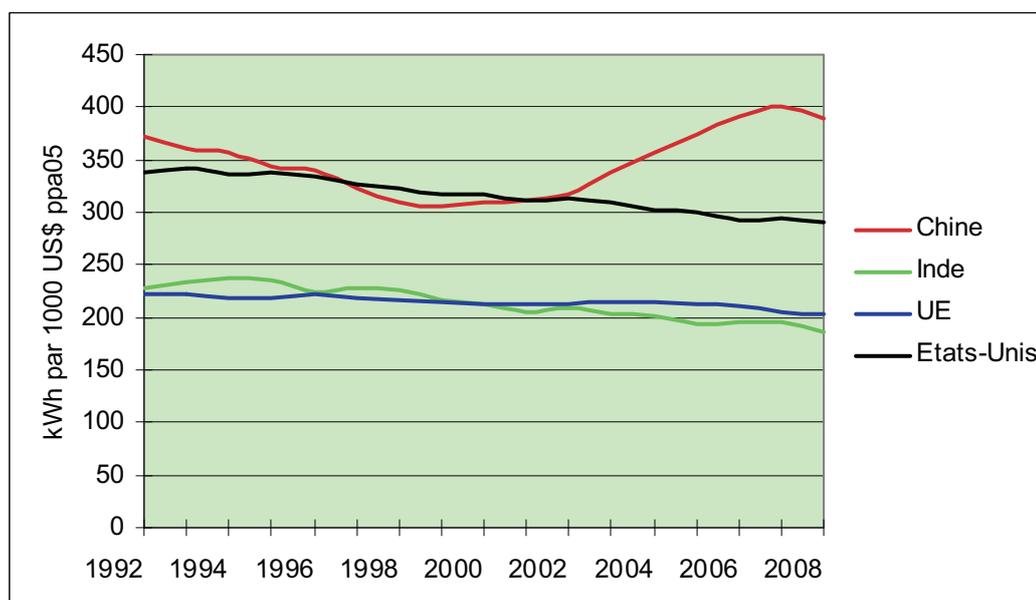
Les intensités électriques et leur évolution figurent dans le tableau 25 et le graphique 12.

Tableau 25. Les intensités électriques en 2008

2008	PIB PPA Milliard US\$05ppa	Consommation électricité finale totale TWh	Intensité électrique kWh/1 000US\$05ppa
Chine	7 272	2 826	389
Inde	3 114	581	187
UE	14 010	2 848	203
Etats-Unis	13 156	3 816	290

Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

Graphique 12. Evolution des intensités électriques



Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Les intensités électriques des quatre ensembles, au contraire des intensités énergétiques finales, ne diminuent pratiquement pas au cours de la période. La Chine se distingue par son intensité électrique élevée : de 372 kWh /1 000\$ en 1992, elle a chuté, jusqu'en 2 000, vers 305 kWh/1 000\$, pour remonter à plus de 400 kWh/1 000\$ en 2007. Elle amorce une nette décroissance en 2008, restant à vérifier que cette tendance se maintiendra.

Les intensités électriques de l'Inde et de l'Union européenne diminuent très lentement, respectivement de 227 à 187 kWh/1000\$,et de 222 à 203 kWh/1 000\$. Celle des Etats-Unis diminue à un rythme un peu plus soutenu, mais reste supérieure de 43 %, en 2008, à celle de l'Union européenne.

La consommation finale d'électricité reste globalement très étroitement liée à la croissance économique sur la période. L'exception chinoise des années 1990 montre toutefois que, pendant cette période, la croissance économique s'est partiellement déconnectée de la croissance des consommations finales d'électricité (à un rythme de l'ordre de 2 % par an).

3.4.2 La place de l'électricité dans la consommation finale d'énergie et la répartition sectorielle de sa consommation

Les bilans énergétiques présentés permettent de connaître la part de l'électricité dans les consommations finales d'énergie ainsi que la répartition sectorielle de la consommation d'électricité.

Tableau 26. L'électricité dans la consommation d'énergie finale

CHINE 2008	Energie finale totale Mtep	Charbon Mtep	Produits pétroliers Mtep	Gaz Mtep	Chaleur Mtep	Biomasse Mtep	Electricité Mtep	Part 2** %
Industrie	697,5	428,5	40,3	20,8	38,3		169,6	69,8
Transport	144,8	3,6	137,5	0,1		1,3	2,4	1
R-T-A***	445,3	71,3	66,9	19,5	23,1	193,4	71	29,2
Non énergétique	113	27,2	76,5	9,2				0
Total	1400,5	530,6	321,3	49,6	61,4	194,6	243	100
Part 1* (%)	100	37,9	22,9	3,5	4,4	13,9	17,4	

INDE 2008	Energie finale totale Mtep	Charbon Mtep	Produits pétroliers Mtep	Gaz Mtep	Chaleur Mtep	Biomasse Mtep	Electricité Mtep	Part 2** %
Industrie	122,7	44,4	20,1	7,2		28,3	22,6	45,2
Transport	41,1	0	38,7	1,3		0,2	1	2
R-T-A***	203,5	10,9	30,6	0,9	0,2	134,6	26,3	52,6
Non énergétique	40,7		31,7	9				
Total	408	55,3	121,1	18,4	0,2	163,1	50	100
Part 1* (%)	100	13,6	29,7	4,5	0	40	12,3	

UE 2008	Energie finale totale Mtep	Charbon Mtep	Produits pétroliers Mtep	Gaz Mtep	Chaleur Mtep	Biomasse Mtep	Electricité Mtep	Part 2** %
Industrie	316,3	50	39,9	91,4	17	19,9	98,1	40,1
Transport	332,4	0	315,6	0,8		9,8	6,2	2,5
R-T-A***	477,6	11,1	81,5	168,5	42,2	33,7	140,6	57,4
Non énergétique	118,6	1,2	102,8	14,6				
Total	1244,8	62,3	539,8	275,2	59,2	63,4	244,9	100
Part 1* (%)	100	5	43,4	22,1	4,8	5,1	19,7	

ETATS-UNIS 2008	Energie finale totale Mtep	Charbon Mtep	Produits pétroliers Mtep	Gaz Mtep	Chaleur Mtep	Biomasse Mtep	Electricité Mtep	Part 2** %
Industrie	287,7	32,7	23,6	111,5	6,7	35,8	77,5	23,6
Transport	592,3	0	571,2	0,7		19,7	0,7	0,2
R-T-A***	509,3	1,6	54,1	185,4	3,9	14,3	250	76,2
Non énergétique	139,5		124,5	15				
Total	1528,8	34,3	773,5	312,6	10,6	69,7	328,2	100
Part 1* (%)	100	2,2	50,6	20,4	0,7	4,6	21,5	

* Part 1 : part de chaque produit énergétique dans la consommation totale d'énergie finale.

** Part 2 : part du secteur dans la consommation finale totale d'électricité.

*** R-T-A : résidentiel, tertiaire, agriculture.

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

La part de l'électricité dans la consommation finale

La part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale est de 21,5 % pour les Etats-Unis, 19,7 % pour l'Union européenne, 17,4 % pour la Chine, et seulement 12,3 % pour l'Inde.

La répartition sectorielle de l'électricité finale

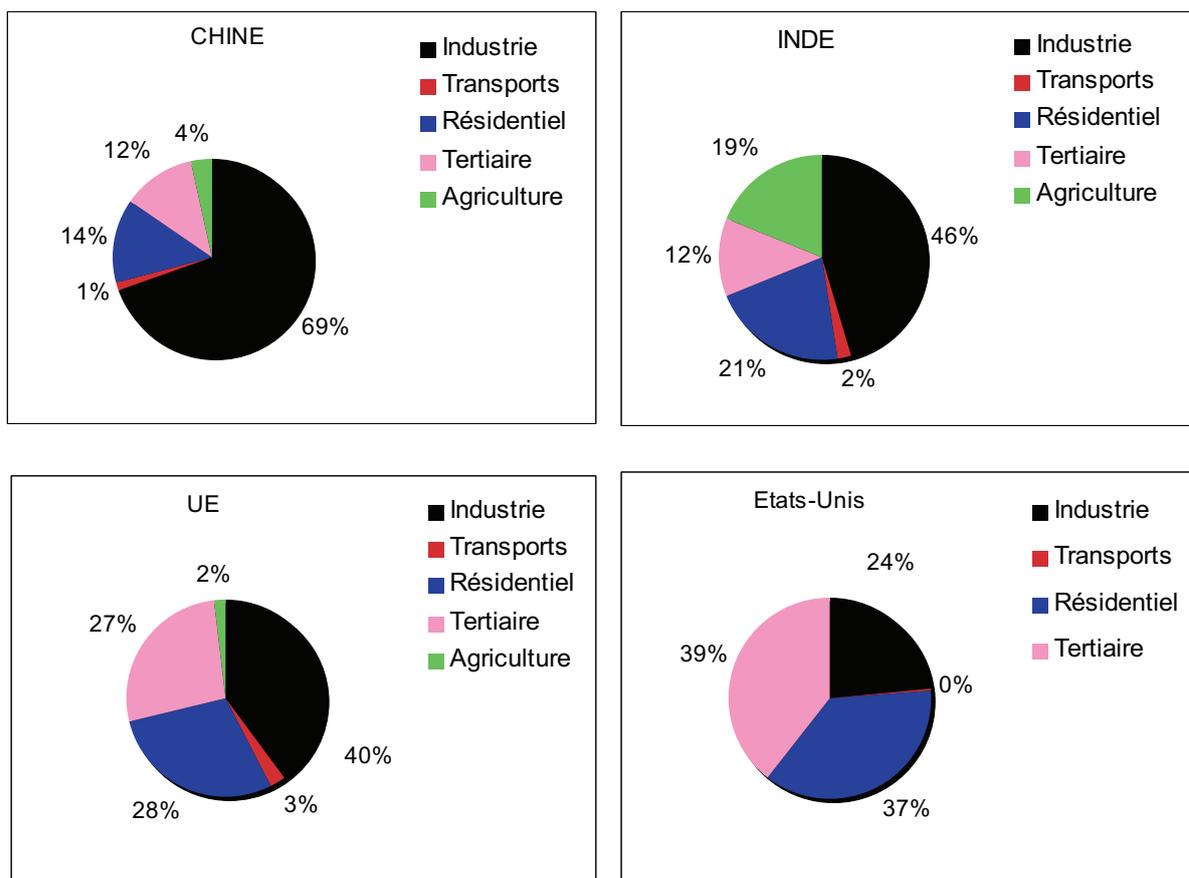
Le tableau 27 met en évidence de très fortes disparités sectorielles dans les consommations d'électricité par habitant.

Tableau 27. Consommation d'électricité par habitant et par secteur

2008	Population million	Total kWh/an par habitant	Industrie kWh/an par habitant	Transports kWh/an par habitant	Résidentiel kWh/an par habitant	Tertiaire kWh/an par habitant	Agriculture kWh/an par habitant
Chine	1 328	2 128	1 485	21	288	255	78
Inde	1 141	510	231	11	109	62	97
UE	496	5 741	2 300	146	1 634	1 558	104
Etats-Unis	305	12 511	2 954	25	4 596	4 937	

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Graphique 13. Répartition sectorielle de la consommation finale d'électricité



Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

En Chine, par exemple, la consommation d'électricité par habitant du secteur industriel dépasse déjà celle de pays européens comme la Pologne. En revanche, celle des secteurs résidentiel et tertiaire reste 6 à 7 fois inférieure à celle de l'Union européenne et près de 23 fois inférieure à celle des Etats-Unis. Dans l'agriculture enfin, la consommation n'est que de 25 % inférieure à celle de l'Union européenne.

En Inde les indicateurs de consommation d'électricité par habitant agrègent une grande masse de ménages qui n'ont aucun accès à l'électricité (de l'ordre de 40 % de la population en 2008). Ramenés à la population disposant d'électricité, ces indicateurs montrent cependant un retard important dans les usages de l'électricité, dans tous les secteurs, par rapport à l'Union européenne, mais aussi par rapport à la Chine dans le secteur industriel.

3.4.3 L'évolution de la part de l'électricité dans les consommations sectorielles

Il est également intéressant d'examiner dans les différents pays l'évolution au cours du temps de la proportion d'électricité dans la consommation finale d'énergie (usages non énergétiques inclus).

Chine

En 26 ans, la part de l'électricité dans la consommation finale est passée de 6,8 % à 17,4 % (+10,6 %), et atteint des niveaux analogues à ceux des pays européens. C'est la plus forte croissance de part dans le bilan final, devant le pétrole (+9,7 %). La part du charbon dans la consommation chute quant à elle de 11,1 %, et celle de la biomasse de 13,6 %.

Tableau 28. Evolution de la part de l'électricité dans la consommation finale de la Chine, de 1992 à 2008, par rapport aux autres produits énergétiques

Produit énergétique	CHINE		
	1992	Part	2008
	%		%
Electricité	6,8		17,4
Produits pétroliers	13,2		22,9
Gaz	1,3		3,5
Charbon	49		37,9
Chaleur	2,2		4,4
Biomasse	27,5		13,9
			Variation 2008-1992
			%
			10,6
			9,7
			2,2
			-11,1
			2,2
			-13,6

Source : données Enerdata.

Inde

Dans ce pays, la part de l'électricité croît beaucoup plus modestement, de 8 % à 12,1 %, et reste 50 % inférieure à celle de l'Union européenne (cf. tableau 29).

Tableau 29. Evolution de la part de l'électricité dans la consommation finale de l'Inde, de 1992 à 2008, par rapport aux autres produits énergétiques

Produits énergétiques	INDE			Variation 2008-1992 %
	Part		2008 %	
	1992 %			
Electricité	8		12,3	4,3
Produits pétroliers	21		29,7	8,7
Gaz	2,6		4,5	1,9
Charbon	16,6		13,6	-3
Chaleur	0		0	0
Biomasse	51,7		40	-11,7

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Union européenne

La part de l'électricité dans la consommation finale a nettement augmenté sur la période.

Tableau 30. Evolution de la part de l'électricité dans la consommation finale de l'Union européenne, de 1992 à 2008, par rapport aux autres produits énergétiques

Produits énergétiques	UNION EUROPEENNE			Variation 2008-1992 %
	Part		2008 %	
	1992 %			
Electricité	16,5		19,7	3,2
Produits pétroliers	45,5		43,4	-2,1
Gaz	19,9		22,1	2,2
Charbon	9,8		5	-4,8
Chaleur	4,8		4,8	0
Biomasse	3,5		5,1	1,6

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Tableau 31. Evolution de la part de l'électricité dans la consommation finale des Etats-Unis, de 1992 à 2008, par rapport aux autres produits énergétiques

Produits énergétiques	ETATS-UNIS		Variation 2008-1992 %
	1992 %	2008 %	
Electricité	18,2	21,5	3,3
Produits pétroliers	51,9	50,6	-1,3
Gaz	23,8	20,4	-3,4
Charbon	3,1	2,2	-0,9
Chaleur	0,6	0,7	0,1
Biomasse	2,4	4,6	2,2

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Etats-Unis

On constate à peu près la même augmentation de la part de l'électricité dans la consommation finale que pour l'Union européenne.

Ces évolutions seront détaillées secteur par secteur, section 4.

3.4.4 L'évolution des consommations sectorielles finales d'électricité

Le tableau 32 montre l'augmentation de la consommation finale d'électricité, totale et par secteur. C'est en Chine que l'augmentation est la plus forte, d'un facteur 6 pour le secteur résidentiel, 5 pour le tertiaire, et presque 5 pour l'industrie.

Les graphiques 14 montrent pour la Chine et l'Inde les évolutions de la croissance annuelle de la consommation d'électricité de chaque secteur.

Le rythme est le plus soutenu en Chine, au cours de la période, dans pratiquement tous les secteurs, avec un rythme supérieur ou égal à 6 %/an, à l'exception du secteur des transports (5 %) et surtout agricole (3,1 %/an). Le graphique montre qu'à partir du début des années 2000, la croissance du résidentiel, du tertiaire, de l'industrie et des transports s'est brusquement accélérée.

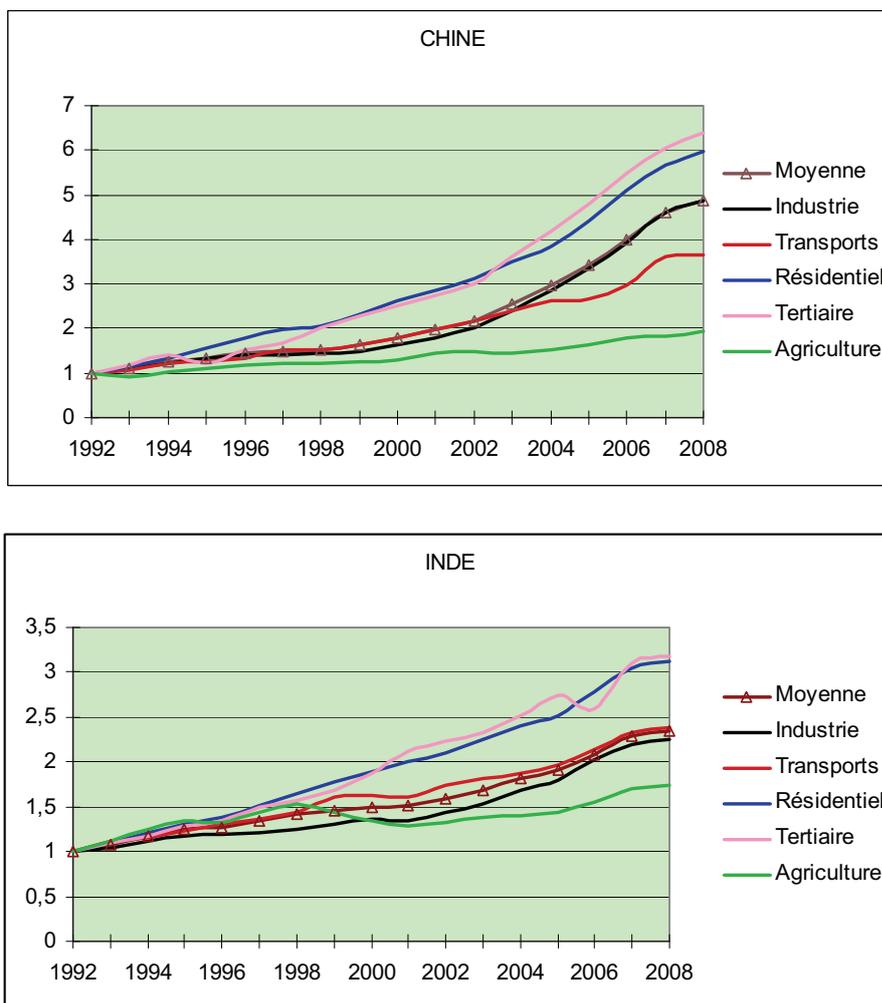
Le rythme global est plus modeste en Inde (3,2 %/an). Le résidentiel et le tertiaire tirent cette croissance (4,3 %), suivis de l'industrie (3,2 %) et des transports. L'agriculture, qui compte en 2008 pour 19 % du total, ne croît que beaucoup plus modestement, au rythme de 1,8 % par an. Ce dernier chiffre reste cependant douteux car c'est dans le secteur agricole que l'on enregistre les pertes « non techniques » les plus fortes (non recouvrement des factures et vols de courant). Le graphique montre des croissances sectorielles plus linéaires et également très soutenues dans le résidentiel tertiaire.

Tableau 32. Augmentation des consommations finales d'électricité de 1992 à 2008

2008/1992	Total	Industrie	Transports	Résidentiel	Tertiaire	Agriculture
Chine	4,86	4,88	3,65	5,99	5,3	1,95
Inde	2,35	2,25	2,39	3,13	1,79	1,75
UE	1,32	1,22	1,14	1,29	1,23	1,01
Etats-Unis	1,37	0,91	1,91	1,5	1,61	

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Graphique 14. Evolution des consommations sectorielles d'électricité finale de 1992 à 2008 (base 1992)



Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

3.5 Les émissions de gaz carbonique des systèmes électriques

3.5.1 Les émissions de la production d'électricité à partir des combustibles fossiles

La quantité de CO₂ produit par la combustion d'une tep de combustible fossile dépend de sa composition chimique, plus précisément des proportions de carbone, d'hydrogène et d'oxygène de ses molécules.

La méthodologie utilisée par Enerdata pour compiler et calculer les émissions anthropogéniques par source - spécifiquement les émissions de CO₂ liées à la combustion - est basée sur le manuel de l'IPCC "Revised 1996 IPCC Guidelines for

National Greenhouse Gas Inventory". Le manuel de l'IPCC est la référence internationale pour le calcul des émissions de GES. Les coefficients présentent des valeurs légèrement différentes selon la nature du combustible (par exemple, une différence de 3 % environ entre l'antracite et le lignite, pour une même quantité d'énergie produite par combustion).

A titre d'exemple, pour fixer les ordres de grandeur, le tableau 33 indique les valeurs retenues pour la France par l'Observatoire de l'énergie des coefficients d'émission moyens (en tonnes de CO₂ par tep) pour le charbon, le pétrole et le gaz naturel.

Tableau 33. Emissions de CO₂ associées aux combustibles fossiles

Emissions unitaires	Charbon	Pétrole	Gaz naturel
Tonne de CO ₂ /tep ²¹	4,1	3,1	2,4

Source : Observatoire de l'énergie.

Ce tableau montre des différences importantes entre ces trois produits : la combustion d'une tep de gaz naturel n'émet que 58 % du CO₂ produit par une tep de charbon. Ces produits énergétiques subissent des transformations avant leur utilisation finale. Ces transformations, en particulier en électricité, sont effectuées à travers des technologies dont les efficacités de conversion sont très variables. Le contenu en émission de carbone de l'énergie finale produite dépend donc à la fois du combustible employé et de la technologie de conversion.

Emissions lors de la production centralisée d'électricité

Le tableau 34 indique les ordres de grandeur des émissions unitaires des principales technologies de production électriques de grande puissance, actuelles et en développement, à partir des combustibles fossiles.

Le kWh électrique, ex gaz naturel, produit donc aujourd'hui 2,3 à 2,4 fois moins de CO₂ que le kWh ex charbon.

Emissions lors de la production décentralisée d'électricité

La production d'électricité dans des unités de petite taille (de quelques dizaines de kW à quelques MW électriques), très souvent associée à une production de chaleur utilisée localement, s'est développée depuis une dizaine d'années. Le progrès technique, l'abaissement des coûts des outils de production et la valorisation locale de la chaleur justifient des perspectives de développement importantes dans les décennies qui viennent pour les différentes technologies déjà sur le marché ou en développement. Le tableau 35 donne les caractéristiques de quelques-unes de ces technologies.

Tableau 34. Production d'électricité dans des installations de puissance²² (100 à 1 000 MW)

Emissions en grammes de CO ₂ par kWh électrique (gC/kWh)	2000		2020	
	Rendement	gC/kWh	Rendement	gC/kWh
Centrales à charbon pulvérisé	42 %	845	45 %	790
Centrales charbon à lit fluidisé	40 %	880	40 %	880
Centrales charbon gazéifié	45 %	790	50 %	715
Centrales à fioul lourd	40 %	660	40 %	660
Turbine à combustion simple fioul domestique ou gaz	40 %	510 à 660	45 %	460 à 585
Turbines cycle combiné gaz	55 %	365	60 %	345

Source : « Etude économique prospective de la filière nucléaire, la prospective technologique des filières non nucléaires²³ ».

²¹ Ces valeurs ne tiennent pas compte des émissions de GES de l'extraction et du transport des combustibles

²² Idem note 11.

²³ Charpin J-M, B. Dessus et R. Pellat (2000), Rapport au Premier ministre, La documentation française, Paris.

Tableau 35. Caractéristiques de quelques technologies existantes ou en développement

Emissions en grammes de CO ₂ par kWh électrique (gC/kWh)	2000		2020	
	Rendement	gC/kWh	Rendement	gC/kWh
Production décentralisée				
Moteurs à gaz	37 %	550	45 %	460
Turbine à combustion (fioul)	33 %	790	45 %	585
Mini et micro turbines	30 %	680	37 %	550
Piles à combustibles	40 à 50 %	400 à 730 ²⁴	45 à 60 %	330 à 660

Source : la prospective technologique des filières non nucléaires, Commissariat au Plan, 2000.

Les chiffres d'émission de ce tableau ne concernent que la production d'électricité. Dans le cas d'une cogénération électricité chaleur, le bilan des émissions doit prendre en compte le fait que la chaleur produite, si elle est utilisée, ne produit pas d'émissions supplémentaires puisqu'elles sont déjà comptabilisées dans la production d'électricité. On en trouve deux exemples dans le tableau 36.

Tableau 36. Rendements caractéristiques en cogénération chaleur électricité

Rendements	Electricité	Chaleur	Total
Moteur à gaz	37 %	37 %	74 %
Turbine à gaz	33 %	40 %	73 %

Source : petit mémento énergétique, Cahiers de Global Chance.

Dans le cas du moteur à gaz, par exemple, la fourniture simultanée de 1 kWh d'électricité et de 1 kWh de chaleur sera accompagnée d'une émission de 150 grammes de gaz carbonique (la même que pour la fourniture d'électricité seule).

La mesure de l'intérêt de la cogénération ne peut se faire que par comparaison avec des solutions concurrentes de production séparée d'électricité et de chaleur : production, transport et distribution d'électricité au point d'utilisation et production locale de chaleur dans une chaudière.

Si par exemple l'électricité de réseau est produite par un à cycle combiné à gaz et la chaleur produite localement par une chaudière à fioul de rendement 90 %, la cogénération aura permis une économie de 150 grammes de CO₂. Ce ne serait pas le cas si l'électricité était d'origine nucléaire ou hydraulique (+290 g).

Tableau 37. Bilans comparés d'une cogénération et de productions séparées de chaleur et électricité

	Productions séparées		Cogénération
Rendement électricité	49,5 %*		37 %
Rendement chaleur	90 %		37 %
Production de chaleur			1 kWh
Consommation	2,02 kWh (gaz)	1,11 kWh (fioul)	2,70 (gaz)
Grammes carbone	415	290	555
Total carbone	705		555

* En tenant compte des pertes du réseau de transport d'électricité.

Source : Ademe.

3.5.2 Les émissions de CO₂ des systèmes énergétiques des quatre ensembles

Les émissions totales et par habitant et leur évolution

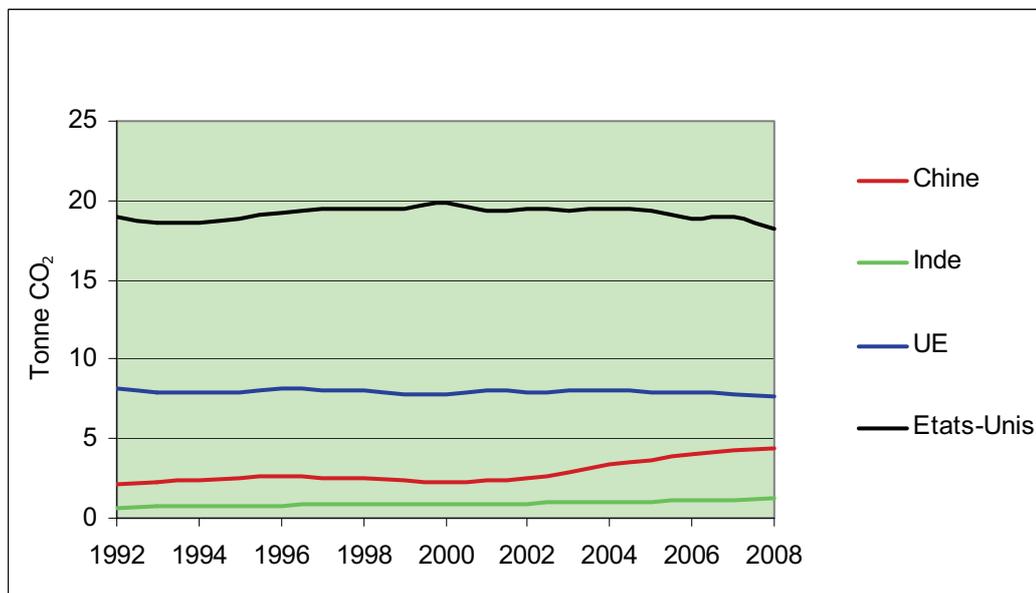
Le tableau 38 indique les émissions de CO₂, totales et par habitant, pour l'année 2008.

Tableau 38. Les émissions de CO₂ en 2008

2008	Population	Emissions de CO ₂	
	million	Totales MtCO ₂	Par habitant tCO ₂
Chine	1 328	5 834	4,39
Inde	1 141	1 376	1,21
UE-27	496	3 794	7,65
Etats-Unis	305	5 574	18,28

Source : Enerdata.

²⁴ Les émissions des piles à combustible dépendent à la fois du rendement de la pile et du rendement de production du carburant (CH₄, Méthanol, hydrogène, etc.).

Graphique 15. Evolution des émissions totales de CO₂ par habitant

Source : Enerdata.

En 2008, la Chine est devenue le premier pays émetteur de CO₂ de la planète, devant les Etats-Unis. Mais les émissions par habitant des Etats-Unis se situent encore au-dessus de celle des autres : d'un facteur 2,4 par rapport à l'Union européenne, 4,16 par rapport à la Chine et 15,1 par rapport à l'Inde.

Le graphique 15 montre que les émissions de CO₂ par habitant ont légèrement décro entre 1992 et 2008 pour l'Union européenne (-6 %) et les Etats-Unis (-3 %). Celles de la Chine et de l'Inde ont doublé (facteur 2 pour la Chine

et 1,75 pour l'Inde), en partant d'un niveau beaucoup plus faible en 1992 pour l'Inde que pour la Chine.

Les émissions de CO₂ par secteur

Le tableau 39 indique la répartition des émissions de CO₂ dues à la combustion des combustibles fossiles entre le secteur de l'énergie et les trois grands secteurs de la consommation d'énergie finale : industrie, transports, résidentiel-tertiaire-agriculture (les émissions de l'agriculture étant marginales).

Tableau 39. Emissions de CO₂ par secteur (combustion)

2008	Emissions CO ₂								
	Totales *	Secteur énergie		Industrie		Transports		Rés., Tert. Agr.	
	MtCO ₂	Total MtCO ₂	Part** %						
Chine	5 834	3 351	57,4	1 540	26,4	423	7,3	520	8,9
Inde	1 376	782	56,8	342	24,9	120	8,7	132	9,6
UE	3 794	1 465	38,6	700	18,5	946	24,9	682	18
Etats-Unis	5 574	2 703	48,5	596	10,7	1 675	30,1	600	10,8

*Il s'agit des émissions dues à la combustion des combustibles fossiles

** Part dans les émissions totales du pays correspondant à la ligne.

Source : Enerdata.

Tableau 40. Emissions directes et indirectes des secteurs de consommation finale

2008	Industrie			Transports			Rés., tert., agr.		
	Totales MtCO ₂	Directes %	Indirectes %	Totales MtCO ₂	Directes %	Indirectes %	Totales MtCO ₂	Directes %	Indirectes %
Chine	3 453	44,6	55,4	450	94	6	1 302	39,9	60,1
Inde	699	48,9	51,1	136	87,9	12,1	529	25	75
UE	1 238	56,5	43,5	980	96,6	3,4	1 425	47,9	52,1
Etats-Unis	1 161	51,3	48,7	1 680	99,7	0,3	2 423	24,8	75,2

Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

Dans les quatre ensembles, la part du secteur de l'énergie est prépondérante : notamment pour la Chine et l'Inde, avec plus de 50 %, suivies par les Etats-Unis, à presque 50 % et l'Union européenne, nettement en dessous, avec 39 %.

Cela signifie que les activités de production de l'énergie sont le premier facteur d'émission et tout particulièrement, comme nous le verrons, la production de l'électricité.

Concernant les émissions directes des secteurs finals d'activité, le secteur de l'industrie est le plus émetteur en Chine et en Inde, alors que c'est le secteur des transports (consommateur quasi exclusivement de produits pétroliers) qui domine, surtout aux Etats-Unis.

Mais il faut bien comprendre que la production d'énergie ne sert qu'à alimenter la consommation des secteurs finals. Il est donc indispensable de connaître également

les émissions indirectes de chacun de ces secteurs pour apprécier la contribution de la consommation d'énergie de chacun au bilan des émissions. C'est ce que nous montre le tableau 40.

Dans les transports, les émissions indirectes sont très inférieures aux émissions directes (consommation de produits pétroliers). Dans l'industrie, les deux types d'émissions se situent autour de 50 % : en Chine et en Inde, les émissions indirectes sont supérieures aux émissions directes, contrairement aux Etats-Unis et à l'Union européenne. Dans les secteurs résidentiel, tertiaire et de l'agriculture, les émissions indirectes sont partout et fortement en tête, du fait de la consommation d'électricité.

3.5.3. Les émissions de CO₂ dues à la production d'électricité

Les émissions par type de combustible fossile

Tableau 41. Les émissions de CO₂ de la production d'électricité par source d'énergie fossile

2008	Charbon MtCO ₂	Gaz MtCO ₂	Pétrole MtCO ₂	Total électricité* MtCO ₂	Secteur énergie	Part** %
Chine	2 791	21	21	2 833	3 351	84,5
Inde	660	24	18	702	782	89,8
UE	901	269	50	1 220	1 465	83,3
Etats-Unis	2 002	362	33	2 397	2 703	88,7

* On ne prend pas en compte les émissions de CO₂ dues à la production d'origine nucléaire et renouvelable.

** Part des émissions de la production d'électricité dans les émissions du secteur énergétique.

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Tableau 42. Les émissions de CO2 par kWh d'électricité

2008	Production brute d'électricité	Emissions de CO ₂		Consommation d'électricité finale*	Emissions de CO ₂	
	TWh	Totale MtCO ₂	Par kWh Gramme CO ₂	TWh	Totale MtCO ₂	Par kWh Gramme CO ₂
Chine	3 463	2 833	818	2951	2 833	960
Inde	823	702	853	576	702	1 219
UE	3 357	1 220	363	2 917	1 220	418
Etats-Unis	4 305	2 397	557	3 867	2 397	620

* Ainsi que le calcul de l'énergie primaire pour produire l'électricité finale, la consommation d'électricité « finale » est la somme de la consommation finale classique d'électricité et de la consommation d'électricité du secteur énergétique, hors des consommations des activités contribuant à la production d'électricité (terme « Conso 2 » du tableau 23).

Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

On vérifie tout d'abord que les émissions dues à la production d'électricité par les centrales thermiques à combustibles fossiles représentent entre 80 et 90 % des émissions du secteur énergétique et, par conséquent, des émissions indirectes des secteurs de la consommation finale. On constate ensuite que les émissions des centrales à charbon sont partout dominantes, à 99 % pour la Chine, 94 % pour l'Inde, 84 % pour les Etats-Unis et 74 % pour l'Union européenne.

Les émissions par kWh de production et de consommation finale d'électricité

Le contenu moyen en CO₂ du kWh d'électricité finale s'échelonne de 418 grammes de CO₂ pour l'Union européenne à 620 g pour les Etats-Unis, 960 g pour la Chine et 1 219 g pour l'Inde.

Si l'on fait le même calcul pour la production brute d'électricité, on trouve des valeurs plus faibles. Dans ce cas, l'Inde se situe nettement plus près de la Chine : la différence avec

la situation précédente tenant au niveau très élevé des pertes sur le réseau en Inde.

Comme nous l'avons vu, il s'agit d'un contenu moyen annuel du kWh en CO₂. Celui-ci peut varier dans de grandes proportions, selon que l'usage de l'électricité a lieu en heures creuses ou en heures de pointe, où sont mobilisés des moyens de production électrique différents. Ce phénomène, très marqué dans un pays comme la France, où 90 % de la production électrique provient de sources non ou peu carbonées (hydraulique et nucléaire), est encore très sensible pour l'Europe, où cette production provient pour 46 % de sources non carbonées. Il est plus modeste pour les Etats-Unis (29 % d'électricité non carbonée), et surtout pour la Chine (19,5 % d'électricité non carbonée) et l'Inde (17,5 %). Dans ces trois derniers pays, quelle que soit la période de l'année ou l'heure de la journée, la puissance électrique nécessaire pour satisfaire les besoins finaux dépasse généralement les capacités non carbonées de production mobilisables.

3.6 La consommation d'électricité en Inde : l'exemple de la Région Nord

3.6.1 Le système électrique de la Région Nord

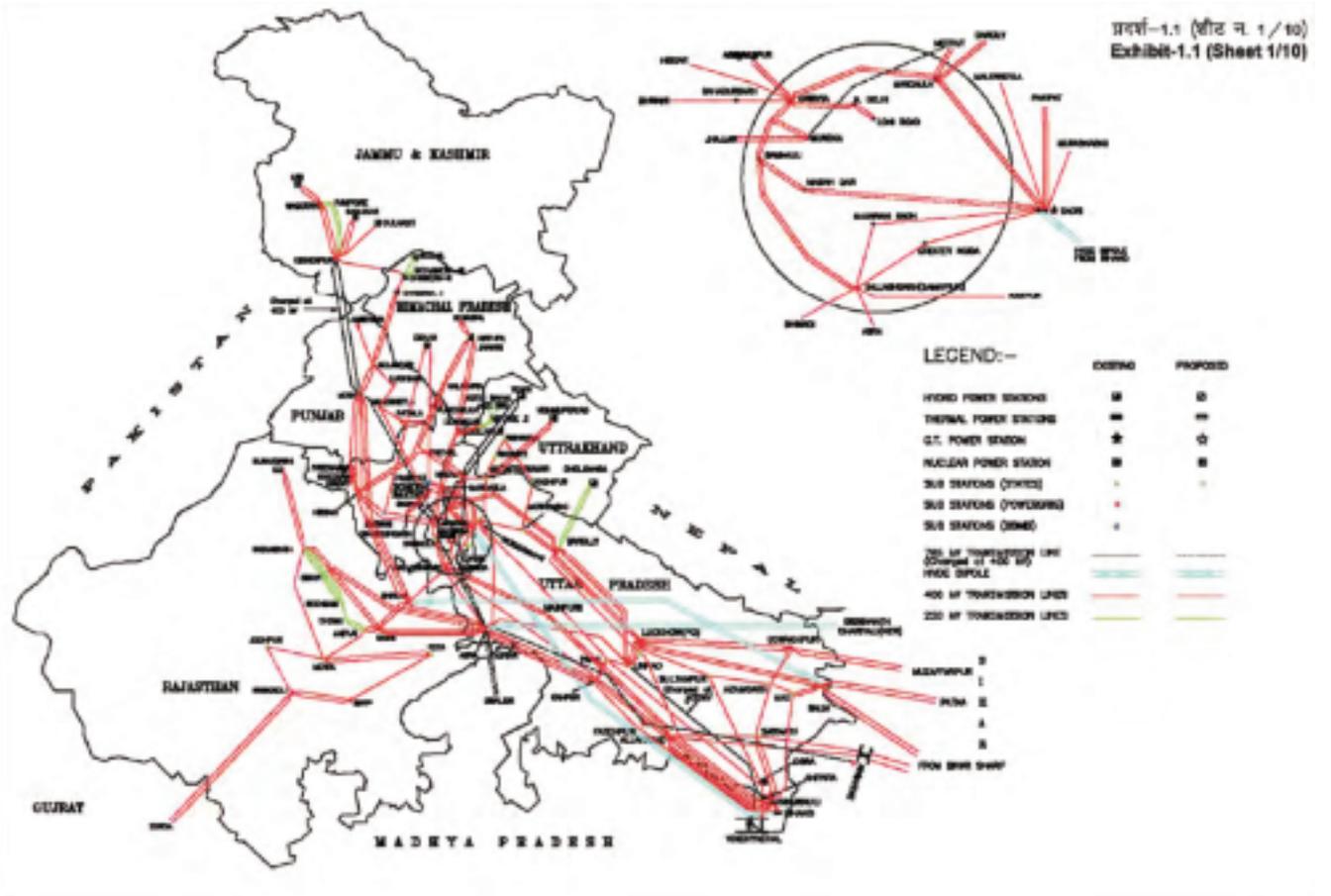
Le système électrique de la région Nord regroupe les systèmes de production de neuf territoires et Etats, Chandigarh Haryana, Himachal Pradesh, Jammu et Kashmir, Punjab, Rajasthan, Uttar Pradesh, Uttarakhand, Delhi, et de huit sociétés d'électricité, *National Thermal Power Corporation Ltd.*, *National Hydroelectric Power Corporation Ltd.*, *Nuclear Power Corporation of India Ltd.*, *Power Grid Corporation of India Ltd.*,

Satluj Jal Vidyut Nigam Ltd., *Tehri Hydro Development Corporation* et *Bhakra Beas Management Board*.

L'ensemble de la région regroupe une population de 350 millions d'habitants.

La carte de la carte 1 indique les principales lignes de transport haute tension de la région (de 765 000 volts, 400 000 volts et 220 000 volts).

Carte1. Système de production transport d'électricité de la région Nord de l'Inde



Source: Northern regional Power Committee.

3.6.2 Principales caractéristiques de la demande électrique de la région

La demande d'électricité

En 2008, la demande électrique de l'ensemble de la région s'est élevée à 227,8 TWh. Le système électrique existant n'a pu satisfaire qu'à 89 % cette demande. La demande de pointe maximale s'est établie à 33 GW et n'a pu être satisfaite qu'à 89 % (29,5 GW).

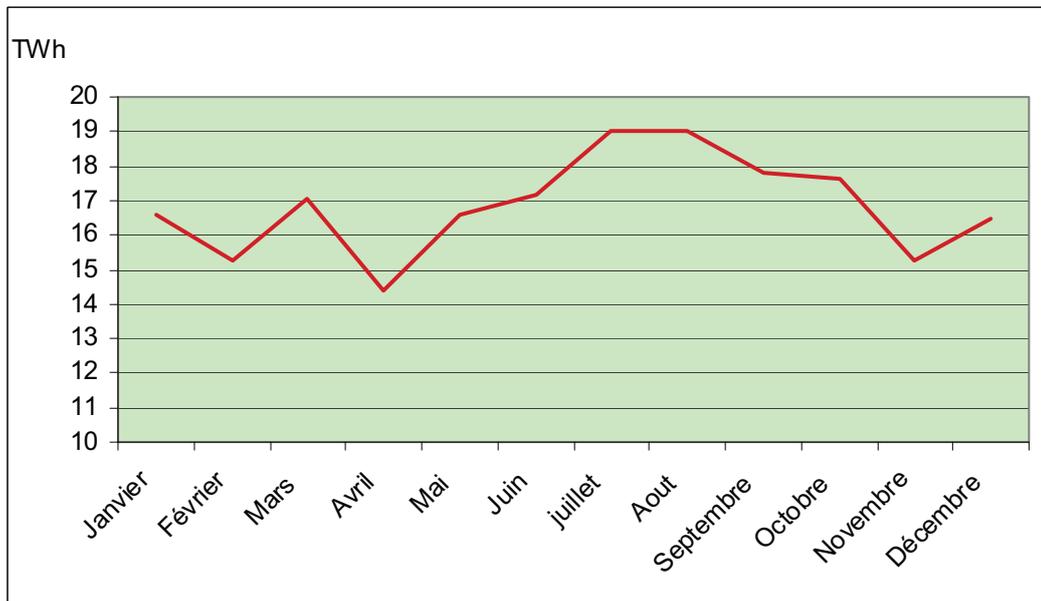
Les graphiques 16 et 17 montrent l'évolution de la demande d'électricité mensuelle de l'ensemble de la région et de trois des Etats parmi les plus consommateurs d'électricité de cette région.

Les fluctuations mensuelles de consommation entre la saison creuse (avril) et la saison de pointe (août) sont limitées à 30 % environ.

Au niveau des Etats les contrastes sont plus marqués comme le montre le graphique 17.

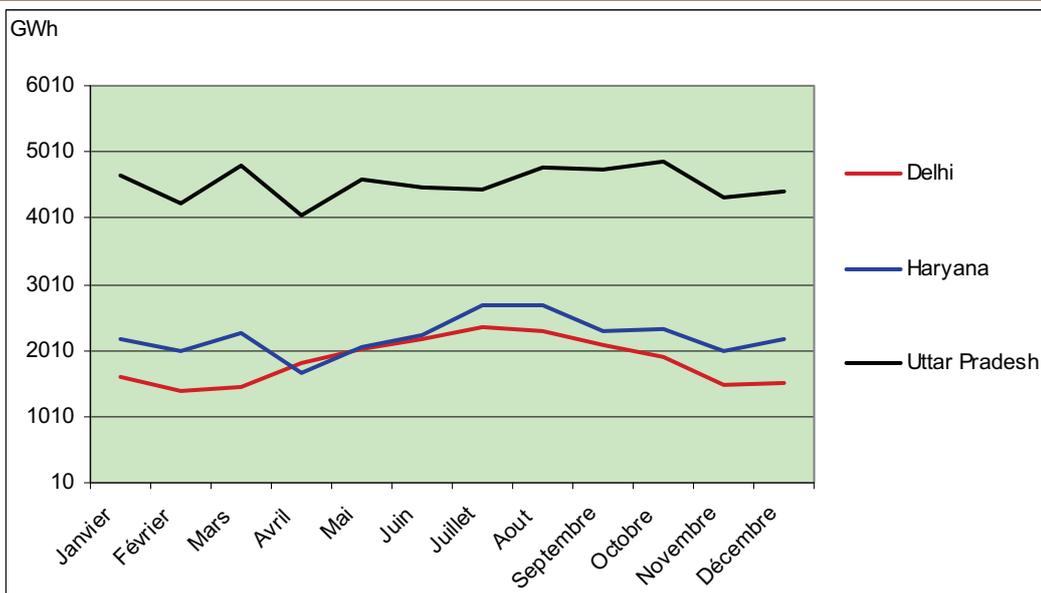
Dans l'Etat de Delhi par exemple, la pointe d'été, en juillet-août, largement due à la climatisation des bureaux et des habitations, se situe à une valeur 70 % plus élevée que celle de la période creuse (février et mars). La mutualisation que permet l'interconnexion est donc susceptible de lisser partiellement les pointes saisonnières dans cette région.

Graphique 16. Evolution mensuelle de la consommation d'électricité de la région Nord de l'Inde



Source : Northern Regional Power Committee.

Graphique 17. Consommations mensuelles d'électricité de trois Etats de la région Nord



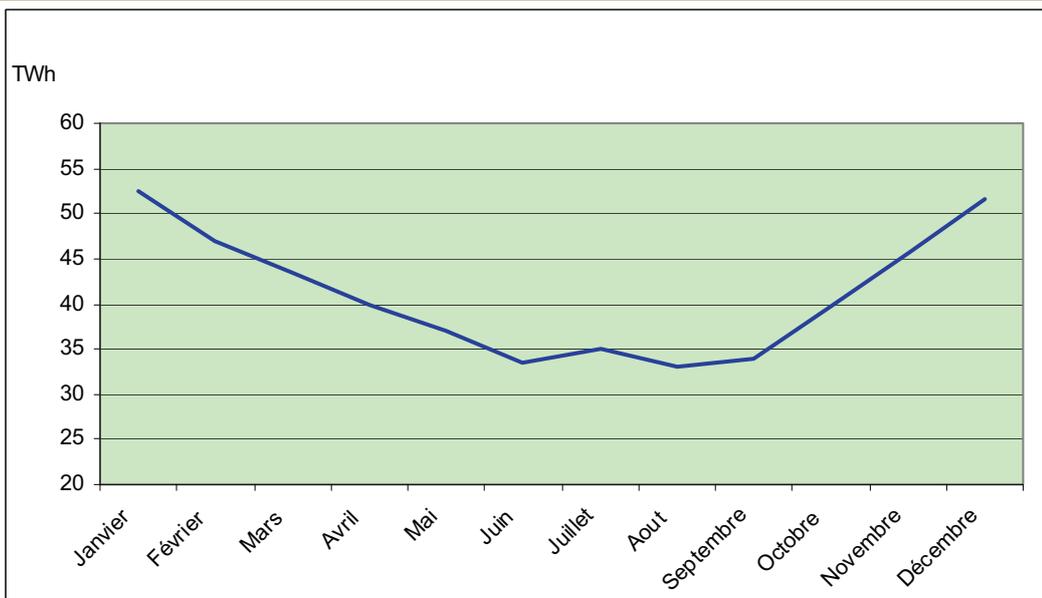
Source : Northern Regional Power Committee.

Le graphique 18 permet de comparer cette situation à celle de la France où la consommation du mois de janvier est 60 % supérieure à celle du mois d'août.

Les puissances appelées

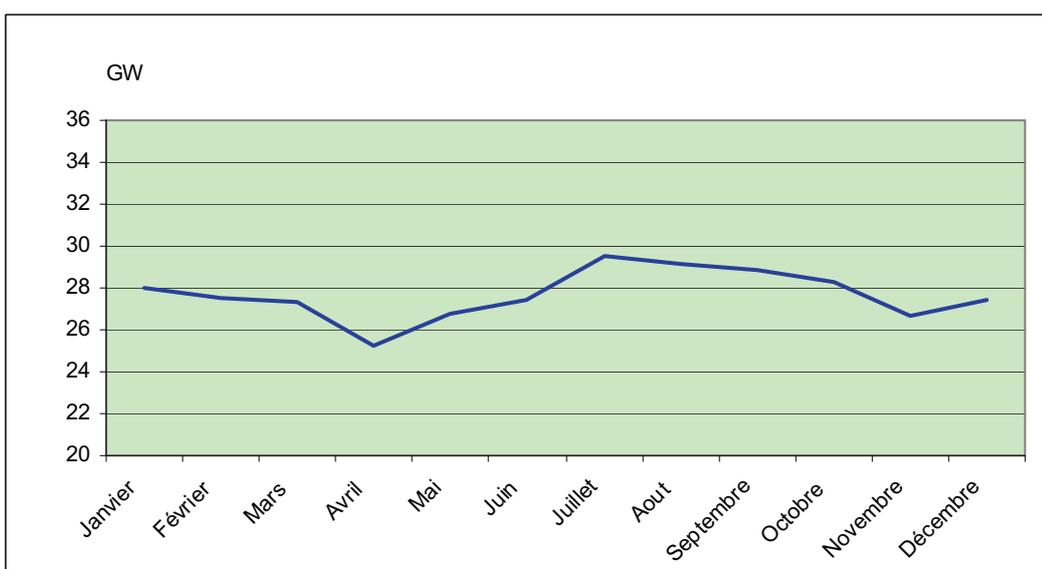
Le graphique 19 indique l'évolution des puissances de pointe mensuelles appelées dans la même région Nord.

Graphique 18. Consommation mensuelle d'électricité en France en 2009



Source : Observatoire de l'énergie.

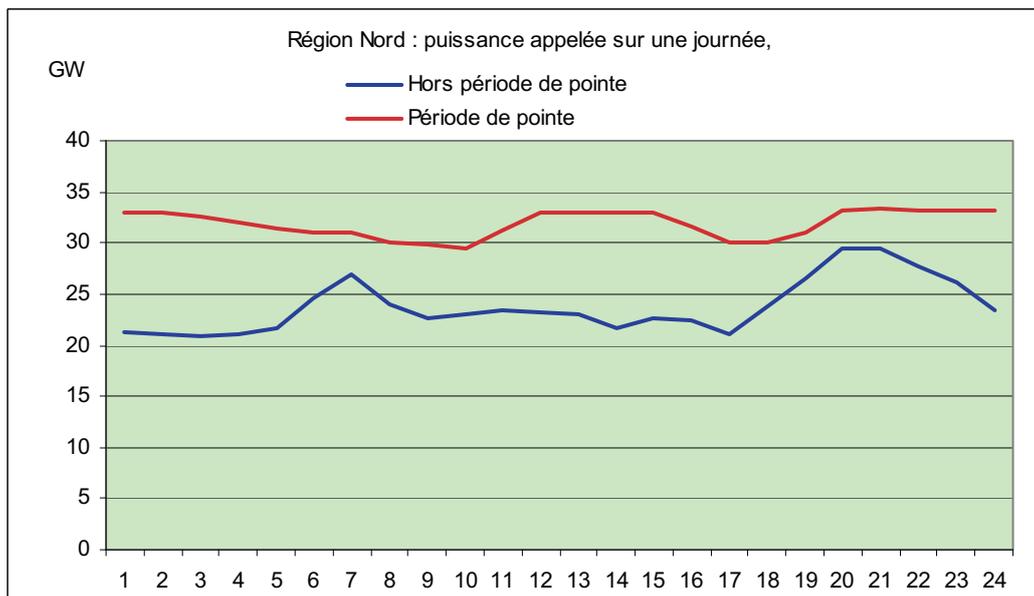
Graphique 19. Evolution des puissances de pointe mensuelle dans la région Nord



Source: Northern Regional Power Committee²⁵.

²⁵ Northern Regional Power Committee annual Report 2008- 2009, Ministry of Power, Central Electricity Authority.

Graphique 20. Courbes de charge journalière un jour de pointe (juillet 2008) et un jour hors pointe (avril)



Source : Northern Regional Power Committee.

Au niveau journalier les fluctuations de puissance appelée sur le réseau sont indiquées par les deux courbes du graphique 20.

Aux périodes les plus chargées, on assiste à des fluctuations journalières des puissances appelées au niveau régional inférieures à 5 GW (10 %), alors qu'elles peuvent atteindre 10 GW et 30 % en période creuse.

3.7 La consommation d'électricité en Chine : l'exemple de la province du Shandong

3.7.1 Les évolutions récentes dans l'organisation du système électrique en Chine

Jusqu'en 1997, le système électrique chinois était organisé sur un modèle centralisé et confié à un seul opérateur d'Etat. En 1997, la plupart des actifs du ministère de l'énergie (l'ensemble du réseau et 40 % environ de la capacité de production du pays) ont été transférés à une nouvelle compagnie publique d'électricité, la *State Power Corporation*. En 2002, cette compagnie publique, qui représentait 46 % des capacités de production et couvrait 90 % du réseau, a elle-même été démantelée et ses actifs répartis entre onze nouvelles entités nationales :

- deux compagnies de transport d'électricité, la *State Grid Corporation of China* (SG), qui couvre 26 provinces et la

China Southern Power Grid Company Limited (CSG), qui couvre cinq provinces du Sud de la Chine. Ces compagnies ont gardé une petite part de capacités de production électrique ;

- cinq compagnies de production d'électricité, *China Huaneng Group*, *China Datang Corporation*, *China Huadian Corporation*, *China Guodian Corporation*, *China Power Investment Corporation* ;
- quatre compagnies de distribution d'électricité : *China Power Engineering Consulting Group*, *China Hydropower Engineering Consulting Group*, *China Water Resources and Hydropower Construction Group*, *China Gezhouba Group*.

Les centrales thermiques représentent 70 à 80 % de la capacité totale de chacune des 5 compagnies de production ; l'essentiel du complément vient de l'hydraulique. La *China Datang Corporation* a la plus faible part d'hydraulique, alors que la *China Power Investment*, avec une proportion de 30 %, possède la part la plus élevée. *China Power Investment* est la seule compagnie à posséder une part significative de nucléaire.

La propriété des capacités de production restante est largement répartie entre des compagnies industrielles ou financières, où l'Etat ou les provinces ont un rôle important.

Depuis 2004, il existe six réseaux régionaux de transport et distribution d'électricité :

- *North China Grid* alimente Pékin et Tianjin, les provinces du Hebei et du Shanxi, Le Shandong et la partie Ouest de la Mongolie intérieure ;

- *Northeast China Grid* alimente les provinces du Liaoning, Jilin, Heilongjiang et la partie Est de la Mongolie intérieure ;
- *East China Grid* alimente Shanghai et les provinces du Jiangsu, Zhejiang, Anhui et Fujian.
- *Central China Grid* alimente les provinces du Henan, Hubei, Hunan, Jiangxi et Sichuan, ainsi que la municipalité de Chongqing.
- *Northwest China Grid* alimente les provinces du Shanxi, Ningxia, Gansu, Qinghai et Xinjiang.
- *South China Grid* alimente les provinces du Guangdong, Guangxi, Guizhou, Yunnan et Hainan.

Les interconnexions de ces réseaux régionaux se sont développées rapidement depuis le début des années 2000. Au total, 5 des 6 régions sont aujourd'hui interconnectées.

Carte 2. Principales interconnexions haute tension entre régions en 2006



Source : IEA.

Carte 3. Plan de situation de la province du Shandong



De plus, une ligne de forte capacité, de 500 kV et de 4 600 km, relie le Nord Est de la Chine à la Chine du Nord et à la Chine centrale. La Chine centrale est connectée aux réseaux Sud et Ouest de la Chine par une liaison 500kV à courant continu. Depuis 2005, le réseau Nord Ouest est relié au réseau Nord. Il reste cependant quelques provinces comme le Fujian, qui ne sont pas encore complètement interconnectées aux provinces voisines ou aux réseaux régionaux. Enfin, deux réseaux régionaux restent isolés, le Xinjiang et le Tibet, ainsi que l'île du Henan²⁶.

3.7.2 L'exemple de la province du Shandong

Présentation de la province du Shandong

Le Shandong est une province de l'Est de la Chine, situé sur la mer Jaune et le golfe de Bohai. Avec plus de 90 mil-

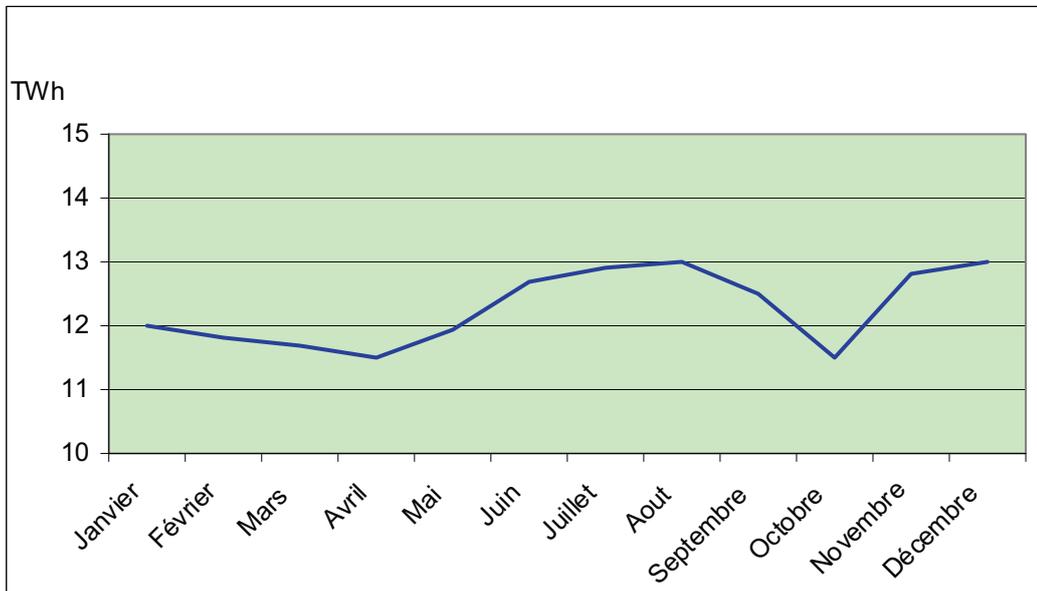
lions d'habitants (7 % de la population chinoise), c'est la province la plus peuplée du pays, après le Henan. Bien que situé au Sud de Pékin, le Shandong est considéré comme faisant partie de la Chine du Nord. Son chef-lieu est Jinan. Son PIB est de l'ordre de 10 % du PIB de l'ensemble de la Chine.

Principales caractéristiques de la demande électrique de la région

La consommation finale d'électricité du Shandong en 2000, de l'ordre de 110 TWh, présentait un profil mensuel encore assez stable, avec des fluctuations saisonnières de l'ordre de 10 %, comme le montre le graphique 21. Il est probable que ces fluctuations soient plus fortes aujourd'hui avec l'utilisation de la climatisation dans les villes.

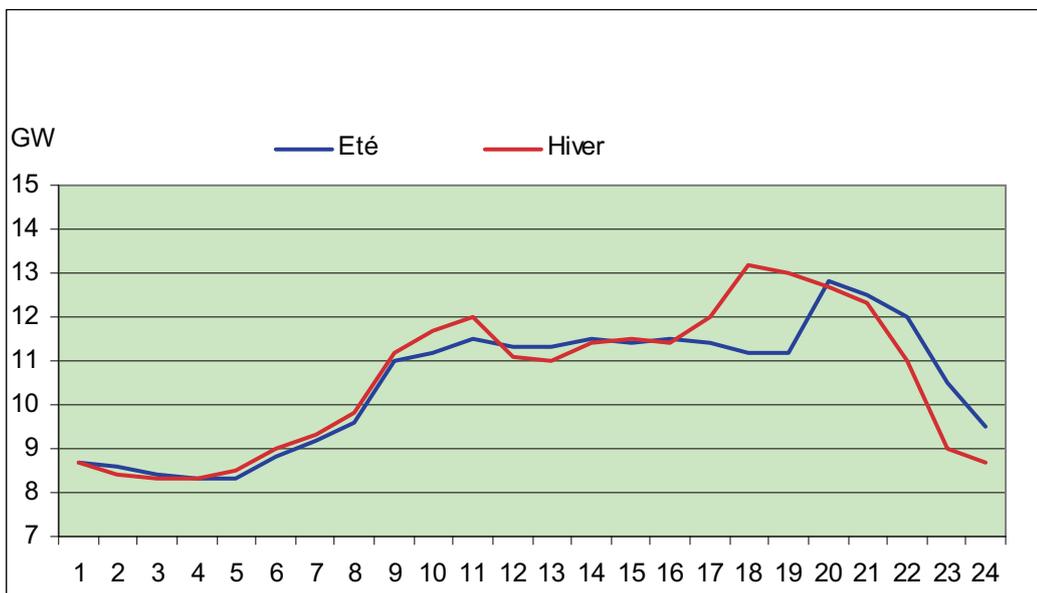
²⁶ AIE (2006), "China's Power Sector Reforms", <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/chinapower.pdf>

Graphique 21. Profil d'évolution de la consommation d'électricité de la province de Shandong au cours de l'année 2000



Source: Assessment of Sustainable Energy Systems in China²⁷.

Graphique 22. Courbes de charge journalière un jour d'été (août 2000) et un jour d'hiver (février 2000) dans la province de Shandong



Source : Assessment of Sustainable Energy Systems in China²⁸.

Le graphique 22 montre les fluctuations de puissance appelée sur le réseau, au niveau journalier.

Les fluctuations journalières sont importantes en hiver comme en été, et peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 50 %.

²⁷ Assessment of Sustainable Energy Systems in China , the China Energy Technology Program, Baldur Elisson and Yamy Lee, editors, 2003.

²⁸ Assessment of Sustainable Energy Systems in China , the China Energy Technology Program, Baldur Elisson and Yamy Lee, editors, 2003.

3.8 Les visions prospectives de la consommation d'électricité en Chine, Inde, Union Européenne et Etats-Unis

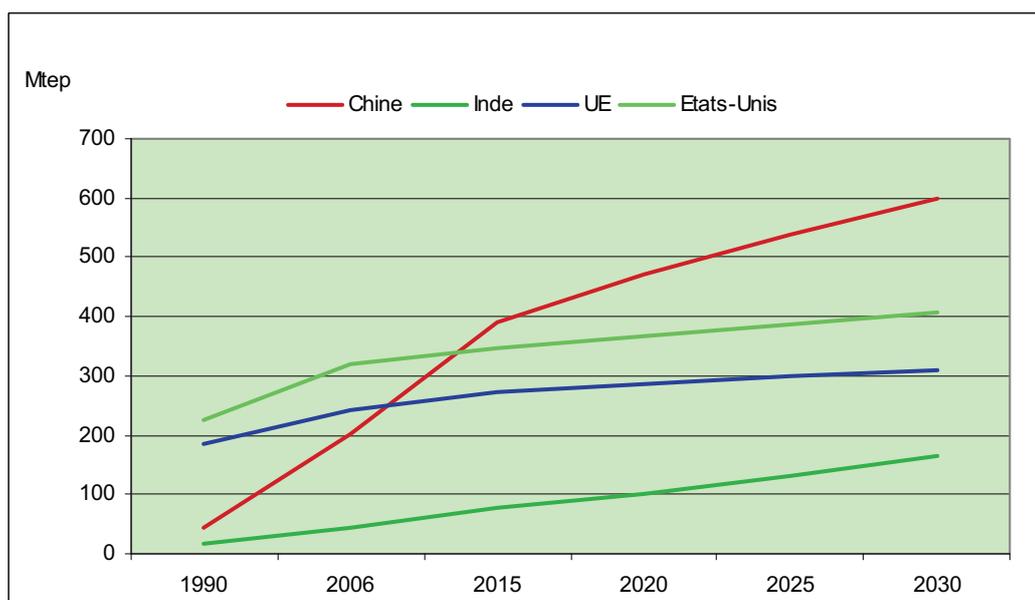
3.8.1 Les scénarios prospectifs de l'AIE

L'AIE a publié en 2008²⁹ des scénarios énergétiques à l'horizon 2030, pour l'ensemble des régions du monde. Le scénario dit de « référence » explore l'évolution des consommations énergétiques des différentes régions du monde, dans l'hypothèse d'une poursuite des politiques actuelles, tandis que des scénarios alternatifs proposent des politiques plus volontaristes qui respecteraient des objectifs de concentration de GES à un temps donné (550 ou 450 ppm à l'horizon 2050, par exemple).

Le scénario de référence, donne des indications précises, par région ou grand pays, tous les 5 ans, de 2006 à 2030, contrairement aux scénarios 550 ppm et 450 ppm, où l'on ne dispose que d'informations agrégées sous trois rubriques "OCDE + *Other Countries*", les pays industrialisés, "*Other Major Economies*", les grands pays émergents, "*Other Countries*", les pays en développement (PED) et les pays les moins avancés (PMA), au seul horizon 2030.

Le graphique 23 montre l'évolution des consommations finales d'électricité des quatre ensembles du scénario de référence, de 1990 à 2030.

Graphique 23. Evolution des consommations finales d'électricité en Chine, en Inde, dans l'Union européenne et aux Etats-Unis de 1990 à 2030



Source : AIE.

²⁹ World Energy Outlook 2008, Agence Internationale de l'Energie (AIE).

Le graphique 23 montre des situations très contrastées. Aux Etats-Unis et dans l'Union européenne, où la consommation finale d'énergie n'augmente que de 9 % sur la période 2006-2030, les prévisions de consommation électrique sont encore en hausse sur la période, au rythme de 1 % par an environ, un rythme à peine inférieur à celui de la période précédente. Au total, la consommation d'électricité augmente d'un peu moins de 30 % dans ces deux ensembles, entre 2006 et 2030.

En Chine, où la consommation d'énergie finale augmente d'un facteur 1,9 sur la période 2006-2020 (un peu moins de 3 % par an), on assiste à une accélération de la croissance des consommations d'électricité, déjà fortes avant 2006, jusqu'en 2020 (un facteur 2,3 en 14 ans), suivie d'une décélération. En 2030, la consommation électrique finale de la Chine représente près de trois fois celle de 2006.

En Inde, dans un contexte de croissance de la consommation finale d'énergie d'un facteur 2,1 sur la période, la

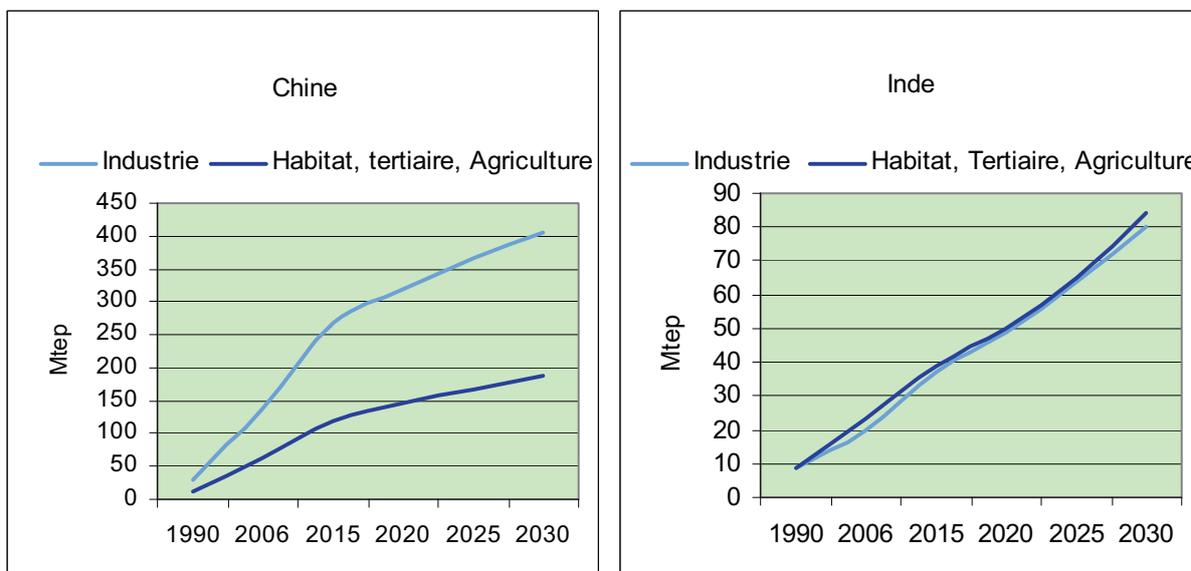
consommation d'électricité, modeste en 2006, croît encore plus vite, pour atteindre en 2030 3,9 fois celle de 2006.

Dans tous les pays, l'AIE prévoit une croissance de la consommation finale d'électricité nettement supérieure à celle de l'ensemble des autres produits énergétiques. La consommation d'électricité de l'ensemble des quatre entités atteindrait 1 481 Mtep (17 200 TWh) en 2030, soit 1,8 fois celle de 2006, et plus de 60 % de la consommation finale mondiale d'électricité de 2006.

3.8.2 L'évolution des consommations sectorielles d'électricité

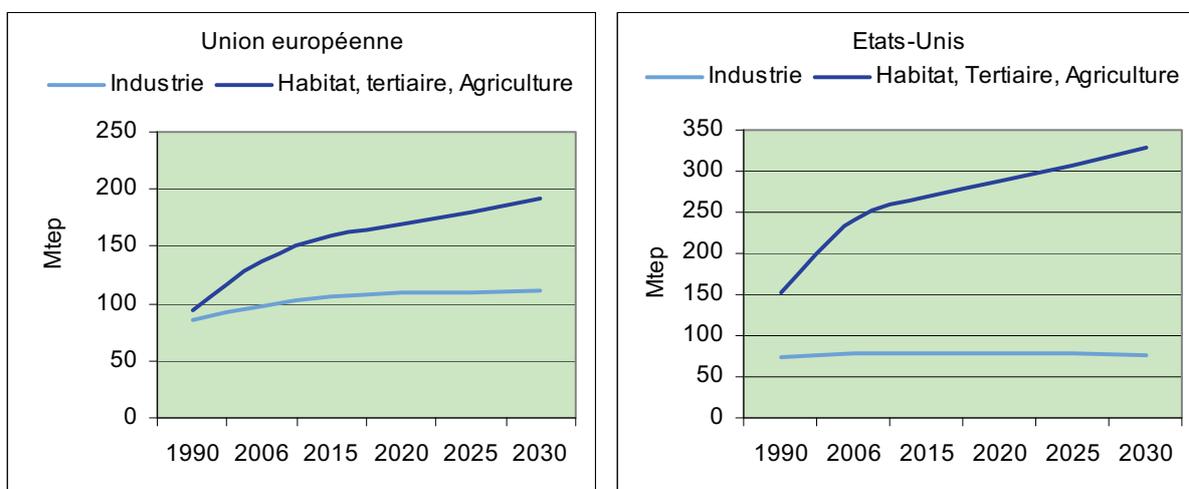
En Chine, c'est l'industrie qui tire la consommation d'électricité dans cette projection, en particulier sur la période 2006-2020, avec une croissance particulièrement forte, de l'ordre de 7 % par an. Le rythme de croissance des autres secteurs est très légèrement inférieur. En Inde, les consommations des différents secteurs suivent un même profil de croissance exponentielle.

Graphique 24. Consommations sectorielles d'énergie en Chine et en Inde



Source : AIE.

Graphique 25. Consommations sectorielles d'énergie : Union européenne et les Etats-Unis



Source : AIE.

Dans ces deux ensembles, les consommations d'électricité du secteur industriel se stabilisent, mais la consommation des secteurs résidentiel et tertiaire continuent à croître au rythme annuel moyen de 1,3 % pour l'Union européenne et de 1,4 % pour les Etats-Unis.

3.8.3 L'électricité dans les scénarios 550 et 450 ppm pour la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et l'Union européenne

Ces scénarios affichent comme principal objectif une réduction des émissions de CO₂ du système énergétique mon-

dial. Pour y parvenir, l'AIE s'appuie sur : les économies d'électricité, l'amélioration du rendement de production d'électricité, et la décarbonisation de cette production (nucléaire, énergies renouvelables, capture et stockage du CO₂ issu des centrales à combustibles fossiles).

Dans le scénario 550 ppm, au niveau mondial, en 2030, la consommation d'électricité finale diminuerait de 9 %, à 2 220 Mtep (au lieu de 2 420 dans le scénario de référence), au même rythme que les autres produits énergétiques. Dans le scénario 450 ppm, la consommation d'électricité diminuerait de 13 % par rapport au scénario de référence, de 2 140 Mtep.

Tableau 43. Consommation d'électricité finale en 2030 dans les scénarios de l'AIE

Consommation d'électricité finale (Mtep)	1990	2006	Référence 2030	550 ppm 2030	% *	450 ppm 2030	%*
Monde	833	1347	2 420	2 220	- 9	2 140	-13
OCDE + autres pays riches	550	780	1 000	950	-5	930	-7
Autres économies majeures	168	380	1 100	975	-13	910	-20
Autres pays (PED, PMA)	115	187	320	295	- 9	300	- 8,7

*Par rapport au scénario de référence.

Source : calculs des auteurs, données AIE.

Tableau 44. Emissions de CO₂ et consommation d'électricité finale en 2030, dans les scénarios de l'AIE

Monde	1990	2006	Référence 2030	550 ppm 2030	% *	450 ppm 2030	%*
Consommation d'électricité (Mtep)	833	1 347	2 420	2 220	- 9	2140	-13
Emissions de CO ₂ (Gtonne)	7,5	11,4	18	12	-33	8,3	-54

*par rapport au scénario de référence.

Source : calculs des auteurs, données AIE.

Ce sont des diminutions de consommation d'électricité finales très modestes qui sont proposées pour les pays riches, un peu plus conséquentes pour les PED, et beaucoup plus nettes pour les pays émergents.

Comme le montre la tableau 44, c'est beaucoup plus sur la décarbonisation de la production d'électricité que sur la maîtrise des consommations d'électricité que compte l'AIE pour réduire les émissions.

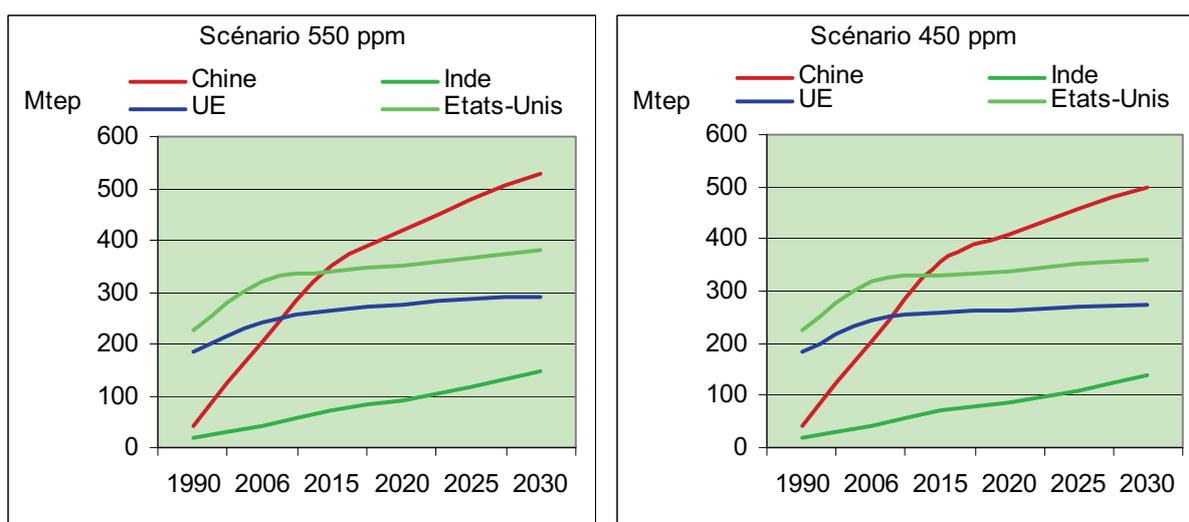
Dans le scénario 550 ppm, la modération de consommation d'électricité ne compte que pour 30 % dans la chute des émissions, alors qu'elle ne compte que pour 22 % dans le scénario 450 ppm.

Le graphique 26 montre les résultats de ces ratios globaux appliqués aux ensembles, ce qui paraît raisonnable au vu de leur importance dans l'OCDE.

Dans les pays industrialisés, la consommation d'électricité continue à croître sur la période. En Chine et en Inde, l'accroissement des consommations reste important entre 2006 et 2020, avec un facteur 2,54 à 2,7 pour la Chine, et 3,3 à 3,5 pour l'Inde, selon les scénarios.

Ces images prospectives montrent qu'il est essentiel de tenter de maîtriser les consommations d'électricité dans les 20 années à venir, pour des raisons financières, pour la préservation des ressources non renouvelables et de l'environnement global (effet de serre, risques nucléaires), ainsi que local (pluies acides, etc.). C'est le cas en particulier pour la Chine et l'Inde, où les investissements d'outils de production d'électricité, dans tous les scénarios, sont considérables.

Graphique 26. Les consommations finales d'électricité de 1990 à 2030 de la Chine, de l'Inde, de l'Union européenne et des Etats-Unis dans les scénarios de l'AIE



Source : AIE.

4. Le secteur de l'industrie

4.1 La consommation d'électricité dans l'industrie

Tableau 45. Consommation d'énergie finale de l'industrie en Chine en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz naturel	Charbon	Chaleur	Electricité
697,5	40,3	20,8	428,5	38,3	169,6

Source : Enerdata.

4.1.1 En Chine

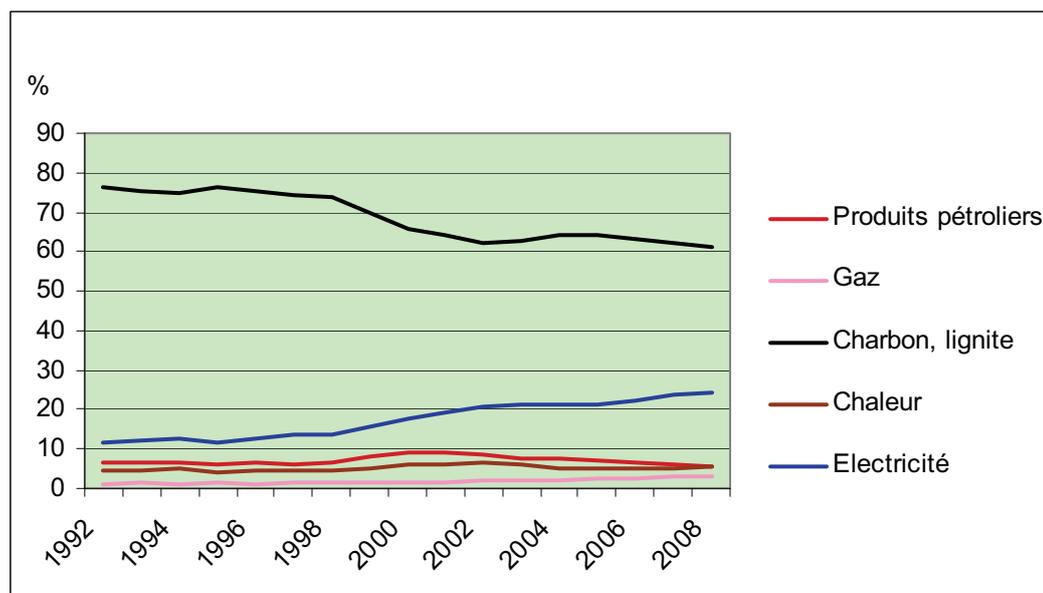
La consommation d'électricité dans l'industrie, 1974 TWh en 2008, représente 24 % de la consommation totale de ce secteur.

L'essentiel des usages non électriques de l'industrie est constitué de chaleur à des températures très diverses :

supérieures à 800 degrés comme dans la sidérurgie, moyennes dans la chimie, souvent faibles comme dans l'agroalimentaire, allant de 80 à 160 degrés. La consommation d'électricité du secteur représente 70 % de la consommation d'électricité finale de la Chine en 2008.

La part d'électricité dans l'industrie croît constamment depuis 25 ans, comme le montre le graphique 27.

Graphique 27. Evolution des parts des produits énergétiques dans la consommation finale d'énergie de l'industrie en Chine



Source : Enerdata.

Tableau 46. Chine : évolution des consommations d'électricité des branches industrielles depuis 1992

Chine Mtep	1992	2000	2008	% 2008
Sidérurgie	5,7	9,3	33,8	21,1
Chimie	8,1	11,9	29,8	18,6
Minéraux non métalliques	3,6	6,3	17,1	10,7
Industries agro-alimentaires	1,9	2,9	5,8	3,6
Construction	0,7	1,3	2,8	1,8
Mines	1,6	2,0	6,3	3,9
Mécanique	4,4	5,5	20,1	12,5
Métaux non ferreux	2,7	5,8	22,1	13,8
Papier carton	1,3	2,2	4,7	2,9
Equipements de transport	0,0	1,7	3,9	2,4
Textile et cuir	2,7	3,7	12,2	7,6
Industrie du bois	0,2	0,4	1,6	1,0
Total	32,9	52,9	160	100

Source : Enerdata.

Ce graphique montre une très forte hausse de la part d'électricité dans la consommation finale de l'industrie à partir de 1992, de 11,7 % en 1992 à 24,3 % en 2008, qui compense largement la perte des parts du charbon dans le bilan industriel (de 75,4 % à 61,4 %).

Les secteurs industriels de la sidérurgie, de la chimie et des métaux non ferreux consomment en 2008, à eux seuls, 53,5 % de l'électricité finale de l'industrie. Avec le secteur

des machines outils et celui des minéraux non métalliques les cinq secteurs consomment au total 76 % de l'électricité de l'industrie, comme le montre le tableau 46.

Le tableau 47, qui indique pour chaque branche l'évolution de la part de la consommation finale d'électricité dans la consommation totale de la branche au cours des 25 dernières années, vient compléter ces informations.

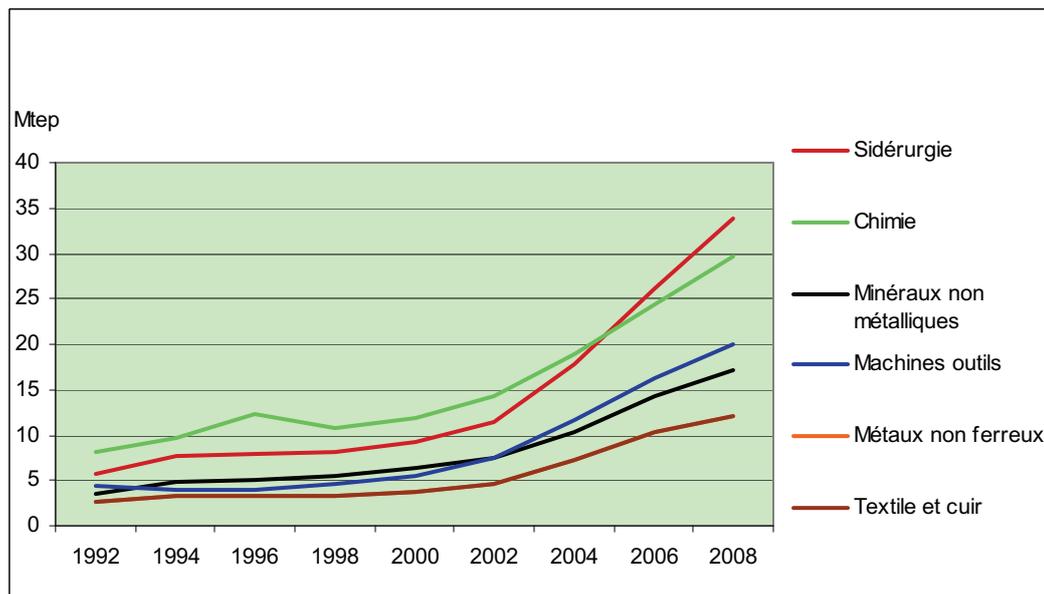
Tableau 47. Chine : part de l'électricité par branche dans la consommation finale d'énergie (Mtep)

Chine	CEF			Ratio	Ratio	Ratio
	1992	2000	2008	Elec/El. finale de la branche en 1992	Elec/El. finale de la branche en 2000	Elec/El. finale de la branche en 2008
Sidérurgie	68,4	93,7	241,9	8,3	9,9	14,0
Chimie	44,3	58,0	101,7	18,3	20,5	29,3
Minéraux non métalliques	65,3	66,4	138,7	5,5	9,5	12,3
Industries agro-alimentaires	20,2	16,5	25,9	9,7	17,7	22,2
Construction	6,3	6,6	11,6	11,2	20,1	24,1
Mines	5,5	5,5	12,8	28,4	35,9	49,0
Mécanique	29,1	17,3	39,1	15,2	31,9	51,3
Métaux non ferreux	10,0	13,7	37,1	27,5	42,1	59,7
Papier carton	10,6	10,4	19,3	12,6	21,5	24,4
Equipements de transport	0,0	5,6	10,2		29,9	37,6
Textile et cuir	18,4	13,8	31,6	14,5	26,7	38,6
Industrie du bois	2,1	2,0	4,5	9,5	18,9	36,9
Total	280,3	309,5	674,4	11,8	17,1	23,7

* CEF : Consommation d'énergie finale de la branche.

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Graphique 28. Evolution des consommations d'électricité des principales branches industrielles consommatrices d'électricité en Chine



Source : Enerdata.

Le tableau 47 montre la progression très rapide des parts de marché de l'électricité dans l'énergie finale consommée par chacune des branches principales depuis 1992. L'industrialisation de la Chine s'est en grande partie fondée sur l'électrification dans la plupart des secteurs. Seules, la sidérurgie et la transformation des minéraux non métalliques, très consommatrices de chaleur haute température, échappent partiellement à cette évolution.

Le graphique 28 montre l'accélération considérable de l'usage d'électricité, depuis le début des années 2000, dans les 6 branches les plus consommatrices.

4.1.2 En Inde

La consommation d'électricité dans l'industrie, 329 TWh en

2008, représente 18 % de la consommation totale de ce secteur.

En Inde, contrairement à la Chine, la biomasse, avec 23 % des usages finaux dans l'industrie, garde un rôle encore important.

La consommation d'électricité du secteur représente quant à elle 45 % de la consommation d'électricité finale de l'Inde en 2008.

On ne dispose pas pour l'Inde, comme pour la Chine, d'une décomposition par branches industrielles de la consommation finale d'énergie en 2008. Ces données ne sont disponibles que pour 2005³⁰. Bien que très incomplètes, elles montrent clairement l'importance des secteurs de la chimie, de la sidérurgie et de l'agroalimentaire³¹.

Tableau 48. Consommation d'énergie finale de l'industrie en Inde en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz naturel	Charbon	Chaleur	Electricité	Biomasse
122,7	20,1	20,8	7,2	44,4	22,6	28,3

Source : Enerdata.

³⁰ Agence internationale de l'énergie, Energy Outlook 2006.

³¹ Les données fournies sur le site www.worldsteel.org, permettent de vérifier la production d'acier en 2008 de 58 Mt pour l'Inde et de 500 Mt pour la Chine. Si l'on adopte la même intensité énergétique dans les deux pays, (0,48 tep par tonne d'acier et 0,79 MWh électriques par tonne) on obtient une consommation de 28 Mtep d'énergie finale et de 45,8 TWh d'électricité en 2008 pour la sidérurgie.

Tableau 49. Consommations d'électricité des branches industrielles en 2005

Inde	2005
Sidérurgie	27
Chimie	24
Minéraux non métalliques	11
Industries agro-alimentaires	8
Construction	0
Mines	1
Mécanique	1
Métaux non ferreux	1
Papier carton	1
Equipements de transport	0
Textile et cuir	1
Industrie du bois	0
Non spécifié	56
Total	131

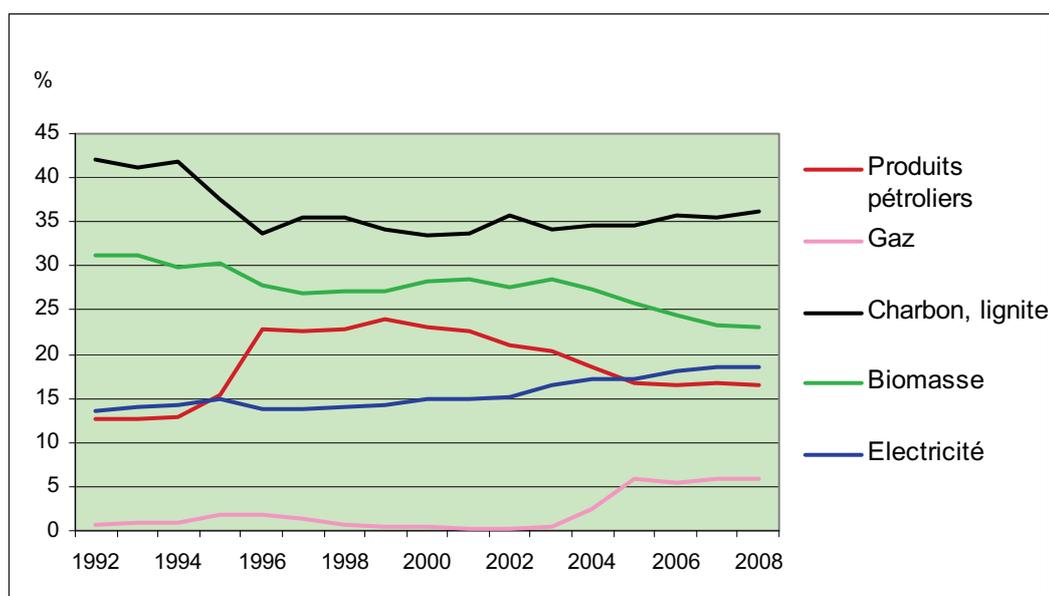
Source : AIE.

Le graphique 29 permet d'observer l'évolution au cours des 25 dernières années de la consommation d'électricité finale de l'ensemble du secteur industriel.

Alors que les parts du charbon et de la biomasse régressent respectivement de 6 % et 5 %, de 1992 à

2008, dans le bilan final de l'industrie en Inde, celle de l'électricité progresse de 5 % pour atteindre 18,5 % en 2008, et celle du pétrole atteint 16,4 % (+3,8 %), avec un pic à 23 % en 2000. Le gaz naturel apparaît vers 2004 puis prend très vite 5 % des parts du marché de l'énergie finale.

Graphique 29. Evolution des parts de produits énergétiques dans la consommation finale d'énergie de l'industrie en Inde



Source : Enerdata.

Tableau 50. Consommation d'énergie finale de l'industrie dans l'Union européenne en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz	Charbon	Chaleur	Biomasse	Electricité
316,3	39,9	91,4	50,0	17,0	19,9	98,1

Source : Enerdata.

4.1.3 En Union européenne

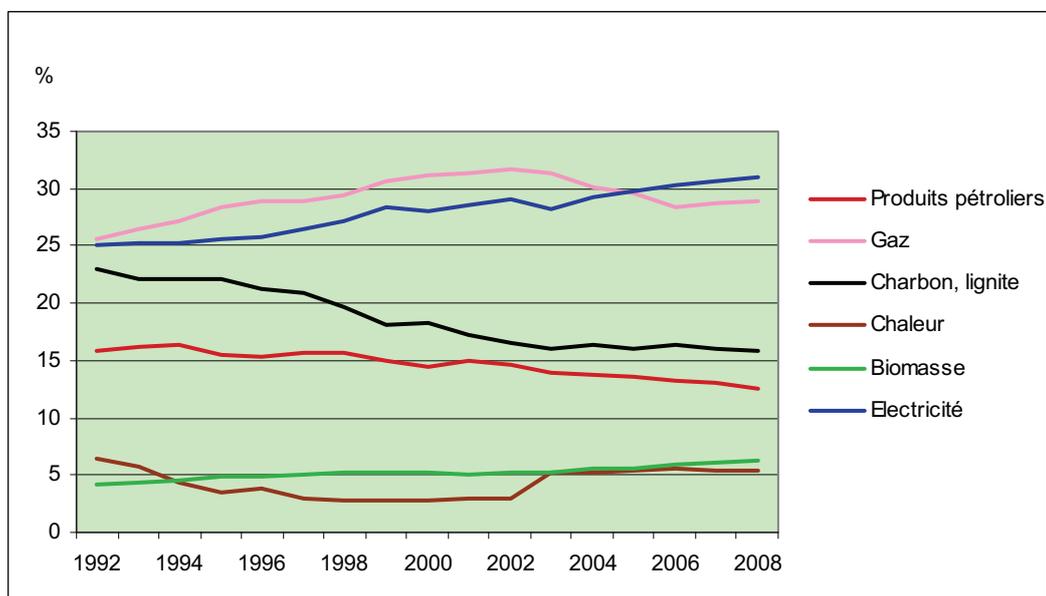
La consommation d'électricité dans l'industrie, 1 140 TWh en 2008, représente 31 % de la consommation totale de ce secteur.

La consommation d'électricité du secteur représente 40 % de la consommation d'électricité finale de l'Union européenne en 2008.

La part d'électricité dans l'industrie croît depuis 25 ans, mais à un rythme beaucoup plus faible qu'en Chine (cf. graphique 30).

Ce graphique montre une importante augmentation de la part d'électricité dans la consommation finale de l'industrie, depuis 1992 : de 25 % en 1992 à 32 % en 2008 ; cette part d'électricité vient compenser la perte des parts du charbon dans le bilan industriel (de 23 % à 15,5 %). Cinq secteurs industriels, la chimie, la sidérurgie, le papier carton, l'agroalimentaire et les machines outils consomment 69,5 % de l'électricité du secteur en 2008, comme le montre le tableau 49.

Graphique 30. Evolution des parts de produits énergétiques dans la consommation finale d'énergie de l'industrie dans l'Union européenne



Source : Enerdata.

Tableau 51. Union européenne : évolution des consommations d'électricité des branches industrielles depuis 1992 (Mtep)

EU27	1992	2000	2008	% 2008
Sidérurgie	9,7	11,2	11,9	13,9
Chimie	16,7	17,2	17,1	19,8
Minéraux non métalliques	5,8	6,8	7,3	8,5
Ind agro-alimentaires	7,0	8,5	9,5	11,1
Construction	1,1	1,0	1,4	1,6
Mines	1,8	1,3	1,4	1,6
Mécanique	8,0	8,8	9,3	10,8
Métaux non ferreux	6,1	6,3	6,9	8,0
Papier carton	8,8	11,3	12,0	13,9
Equipements de transport	3,1	4,0	4,2	4,9
Textile et cuir	3,5	3,5	2,7	3,1
Industrie du bois	1,7	1,9	2,3	2,7
Total	73,2	81,8	85,9	100

Source : Enerdata.

Le tableau 52 montre la progression très rapide des parts de marché de l'électricité dans l'énergie finale consommée par chacune des branches principales depuis

1992, notamment la mécanique (+11 %), les équipements de transport (+9 %), l'agroalimentaire (+9 %) et le textile (7 %).

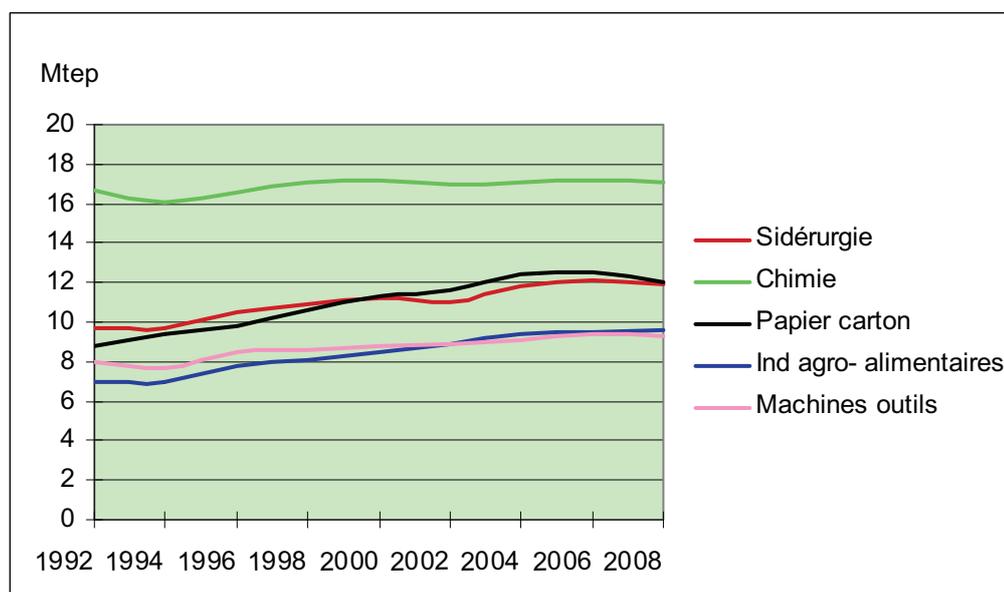
Tableau 52. Union européenne : part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie par branche (Mtep)

Union européenne	CEF 1992	CEF** 2000	CEF* 2008	Elec/El. finale de la branche en 1992	Elec/El. finale de la branche en 2000	Elec/El. finale de la branche en 2008
Sidérurgie	67,9	65,4	59,3	14,2	17,1	20,1
Chimie	55,3	55,2	51,2	30,2	31,1	33,3
Minéraux non métalliques	41,5	43,3	42,2	14,0	15,7	17,3
Ind agro-alimentaires	30,2	30,6	29,7	23,2	27,7	32,1
Construction	5,1	6,1	n.a.	21,2	16,9	n.a.
Mines	4,7	3,5	3,2	37,7	37,7	43,7
Mécanique	23,1	20,1	20,1	34,5	43,8	46,1
Métaux non ferreux	10,9	11,6	11,3	55,5	54,9	60,8
Papier carton	27,5	35,1	35,4	32,0	32,3	33,9
Equipements de transport	7,8	8,8	8,5	40,2	44,9	49,6
Textile et cuir	11,3	10,7	7,0	30,7	32,2	37,9
Industrie du bois	5,7	6,3	7,2	30,6	30,3	32,3

* CEF : Consommation d'énergie finale de la branche.

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Graphique 31. Evolution de la consommation des principales branches industrielles consommatrices d'électricité dans l'Union européenne



Source : Enerdata.

Le graphique 31 montre l'évolution de l'usage de l'électricité depuis 1992, dans les cinq branches les plus consommatrices d'électricité.

4.1.4 Aux Etats-Unis

La consommation d'électricité dans l'industrie, 900 TWh en 2008, représente 27 % de la consommation totale de ce secteur.

La consommation d'électricité du secteur représente 24 %

de la consommation d'électricité finale de la Chine en 2008.

Contrairement aux ensembles précédents, la part d'électricité dans l'industrie décroît constamment depuis 20 ans, de 35 % en 1994 à 26,5 % en 2008, au profit du gaz naturel et de la biomasse, comme le montre le graphique 32.

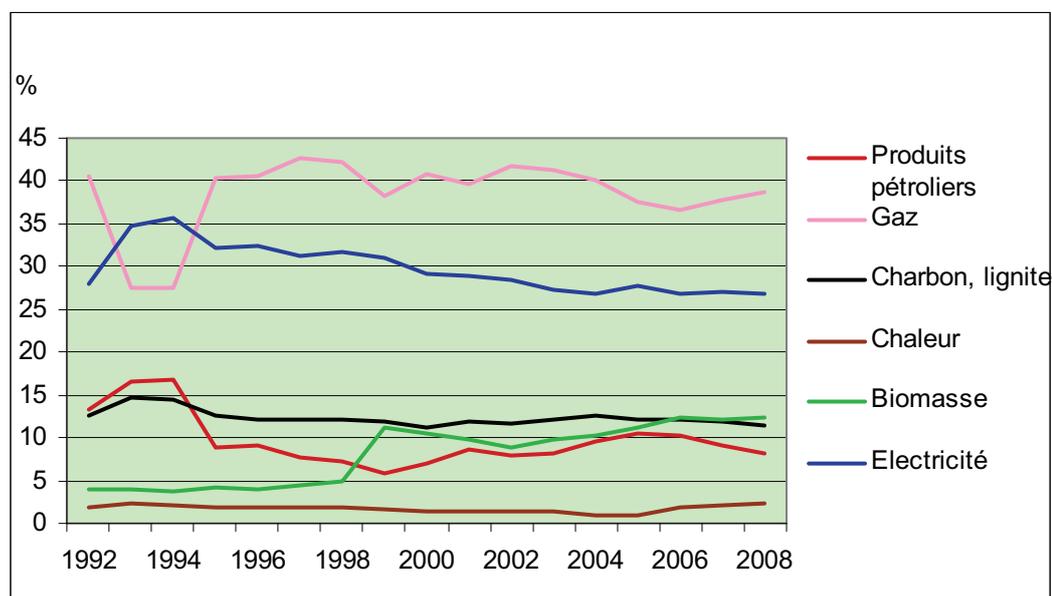
Les secteurs de la chimie, du papier carton, de la mécanique, de l'agroalimentaire et des non ferreux représentent 72,2 % du total de la consommation d'électricité du secteur industriel.

Tableau 53. Consommation d'énergie finale de l'industrie aux Etats-Unis en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz naturel	Charbon	Chaleur	Electricité	Biomasse
287,7	23,6	111,5	32,7	6,7	77,5	35

Source : Enerdata.

Graphique 32. Evolution des parts de produits énergétiques dans la consommation finale d'énergie de l'industrie aux Etats-Unis



Source : Enerdata.

Tableau 54. Evolution des consommations d'électricité des branches industrielles depuis 1992 aux Etats-Unis (Mtep)

Etats-Unis	1992	2000	2008	2008
	Mtep	Mtep	Mtep	%
Sidérurgie	4,9	6,5	6,8	8,8
Chimie	18,6	22,6	21,3	27,8
Minéraux non métalliques	2,8	3,4	3,6	4,7
Industries agro-alimentaires	5,0	6,5	7,1	9,3
Construction	n.a.	n.a.	n.a.	
Mines	n.a.	n.a.	n.a.	
Mécanique	8,8	11,8	9,7	12,7
Métaux non ferreux	8,3	8,1	6,9	9,0
Papier carton	11,1	11,5	10,3	13,4
Equipement de transport	3,1	5,2	3,9	5,1
Textile et cuir	3,2	3,3	2,4	3,2
Industrie du bois	2,3	2,8	2,5	3,2
Total	71,0	84,9	76,6	100

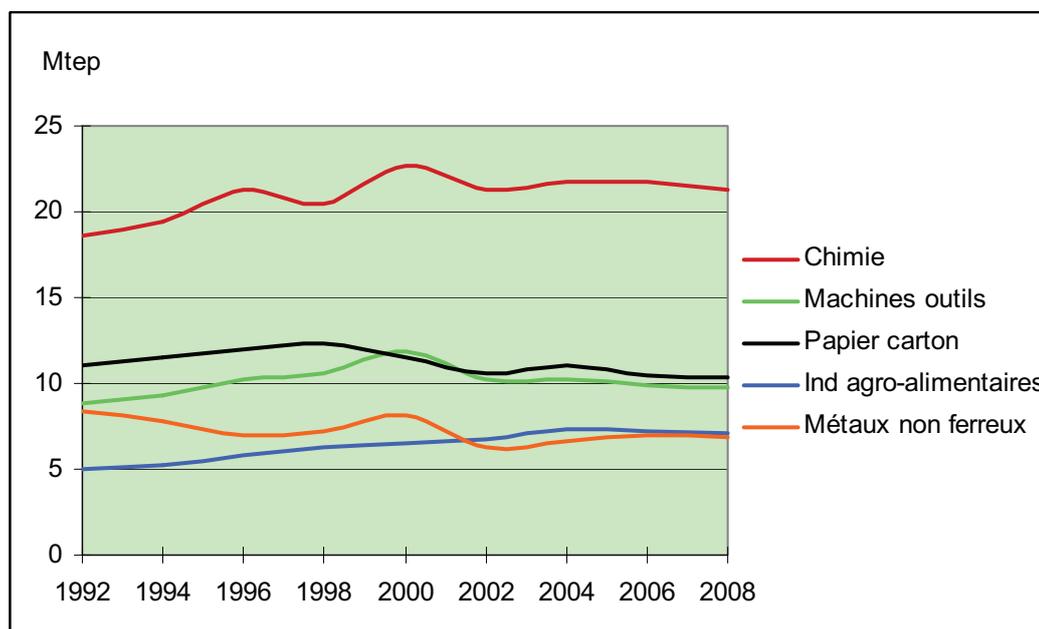
Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Tableau 55. Etats-Unis : part de l'électricité par branche dans la consommation finale d'énergie (Mtep)

Etats-Unis	Consommation énergie finale			Electricité/Energie finale de la branche		
	1992	2000	2008	en 1992	en 2000	en 2008
	Mtep	Mtep	Mtep	%	%	%
Sidérurgie	29,9	36,0	28,3	16,4	18,1	23,9
Chimie	70,0	92,3	79,2	26,6	24,5	26,9
Minéraux non métalliques	19,6	24,3	24,3	14,2	14,1	14,7

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Graphique 33. Evolution des consommations des principales branches industrielles consommatrices d'électricité aux Etats-Unis



Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

On a limité ce tableau aux branches actuellement bien renseignées.

Le graphique 33 montre qu'à l'exception de la filière agroalimentaire, la plupart des branches industrielles ont connu une consommation finale d'électricité en

diminution de 1992 à 2008.

On peut résumer les grandes lignes des paragraphes précédents à travers le tableau 56 qui montre les très grandes différences existant entre les différents ensembles.

Tableau 56. Principales caractéristiques d'évolution des consommations d'électricité dans l'industrie de la Chine, de l'Inde, de l'Union européenne et des Etats-Unis

	Part de l'électricité finale dans l'énergie finale de l'industrie	Gains ou pertes en parts de 1992 à 2008	Part de l'électricité de l'industrie dans la consommation totale d'électricité	Gains ou pertes en parts de 1992 à 2008	2008/1992 Coefficient multiplicateur
Chine	24 %	+ 12,5 %	70 %	+7 %	4,88
Inde	18 %	+5 %	45 %	+1 %	2,25
UE	31 %	+7 %	40 %	+6 %	1,22
Etats-Unis	27 %	-8 %	24 %	?	0,91

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

4.2 Economies et substitution d'électricité à des énergies fossiles dans l'industrie en Chine, aux Etats-Unis, en Inde et dans l'Union européenne

Les chiffres du tableau 56 montrent l'importance d'un bon usage de l'électricité dans le secteur industriel, en particulier en Chine et en Inde.

La production d'électricité correspondante est en effet de l'ordre de 545 Mtep d'énergie primaire³² en Chine en 2008, (plus que l'énergie primaire nécessaire à l'ensemble des autres usages de l'énergie dans l'industrie) et de l'ordre de 100 Mtep en Inde.

Les économies d'électricité dans ce secteur y sont donc des enjeux économiques et environnementaux importants.

La substitution de l'électricité à des combustibles fossiles dans des process thermiques existants ou la pénétration de l'électricité dans de nouveaux usages performants est susceptible d'apporter des économies globales d'énergie finale et primaire (si un kWh électrique final déplace plus de 3,2 kWh thermiques d'énergie primaire en Chine et jusqu'à 4,57 en Inde) et éventuellement des réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Pour illustrer ce dernier point, le tableau 57 donne les valeurs d'émissions totales³³ de CO₂ (émissions directes et indirectes dues à l'extraction, au raffinage et au transport) par type d'énergie pour l'industrie.

Tableau 57. Emissions de CO₂ des principaux combustibles utilisés dans l'industrie

Type d'énergie	Grammes de CO ₂ par kWh PCI*
Coke	418
Coke de pétrole	372
Fioul domestique	300
Fioul lourd	320
Gaz naturel	232
Gaz de pétrole liquéfié (GPL)	275
Charbon	369

*PCI : pouvoir calorifique inférieur.

Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

Quand on compare ces émissions et celles de l'électricité chinoise ou indienne actuelles et prévisibles en 2020 (cf. section 3), on constate que les applications électriques à choisir pour les substitutions doivent répondre à des critères d'efficacité extrêmement sévères pour réduire de manière significative les émissions de CO₂.

4.2.1 Les économies d'électricité

Une bonne part des économies potentielles d'électricité dans l'industrie dépend d'actions transversales, largement répandues dans l'industrie : les moteurs, l'air comprimé, le froid, l'éclairage, le chauffage des locaux qui constituent ce qu'on appelle des « utilités ». D'autres concernent des grands procédés industriels électriques, comme les fours à arc, l'électrolyse, l'osmose inverse.

Les utilités

Les systèmes de motorisation

C'est de loin le principal poste de consommation d'électricité dans l'industrie en Europe, avec 750 TWh. Nous ne disposons pas de chiffres précis pour la Chine et l'Inde, mais l'application d'un ratio analogue à celui de l'Europe conduit à des consommations considérables en 2008, de 1 300 et 215 TWh respectivement. Même de modestes gains d'efficacité électrique des systèmes motorisés engendreront de substantielles économies des consommations d'électricité des entreprises et plus globalement de l'industrie dans ces pays. Le programme européen "Motor Challenge"³⁴ chiffre l'importance des économies envisageables à plus de 200 TWh par an au niveau européen (27 % de la consommation des moteurs et 18 % de la consommation d'électricité du secteur industriel).

³² Il faut, selon les conditions de transport et de distribution, 3,2 kWh d'énergie primaire pour produire et distribuer 1 kWh d'électricité en Chine (cf. section 2.6.2)

³³ Ademe, Guide des facteurs d'émission janvier 2007, www2.ademe.fr

³⁴ www.motorchallenge.fr

Les pertes par effet joule des moteurs, dues à la résistance des enroulements et des conducteurs, les pertes magnétiques, les pertes mécaniques par frottement, etc. contribuent à réduire l'efficacité électrique des moteurs. Ces pertes peuvent être réduites par des mesures techniques bien connues : en augmentant la section des enroulements et des conducteurs pour réduire leur résistance, en utilisant des aciers magnétiques de haute qualité, en améliorant l'aérodynamisme des moteurs, en utilisant des contacts électroniques pour éviter les pertes dues aux frottements des balais, etc. L'AIE constate³⁵ que l'introduction de standards de haute qualité aux Etats-Unis et au Canada est à l'origine d'une pénétration à hauteur de 70 % de moteurs performants sur ces marchés, contrairement à l'Europe qui

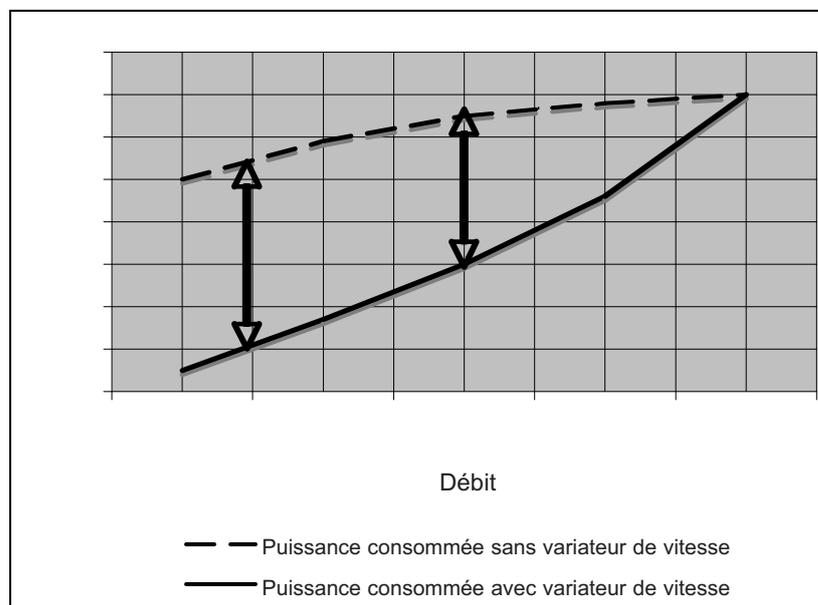
ne s'est pas dotée d'outils incitatifs dans ce domaine et stagne autour de 10 %. On ne dispose pas d'informations spécifiques sur l'état des parcs de moteurs électriques en Chine et en Inde mais on peut raisonnablement imaginer qu'il est comparable à celui de l'Europe.

D'autre part on constate que l'utilisation de moteurs à vitesse variable, qui permettent d'ajuster au mieux la vitesse et le couple des moteurs à la charge qu'ils ont à remplir, est une source importante d'économie d'électricité quand les process en jeu entraînent des variations de couple importantes. C'est en particulier le cas pour le traitement des fluides qui suppose généralement des variations de débit importantes.

Encadré 4. La variation de vitesse

Le variateur de vitesse est une commande électrique qui permet une simplification des organes mécaniques pour la transmission de puissance. Il intègre aussi des fonctions de mesure, de protection et de sécurité. Le variateur agit sur la variation de fréquence du moteur, en permettant l'adaptation optimale du besoin de puissance mécanique et de la consommation d'énergie électrique. Les gains énergétiques en exploitation, très variables selon les process, peuvent atteindre jusqu'à 50 %.

ECONOMIE D'ÉNERGIE RÉALISÉE AVEC UN VARIATEUR DE VITESSE



³⁵ International Energy Agency, *Energy Technology Perspectives 2008 - Scenarios and Strategies to 2050?*

Sans variateur de vitesse, la courbe de puissance appelée suit la courbe du haut du graphique en fonction du débit de fluide ; avec un variateur de vitesse, elle suit la courbe du bas.

Le potentiel d'économie d'électricité associé à la pénétration de cette technologie dans les entreprises qui peuvent encore en bénéficier (20 % de la consommation totale de l'industrie) est de l'ordre de 5 TWh, avec des temps de retour sur investissement inférieurs à 2 ans.

Dans un guide récent ³⁶, l'Ademe analyse en détail pour chacune des applications des principaux systèmes motorisés (compression, pompage, ventilation, etc.) les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique. Les différentes fiches présentées montrent qu'au-delà de l'amélioration du rendement des moteurs, ce sont les systèmes dans lesquels ils s'insèrent qui doivent être analysés : réduction des pertes de charge, des pertes de transmission mécanique, récupérations de chaleur, maintenance, etc., qualité du réseau de distribution interne d'électricité dans l'entreprise. De son côté, Gimelec³⁷, en plus du développement déjà signalé de la vitesse variable, insiste sur l'importance de l'action sur le réseau électrique (filtrage des harmoniques sur le réseau basse tension susceptible d'économies d'électricité de 10 à 15 %, compensation d'énergie réactive, etc.), et sur l'importance de l'usage de logiciels de gestion de l'énergie.

L'AIE³⁸ enfin chiffre au niveau mondial et à l'horizon 2030 les économies potentielles d'électricité des systèmes motorisés dans le secteur industriel entre 15 et 25 %, avec des temps de retour inférieurs à 2 ans. On peut donc envisager raisonnablement pour des pays comme la Chine et l'Inde des économies de l'ordre de 10 % à l'horizon 2020 et de 20 % à l'horizon 2030.

L'éclairage et le chauffage des locaux

Responsables en Europe d'une consommation de l'ordre de 5 à 6 % d'électricité, l'éclairage et le chauffage des

locaux dans l'industrie sont comme dans le tertiaire (cf. section 6) susceptibles de gains d'efficacité considérables, de l'ordre de 40 % à court et moyen terme (généralisation des lampes à basse consommation et des pompes à chaleur, récupération des chaleurs à basse température, etc.).

Les grands procédés industriels

Dans la sidérurgie, on estime à un peu moins de 10 % le potentiel d'économie d'électricité lié à la seule pénétration de trois technologies éprouvées : le préchauffage des ferrailles avant fusion dans des fours à arc, la gestion par ordinateur de ces fours et l'introduction d'une électrode en courant continu.

Il en est de même dans la transformation des métaux avec la pénétration de la galvanisation par induction ou l'amélioration des fours d'électrolyse d'aluminium.

De même, dans la chimie lourde, on peut attendre des gains de l'ordre de 10 % de la pénétration des techniques d'électrolyse.

Globalement, les ordres de grandeur des potentiels d'économies d'électricité en Chine, en Inde dans l'Union européenne et aux Etats-Unis peuvent donc être résumés dans le tableau 58.

³⁶ Les solutions pour optimiser vos systèmes motorisés, www.ademe.fr

³⁷ Mener à bien un projet d'efficacité énergétique, www.gimelec.fr

³⁸ Energy Technology Perspectives 2008 - Scenarios and Strategies to 2050? International Energy Agency.

Tableau 58. Ordres de grandeur en 2020 et 2030 des potentiels d'économies d'électricité en Chine, en Inde dans l'Union européenne et aux Etats-Unis

Industrie TWh : finaux	Consommation 2008	Prospective AIE			
		2020		2030	
		Scénario Référence	Scénario Economies	Scénario Référence	Scénario Economies
TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	
Chine total	1 970	3 700	370	4 700	1 105
Utilités*	1 400	2 660	270	3 385	845
Procédés**	570	1 040	100	1 315	260
Inde total	329	570	55	930	215
Utilités*	235	410	40	670	165
Procédés**	94	160	15	260	50
UE total	1 140	1 265	135	1 290	300
Utilités*	820	910	95	930	230
Procédés**	320	355	40	360	70
Etats-Unis total	900	920	100	895	210
Utilités*	650	665	70	645	160
Procédés**	250	255	30	250	50

*Systèmes motorisés, éclairage, chauffage, climatisation des locaux.

** Hors systèmes motorisés

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Ce tableau montre l'enjeu majeur que constituent les économies d'électricité possibles dans de bonnes conditions économiques en Chine et en Inde. En 2030, l'économie d'électricité chinoise dans l'industrie serait presque égale à la consommation d'électricité en 2008 de l'Union européenne. L'atteinte de ces objectifs est d'autant plus vraisemblable que la production industrielle de ces pays va plus

que tripler pendant cette période : dans ces conditions, l'essentiel des installations en fonctionnement en 2030 aura pu bénéficier des technologies les plus efficaces.

Le tableau 59 montre l'ordre de grandeur des économies d'énergie primaire et d'émissions de CO₂ correspondant à cette stratégie d'économie d'électricité.

Tableau 59. Economies d'énergie primaire et d'émissions de CO₂

Industrie	2020 Economies d'énergie primaire	2020 Economies de CO ₂	2030 Economies d'énergie primaire	2030 Economies de CO ₂
	Mtep	Mt	Mtep	Mt
Chine	102	98	305	293
Inde	19*	21	74	81
UE	34	14	75	31
Etats-Unis	25	15,5	53	33

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Ce tableau renforce les conclusions précédentes et montre l'intérêt particulier d'une stratégie d'économie d'électricité, en particulier en Chine et en Inde. En Inde, par exemple, une économie d'électricité en 2030 du même ordre que celle des Etats-Unis (215 Mtep contre 210) a des conséquences 40 % supérieures en termes d'économie d'énergie primaire, et 145 % supérieures en termes d'économies de CO₂.

4.2.2 Les substitutions et les placements d'électricité dans l'industrie

La substitution d'électricité à des combustibles fossiles dans les procédés existants ou sa pénétration dans de nouvelles applications est souvent présentée comme une source importante des économies d'énergie et de CO₂ du secteur industriel. Mais les calculs d'économie présentés sont très généralement fondés sur des approches souvent dépassées aujourd'hui et sur des coefficients conventionnels situés loin de la réalité, aussi bien au niveau des économies d'énergie primaire que des émissions de CO₂.

On rappelle dans le tableau 60 les principales caractéristiques de consommation primaire et d'émissions d'un kWh d'électricité finale actuel dans les quatre entités géographiques de notre étude.

Tableau 60. Consommation d'énergie primaire et émissions de CO₂ pour la fourniture d'un kWh d'électricité finale en Chine, en Inde, dans l'Union européenne et aux Etats-Unis, en 2008

	kWh primaire/kWh final	Grammes CO ₂ /kWh
Chine	3,21	960
Inde	3,5- 4,57 ³⁹	1 100-1 219
Union européenne	2,88	418
Etats-Unis	2,91	620

Source : calculs des auteurs, données Enerdata

A l'horizon 2020, ces caractéristiques ont peu de chance d'évoluer sensiblement : dans l'Union européenne et aux Etats-Unis, où la croissance des consommations attendues est négligeable dans l'industrie, seul le renouvellement des capacités est susceptible de modifier, mais de façon encore marginale, la composition du parc de production électrique.

En Chine et en Inde, malgré des programmes éventuellement importants d'électricité renouvelable et/ou de nucléaire, la très forte augmentation de capacité électrique entraînera très certainement une poursuite du recours au charbon, abondant dans ces deux pays. La nature du mélange de production ne devrait donc pas évoluer sensiblement à court et moyen terme.

C'est donc sur ces bases, à moins de 5 ou 10 % près, qu'on pourra juger, dans les différents pays, de l'intérêt des substitutions de combustibles fossiles par de l'électricité, jusque vers 2025 ou 2030.

Les technologies de substitution électriques dans l'industrie les plus souvent évoquées sont les suivantes :

- la généralisation des fours à induction, principalement dans les secteurs de la fonderie, de la construction mécanique et automobile, de la première transformation de l'acier et de la plasturgie. Le gain attendu en énergie finale est de l'ordre 60 % ;
- l'introduction de réacteurs à induction dans les industries agroalimentaires (IAA) et la parachimie avec un gain en énergie finale de 45 à 60 % selon les secteurs ;
- la compression mécanique de vapeur (CMV), très économe en énergie (gains de 75 à 85 % selon les secteurs) dans les IAA et la parachimie ;
- la CMV dans les applications de séchage dans les IAA ;
- les pompes à chaleur et les technologies à membrane dans les IAA, avec des gains énergétiques qui s'étagent de 45 à 90 %, selon les technologies et les secteurs ;
- la séparation par membranes dans la chimie, les industries agroalimentaires, l'industrie du papier ou le raffinage pétrolier.

³⁹ On peut estimer que dans le domaine de l'industrie, les transactions concernant l'électricité en Inde se font dans des conditions qui excluent au moins partiellement le vol ou le non recouvrement des factures d'électricité, ce qui explique le choix d'une fourchette pour l'énergie primaire et les émissions au kWh final.

Ces différents procédés permettent des économies souvent substantielles d'énergie finale par substitution d'électricité à un combustible fossile. Mais la situation en énergie primaire et en émissions de CO₂ est bien différente comme le montre le tableau 61 qui indique pour chacun des pays les performances minimales d'efficacité que doivent respecter les différentes technologies pour apporter des bénéfices clairs en termes d'économie d'énergie primaire.

Tableau 61. Performances minimales d'efficacité des technologies de substitution pour les économies d'énergie primaire

	Performances minimales en énergie primaire
Chine	-69 %
Inde	-78 % -71 %
Union européenne	-65 %
Etats-Unis	-66 %

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Le tableau 61 se lit de la façon suivante : en Chine, par exemple, la substitution d'un combustible fossile par de l'électricité ne sera source d'économie d'énergie primaire

que si la technologie utilisée permet en moyenne des économies de plus de 69 %.

Comme nous l'avons vu, ces exigences minimales dépendent du profil temporel d'utilisation de l'électricité et des moyens de production réellement mis en œuvre dans une branche industrielle donnée⁴⁰.

Du point de vue des économies d'énergie primaire, les gisements d'économie sont donc restreints, en particulier en Chine et en Inde, du fait des performances minimales à atteindre. Par contre, ces substitutions peuvent se justifier pour des raisons économiques ou par mesure de précaution pour économiser un produit fossile déterminé, par exemple du pétrole. C'est le cas en Chine et en Inde, tous deux importateurs de pétrole. Néanmoins, leur faible consommation de ce produit dans l'industrie⁴¹, surtout en Chine, limitent les opportunités d'économies dans ce secteur.

Du point de vue des émissions de CO₂, le tableau indique, pour chacun des pays, les performances minimales d'efficacité que doivent respecter les différentes technologies de substitution pour apporter des bénéfices clairs en termes d'émissions, en fonction du produit énergétique substitué.

Tableau 62. Performances minimales d'efficacité pour apporter des économies d'émissions de CO₂

CO2 /kWh (grammes)	Electricité	Charbon	Performance minimale d'économie	Fuel	Performance minimale d'économie	Gaz naturel	Performance minimale d'économie
Chine	960	370	-61 %	320	-67 %	232	- 76 %
Inde	1100- 1219	370	-66 %	320	- 71 %	232	-79 %
UE	418	370	-11 %	320	- 23 %	232	-44 %
Etats-Unis	620	370	-40 %	320	-48 %	232	- 63 %

Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

⁴⁰ En Europe, par exemple, les usages en base de l'électricité, les plus fréquents dans les branches industrielles les plus consommatrices, font appel à un mix de production électrique comportant plus de nucléaire de mauvais rendement que le mix moyen.

⁴¹ 40 Mtep, soit 6 % de la consommation finale de l'industrie en Chine, et 20 Mtep, soit 16 % de la consommation finale en Inde.

Les situations sont également très contrastées : une économie supérieure à 11 % apportée par la substitution d'un kWh charbon par un kWh électrique en Europe, mais supérieure à 61 % en Chine et 66 % en Inde, justifierait cette opération en termes d'émissions de CO₂.

Globalement, pour répondre aux critères d'un « bon usage de l'électricité » les substitutions d'électricité dans l'industrie devraient se limiter à des applications de très haute efficacité en Chine et en Inde dans les 15 années à venir, au cours desquelles on ne peut guère s'attendre à une modification importante du *mix* de production énergétique. Dans l'Union européenne, ces opérations de substitution se justifient plus facilement en termes d'émissions de CO₂, d'autant que l'électricité de base généralement consommée par l'industrie présente un contenu en CO₂ inférieur au contenu moyen annuel, du fait de la présence d'un nucléaire significatif dans le *mix* européen qui produit l'électricité en base.

Au delà de 2025, la situation peut évoluer sous l'influence de plusieurs paramètres : décarbonisation croissante des parcs électriques, pénétration plus complète des procédés économes, arrivée à maturité de ruptures technologiques dans les procédés.

En ce qui concerne le premier point, on peut envisager une réduction de la part d'origine thermique dans les parcs, grâce à la pénétration des énergies électriques renouvelables (et éventuellement du nucléaire). Mais, le taux de cette pénétration dépendra au moins autant de la rigueur du contrôle de la demande électrique dans chacune des entités que des efforts accordés aux énergies électriques non carbonées.

La pénétration plus complète de procédés économes en énergie électrique ou de procédés en rupture économes en électricité échappe à cette critique et contribue au contraire, par la détente qu'elle apporte en termes de demande électrique, à la décarbonisation du *mix* de production électrique.

Les procédés en rupture les plus porteurs à terme concernent essentiellement la sidérurgie. Dans ce domaine qui reste dominé par l'usage de combustibles fossiles, les projets de R&D abondent : recyclage des gaz de gueulard après décarbonatation, capture et stockage du CO₂, qui ne concernent pas l'électricité. D'autres, plus radicaux, comme le recours à l'hydrogène pour réduire l'oxyde de fer ou l'électrolyse, porteurs d'économies importantes de combustibles fossiles, supposent le recours à l'électricité. Les quantités d'énergie primaire et de CO₂ réellement économisées dépendront à la fois de l'efficacité de ces procédés, du rendement moyen de production et du taux de décarbonisation des parcs de production d'électricité au moment de leur usage.

Il se dégage de cette analyse quelques points qui méritent d'être rappelés : les potentiels d'économies d'électricité dans l'industrie à faible temps de retour sont encore très importants en Chine et en Inde, de 10 % au moins à l'horizon 2020 et d'environ 25 % à l'horizon 2030. Ils ont l'énorme avantage de satisfaire simultanément à l'ensemble des critères d'un « bon usage de l'électricité » : économie, protection des ressources épuisables, réduction des émissions de GES, sécurité énergétique. Par contre, les substitutions des combustibles fossiles par de l'électricité, pouvant se justifier pour des raisons économiques et des raisons de sécurité d'approvisionnement, garderont des conséquences limitées à moyen terme en Chine et en Inde, en termes d'économies d'émissions de CO₂ et d'énergie primaire.

5. Le secteur des transports

5.1 La consommation d'électricité dans les transports

5.1.1. En Chine

La consommation d'électricité dans les transports, de 27,8 TWh en 2008, représente 1,7 % de la consommation totale de ce secteur totalement dominé par les produits pétroliers (97,4 %).

Cette proportion n'a que très peu varié sur la période 1992/2008, de 1,9 % en 1992 à 2,4 % en 2008.

Le tableau 64 indique la consommation finale des différents modes de transport en 2008.

Le graphique 34 montre l'évolution des consommations finales des différents modes de transport depuis 1992.

Ce graphique montre l'explosion des consommations du transport routier depuis le début des années 2000 (12 %

par an) et la croissance beaucoup plus modérée des consommations des autres modes de transport.

L'électricité intervient dans le seul secteur du transport ferroviaire dont elle représente 14 % de la consommation finale. L'essentiel du transport ferroviaire, en croissance de 44 % depuis 1992, est effectué à base de locomotives diesel (66 %), comme aux Etats-Unis. Mais une part non négligeable du trafic repose encore sur la traction par des locomotives à charbon (20 %). En 1992, cette part était de plus de 75 %, celle de l'électricité de 5 %, et celle du diesel de 20 %. C'est donc d'abord au profit du diesel que s'est fait la substitution du charbon et plus modestement au profit de l'électricité.

En 2006, les trafics de marchandises s'élevaient à 2 230 GT. km et ceux de passagers à 690 Gp. km⁴².

Tableau 63. Consommation d'énergie finale des transports en Chine en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz naturel	Agrocarburants	Electricité
141,2	137,5	0,1	1,3	2,4

Source : Enerdata.

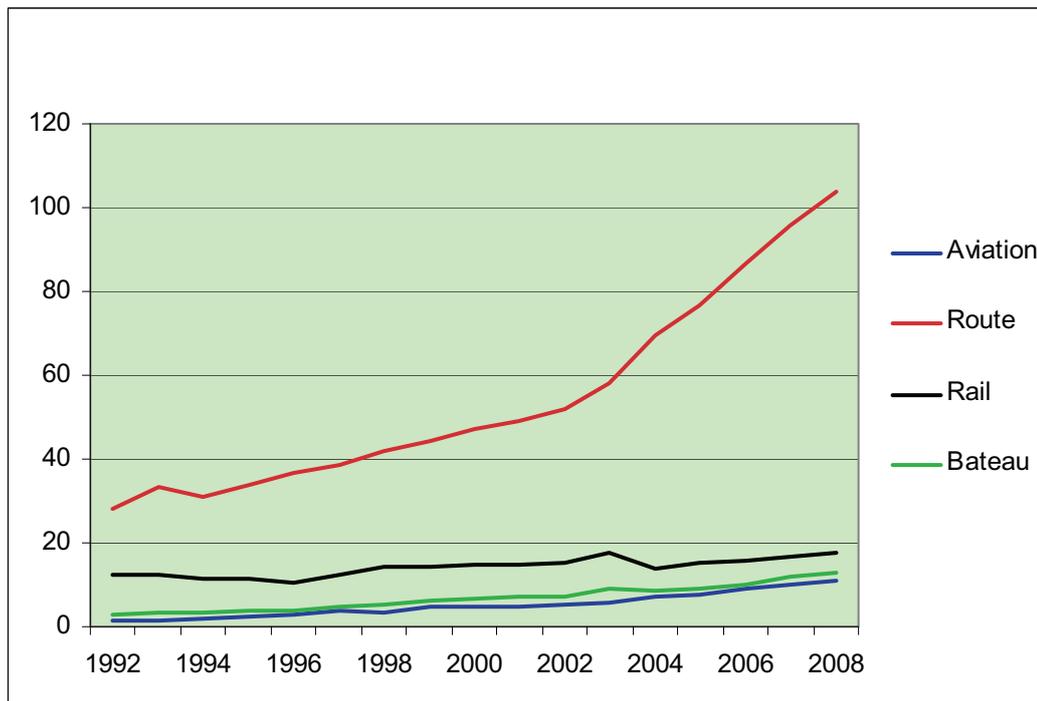
Tableau 64. Consommation d'énergie finale des différents modes de transports en Chine en 2008 (Mtep)

Chine Mtep	Aviation	Route	Rail	Navires	Total
Produits pétroliers	10,7	103,6	11,79	12,7	144,8
Charbon			3,55		
Electricité			2,39		
Total	10,7	103,6	17,7	12,7	144,8

Source : Enerdata.

⁴² Dessus, B. et B. Laponche, *Les transports face au défi de l'énergie et du climat*, document de travail n° 86, AFD, Paris.

Graphique 34. Evolution des consommations finales des différents modes de transport en Chine (Mtep)



Source : Enerdata.

5.1.2 En Inde

La consommation d'électricité dans les transports, 12 TWh en 2008, représente 2,5 % de la consommation totale de ce secteur totalement dominé par les produits pétroliers (94 %).

Cette part a progressivement augmenté depuis 1992 où elle ne représentait que 1,6 % de la consommation totale du secteur.

Le tableau 66 indique la consommation finale des différents modes de transport en 2008.

Tableau 65. Consommation d'énergie finale des transports en Inde en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz naturel	Agrocarburants	Electricité
41,13	38,65	1,29	0,15	1,04

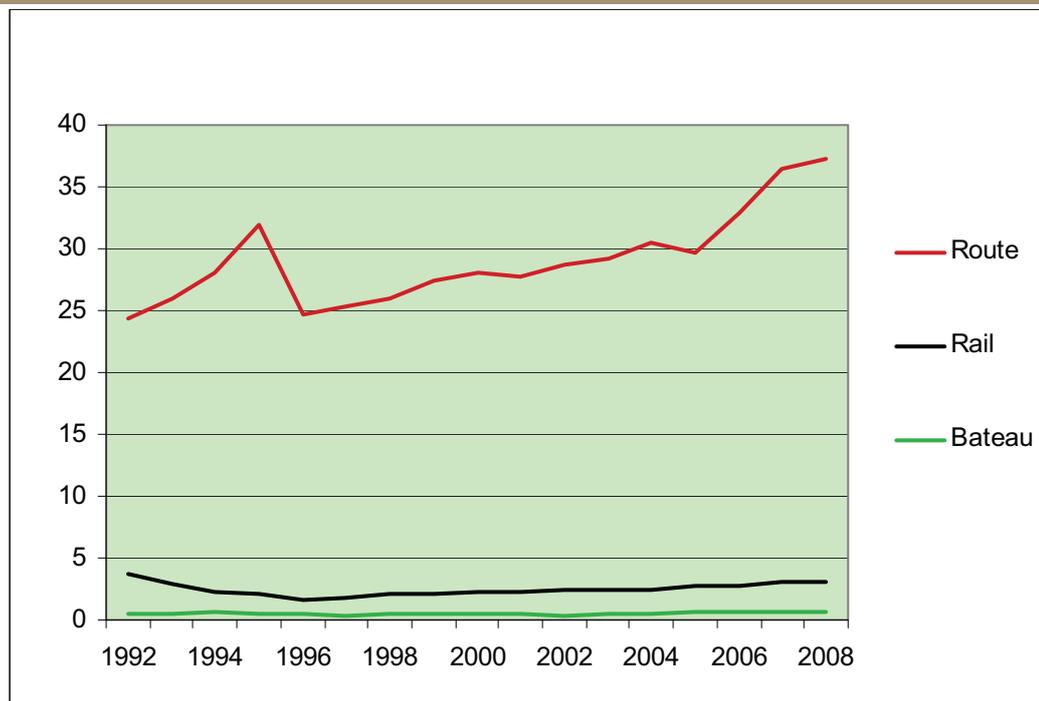
Source : Enerdata.

Tableau 66. Consommation d'énergie finale des différents modes de transports en Inde en 2008 (Mtep)

Inde Mtep	Aviation	Route	Rail	Navires	Total
Carburants	nc	37,3	2,1	0,69	40,09
Electricité			1,04		1,04
Total	nc		3,14		41,13

Source : Enerdata.

Graphique 35. Evolution des consommations finales des différents modes de transport en Inde (Mtep)



Source : Enerdata.

Le graphique 35 montre l'évolution des consommations finales des différents modes de transport depuis 1992.

La consommation d'énergie du transport routier, après une chute spectaculaire en 1995, est en forte augmentation depuis 1996 (au rythme moyen de 6 % par an), avec une accélération au cours des dernières années. Les transports ferroviaires, en très fort déclin jusqu'en 1998, se sont redressés depuis, mais n'ont pas encore rejoint la consommation de 1992. La consommation du trafic interne par bateaux reste très modeste. Enfin, les statistiques Enerdata ne donnent aucune indication sur la consommation du secteur de l'aviation.

L'électricité intervient dans le seul secteur du transport ferroviaire, dont elle représente 33 % de la consommation

finale. La majorité du transport ferroviaire est effectuée à partir de locomotives diesel (67 %) comme aux Etats-Unis. Au contraire de la Chine, la traction par locomotives à charbon est inexistante.

En 2006, les trafics de marchandises s'élevaient en Inde à 480 GT km (5 fois plus faibles qu'en Chine) et ceux de passagers à 695 Gp.km⁴³.

5.1.3 Union européenne

La consommation d'électricité dans les transports, 72 TWh en 2008, représente 2 % de la consommation totale de ce secteur.

Cette part est restée inchangée depuis 1992.

Tableau 67. Consommation d'énergie finale des transports de l'Union européenne en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz naturel	Agrocarburants	Electricité
332,4	315,6	0,8	9,80	6,2

Source : Enerdata.

⁴³ Dessus, B. et B. Laponche., *Les transports face au défi de l'énergie et du changement climatique*, document de travail n°s 86, AFD, Paris. Septembre 2009.

Tableau 68. Consommation d'énergie finale des différents modes de transports de l'Union européenne en 2008 (Mtep)

UE Mtep	Aviation	Route	Rail	Navires	Total
Carburants	10	307,7	3,2	0,69	40,09
Electricité			6,2		
Total	10,0	307,7	9,4	5,3	332,4

Source : Enerdata.

Le tableau 68 indique la consommation finale des différents modes de transport en 2008.

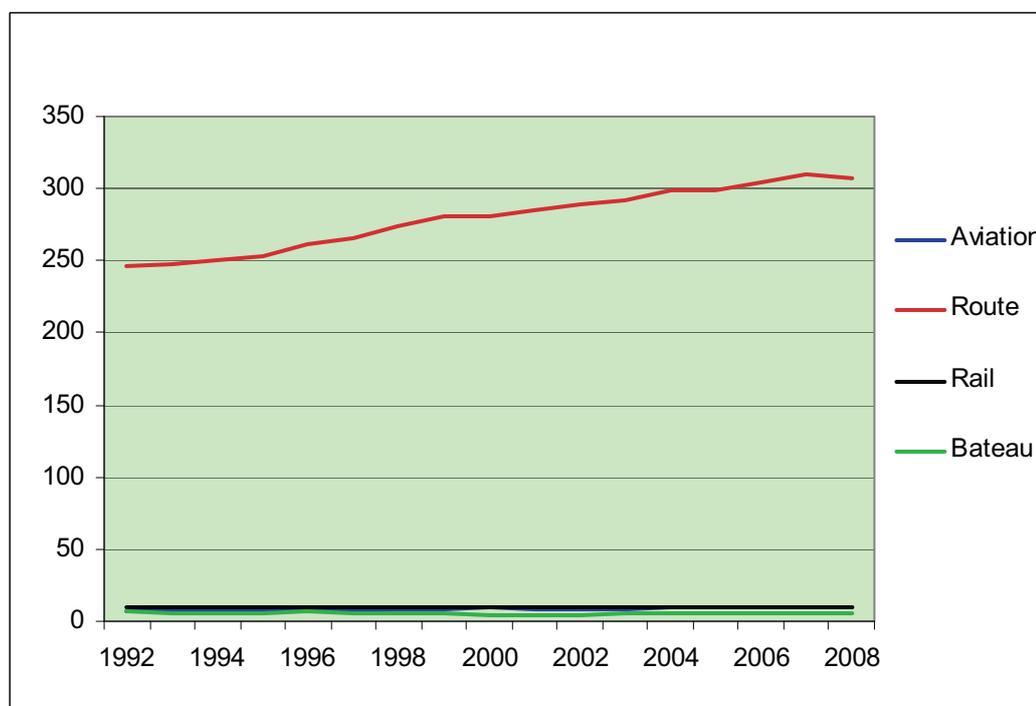
Le graphique 36 montre l'évolution des consommations finales des différents modes de transport depuis 1992.

Le graphique 36 montre l'énorme prédominance des transports routiers dans l'Union européenne par rapport aux consommations des autres modes de transport, très marginaux. La consommation routière augmente de 25 % sur la période, celle du rail reste stable, celle de l'aviation

augmente de près de 50 %, celle du transport par bateaux chute de 20 %.

L'électricité intervient quasi uniquement (à l'exception d'un parc de voitures électriques, encore confidentiel) dans le seul secteur du transport ferroviaire, dont elle représente les deux tiers de la consommation finale.

En 2006, les trafics de marchandises s'élevaient dans l'Union européenne à 235 GT.km (10 fois plus faibles qu'en Chine ou qu'aux Etats-Unis), et les trafics de passagers, à 375 Gp.km⁴⁴.

Graphique 36. Evolution des consommations finales des différents modes de transport de l'Union européenne (Mtep)

Source : Enerdata.

⁴⁴ Ibid. 42.

5.1.4 Aux Etats-Unis

La consommation d'électricité dans les transports, 7,6 TWh en 2008, ne représente que 0,1 % de la consommation totale de ce secteur.

Le tableau 70 indique la consommation finale des différents modes de transport en 2008.

Le graphique 37 montre l'évolution des consommations finales des différents modes de transport depuis 1992.

Le graphique 37 montre, comme pour l'Union européenne, la très forte prééminence du transport routier dans la

consommation finale, avec une croissance analogue à celle de l'Europe, mais un décrochement important en 2008. Cependant, à la différence de l'Union européenne, la part de consommation de l'aviation n'est pas négligeable et atteint un taux de l'ordre de 10 % de la consommation finale du secteur.

L'électricité intervient uniquement (à l'exception d'un parc de voitures électriques encore confidentiel) dans le secteur du transport ferroviaire, dont elle ne représente que 6 % (onze fois moins qu'en Europe) de la consommation finale. Au total, 94 % du trafic ferroviaire est donc assuré à partir de locomotives diesel.

Tableau 69. Consommation d'énergie finale de l'industrie aux Etats-Unis en 2008 (Mtep)

Total	Produits pétroliers	Gaz naturel	Agrocarburants	Electricité
592,3	571,2	0,7	19,7	0,7

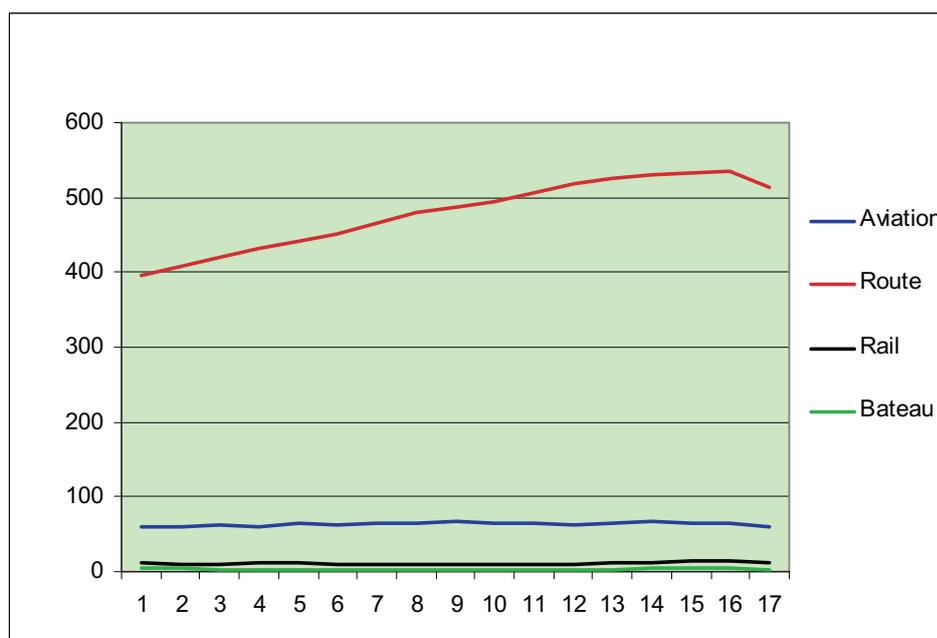
Source : Enerdata.

Tableau 70. Consommation d'énergie finale des différents modes de transports des Etats-Unis en 2008 (Mtep)

Etats-Unis Mtep	Aviation	Route	Rail	Navires	Total
Carburants	61,1	513,6	11,4	3,56	
Electricité			0,7		
Total	61,1	513,6	12,1	3,6	590,4

Source : Enerdata.

Graphique 37. Evolution des consommations finales des différents modes de transport des Etats-Unis (Mtep)



Source : Enerdata.

En 2006, les trafics de marchandises s'élevaient aux Etats-Unis à 2530 GT.km (dix fois plus qu'en Europe) mais les trafics de

passagers, inférieurs à 10 Gp.km, étaient tout à fait marginaux (40 fois plus faibles que dans l'Union européenne)⁴⁵.

5.2 Les économies et substitution d'électricité à des énergies fossiles dans les transports en Chine, aux Etats-Unis, en Inde et dans l'Union européenne

5.2.1 Les économies d'électricité

L'analyse précédente montre que la consommation actuelle d'électricité reste globalement tout à fait marginale dans la consommation des transports : 1,7 % en Chine, 0,1 % aux Etats-Unis, 2,5 % en Inde, 2 % dans l'Union européenne. Cette consommation reste aujourd'hui confinée aux transports ferroviaires. Seule l'Union européenne affiche une consommation significative d'électricité dans ce mode de transports (66 % de la consommation du secteur) contre 33 % en Inde, 14 % en Chine, et 6 % seulement aux Etats-Unis.

L'enjeu des économies d'électricité dans le secteur des transports de l'ensemble de ces pays est donc modeste.

5.2.2 Les substitutions et les placements d'électricité dans les transports

Il n'en est pas de même pour les substitutions et les placements d'électricité dans des modes de transport traditionnellement prisonniers des produits pétroliers, comme le transport routier ou les transports guidés, encore souvent peu électrifiés.

Les transports guidés

En Chine et en Inde, les trafics de passagers comme de marchandises sont en rapide augmentation, comme le montre le tableau 71, pour l'année 2005.

Dans les deux pays, les transports guidés de passagers représentent une part non négligeable de l'ensemble des transports terrestres de passagers (16 % pour la Chine et 32 % pour l'Inde).

L'on prend rapidement conscience de l'intérêt de ces pays à voir se maintenir, voire augmenter la part des transports guidés de passagers dans leur bilan, quel que soit le mode de traction de ces systèmes guidés, quand on sait que la consommation par p.km du transport routier de passager des voitures individuelles est dans la plupart des cas⁴⁶ :

- de 5 à 10 fois plus élevée en ville que celle des tramways ou des métros et 4 fois supérieure à celle des autobus,
- de 3 à 5 fois supérieure sur route à celle des trains.

Tableau 71. Ordres de grandeurs des trafics routiers et ferroviaires de passagers et de marchandises en Chine et en Inde en 2005

2005 Trafics	Route				Rail			
	Gp.km	%/an*	GT.km	%/an	Gp.km	%/an	GT.km	%/an
Chine	3 400	11	750	11	650	12	2100	8
Inde	1 500	6	nc	nc	690	4	440	4

*Taux de croissance annuelle

Source : AIE.

⁴⁵ Ibid. 42.

⁴⁶ Ibid. 42.

L'augmentation de cette part sera de toutes façons extrêmement bénéfique en termes d'économies de pétrole et donc de CO₂. Le déplacement d'un point de part de marché de la route vers le rail en Chine est porteur d'une économie de l'ordre de 0,7 Mtep et d'une économie de CO₂ de 2 Mt, et, en Inde, porteur d'une économie de l'ordre de 0,3 Mtep et de 0,85 Mt de CO₂.

La substitution d'électricité au diesel et aux locomotives à charbon ne produit pas dans ces deux pays d'économie significative d'énergie primaire supplémentaire, vu les rendements assez modestes de production et distribution d'électricité dans ces deux pays. Il en est de même pour les émissions de CO₂ du fait du contenu élevé en CO₂ du kWh électrique de ces deux pays (cf. section 3). En revanche, l'électrification du réseau ferré de ces deux pays permettrait des économies de pétrole qui pourraient atteindre 12 Mtep en Chine et 2 Mtep en Inde.

Les véhicules électriques

Les véhicules électriques en substitution aux véhicules à carburants pétroliers sont l'objet d'un intérêt majeur des gouvernements, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays émergents. Ils en attendent à la fois une détente de la contrainte pétrolière, des économies substantielles d'émissions de GES, une diminution sensible des pollutions atmosphériques des grandes agglomérations et, enfin, une relance de l'activité des constructeurs

automobiles fortement touchés par la crise économique et financière de 2008.

Malgré les incertitudes qui pèsent encore sur la pertinence des technologies (en particulier l'autonomie et le temps de recharge des batteries), les avantages de ces véhicules cités précédemment suscitent des perspectives optimistes de développement de parcs significatifs, à moyen terme. En France, par exemple, le gouvernement a lancé en 2009 un plan véhicules électriques avec un objectif de 4 millions de véhicules en 2020.

La Chine, confrontée à l'explosion de son parc de véhicules individuels, a également décidé le lancement d'un vaste programme en faveur des véhicules électriques, dans une optique d'économies de pétrole, de protection de l'environnement urbain et d'économie d'émissions de CO₂.

Il est intéressant de confronter ces objectifs aux critères d'un bon usage de l'électricité, développés à la section 2.

Le tableau 72 compare les principales caractéristiques des véhicules thermiques et électriques. Les deux premières colonnes de ce tableau donnent les performances en énergie finale des véhicules thermiques modernes de gamme moyenne et des véhicules électriques de même gamme. Les colonnes suivantes donnent les performances des parcs de production d'électricité dans l'Union européenne, aux Etats-Unis, en Chine et en Inde.

Tableau 72. Comparaison des performances énergétiques des véhicules électriques et des véhicules thermiques de même classe en Chine, aux Etats-Unis, en Inde et dans l'Union européenne

Energie en kWh/p.km	kWh	Gain sur véhicule thermique actuel	kWh	kWh	kWh	kWh
	finaux /p.km*		primaires /p.km UE	primaires /p.km Etats-Unis	primaires /p.km Chine	primaires /p.km Inde
Véhicule électrique urbain ¹	0,26	-65 %	0,76	0,76	0,83	1,19
Véhicule thermique urbain actuel classe B ²	0,77		0,894	0,89	0,89	0,89
Véhicule électrique interurbain ⁵	0,18	-58 %	0,52	0,52	0,58	0,82
Véhicule thermique interurbain actuel classe B ³	0,43		0,49	0,47	0,47	0,47

* p.km : passager.km.

1) Hypothèse : véhicule consommant 0,25kWh/km sur le réseau, rendement de charge des batteries lithium-ion 95 %, taux d'occupation 1,2, consommation en ville +20%.

2) Hypothèse : véhicule affichant des émissions de 125 g/km du réservoir à la roue, taux d'occupation 1,2 passager par voiture.

3) Hypothèse : mêmes caractéristiques techniques mais taux d'occupation 2,2 passagers, consommation -10 % sur route.

4) Hypothèse : pertes de raffinage 15 %.

5) En supposant que son autonomie devienne suffisante pour autoriser des trajets de plusieurs centaines de km

Source : Efficacité énergétique et environnementale des modes de transports, Deloitte, Ademe, 2008 ; Enjeux, consommations électriques, émissions CO₂ des transports électriques à l'horizon 2020 – 2030, Ademe, 2009.

Ce tableau montre que les gains réels en énergie primaire provenant de l'utilisation urbaine de véhicules électriques restent toujours modestes et varient selon les pays : un gain de l'ordre de 15 % aux USA et dans l'Union européenne, de 7 % en Chine, et une perte de 30 % en Inde. Dans tous les cas, l'usage interurbain de véhicules électriques entraîne des surconsommations d'énergie primaire (de 6 à 75 %).

Le tableau 73 permet d'établir les mêmes comparaisons pour les émissions de CO₂ à partir des contenus moyens de CO₂/kwh final établis (cf. section 5.2).

Ce tableau montre qu'en termes d'émissions de CO₂ l'usage du véhicule électrique, dans l'Union européenne peut se justifier. En Chine et en Inde, l'utilisation du véhicule électrique induit des émissions au moins deux fois plus fortes que celles d'un véhicule moderne de même classe. Ces résultats sont à moduler en fonction des caractéristiques d'appel de puissance électrique du parc de véhicules.

Il est en particulier manifeste qu'en Chine et en Inde, tant que les parcs de production d'électricité ne sont pas très largement modifiés, la justification « économie d'émissions de CO₂ » ne peut être raisonnablement évoquée comme elle l'est parfois pour engager des programmes ambitieux de véhicules électriques. C'est aussi le cas pour les Etats-Unis. En Europe, on peut en attendre quelques gains d'émissions, surtout si les parcs envisagés peuvent adopter des stratégies de recharge en heures creuses, durant lesquelles les énergies fossiles sont moins sollicitées pour la production d'électricité (par exemple, des parcs de sociétés industrielles ou de services).

Ces stratégies peuvent par contre se justifier du double point de vue de l'environnement local dans les grandes conurbations et de la dépendance pétrolière des régions ou pays étudiés.

Reste posée la question des conséquences de parcs électriques sur les réseaux électriques et la production d'électricité.

Tableau 73. Comparaison des performances d'émission des véhicules électriques et des véhicules thermiques de même classe en Chine, aux Etats-Unis, en Inde et dans l'Union européenne

Emissions de CO ₂ en grammes/pkm	kWh	Gain sur véhicule thermique actuel	gCO ₂	gCO ₂	gCO ₂	gCO ₂
	finaux /p.km*		/p.km UE	/p.km USA	/p.km Chine	/p.km Inde
Véhicule électrique urbain	0,26	-65 %	108	161	250	310
Véh. thermique urbain actuel classe B	0,77		124	124	124	124
Véh électrique interurbain	0,18	-58 %	57	112	173	216
Véh thermique interurbain actuelle classe B	0,43		68	68	68	68

Source : cahiers de Global Chance n° 27 et calculs des auteurs.

Le tableau 74 fournit une indication des appels de puissance de recharge d'un véhicule électrique en Europe, selon différentes stratégies de recharge.

Tableau 74. Stratégies de recharge des véhicules électriques et appels de puissance

La recharge complète du véhicule électrique	Appel de puissance équivalent à
En 10 heures (3 kW)	Un chauffe eau
En 1 heure (30 kW)	Un immeuble
En 3 minutes (0,6 MW)	Un quartier

Source : Réseau de transport de l'électricité (RTE).

Ce tableau montre bien qu'un parc important de véhicules électriques en zone urbaine et le foisonnement de stratégies de recharge qu'il risque d'entraîner, peut avoir des conséquences majeures sur le dimensionnement local du réseau et sur les pointes de production potentielles à assurer. Il se dégage de cette analyse quelques points qui méritent d'être rappelés.

Les potentiels actuels d'économie d'électricité dans les transports restent modestes en Chine et en Inde, où les dépenses d'électricité dans ce secteur sont limitées, comme dans les pays industrialisés, à un maximum de 2,5 %.

Le véritable enjeu du bon usage de l'électricité dans les transports se situe donc dans les substitutions et les nouveaux placements d'électricité dans des modes de transport encore peu électrifiés ou encore imperméables à ce vecteur, comme la voiture individuelle.

L'explosion, en Chine et en Inde, des trafics de passagers et de marchandises, avec des croissances à deux chiffres, soulève en premier lieu la question du pétrole puisqu'ils en sont déjà importateurs aujourd'hui.

L'acquisition de parts de marché par les transports guidés, grâce aux très fortes économies de carburant qu'elle est susceptible d'engendrer (même si le mode de traction reste encore largement dépendant des produits pétroliers) devrait constituer la première priorité d'action. Elle s'accompagne en outre de réductions très significatives d'émissions

de GES. Enfin, en particulier en milieu urbain, l'implantation de transports collectifs guidés (trams, métros, etc.) participe très largement à l'amélioration de l'accès à la mobilité pour tous, à la décongestion des trafics et à l'amélioration de la qualité de l'air.

L'électrification des réseaux ferrés correspondants n'intervient qu'au second plan en termes d'économie de pétrole et d'économies d'émissions de CO₂, du fait du contenu élevé en CO₂ de la production d'électricité dans ces deux pays.

L'appréciation devrait être beaucoup plus nuancée concernant le développement massif éventuel du véhicule électrique en Chine et en Inde, qui trouve une justification majeure dans les économies de pétrole et les réductions de pollutions locales susceptibles d'être apportées à ces pays qui voient leur parc automobile croître à très grande vitesse. En effet, cet éventuel développement satisfait très imparfaitement aux autres critères de « bon usage de l'électricité » en particulier pour les raisons suivantes :

- il n'entraîne pas d'économies d'énergie mais plutôt des surconsommations d'énergie primaire ;
- il se traduit par un renforcement des émissions de CO₂ dans la plupart des cas ;
- il n'offre pas d'avantage particulier par rapport aux véhicules thermiques concernant l'accès à la mobilité.

Il semblerait raisonnable, dans ces conditions, de privilégier, au moins pour la prochaine décennie, un développement ciblé du véhicule électrique pour des parcs captifs capables d'en contrôler et optimiser le fonctionnement systémique⁴⁷, plutôt qu'un développement « grand public » qui risquerait, sans apporter de réels progrès en termes d'accès équitable à la mobilité, d'entraîner des coûts d'infrastructures de réseaux électriques injustifiés et de très médiocres performances en termes d'émissions de CO₂.

⁴⁷ En particulier en termes de recharge en heures creuses de nuit.

6. Les secteurs résidentiel et tertiaire

6.1 Les consommations d'énergie des secteurs résidentiel et tertiaire

6.1.1 Les consommations finales par habitant en 2008

La consommation d'énergie finale par habitant de l'ensemble résidentiel et tertiaire (R&T) des Etats-Unis est près du double de celle de l'Union européenne, cinq fois celle de la Chine et dix fois celle de l'Inde.

Aux Etats-Unis, la consommation du tertiaire représente 80 % de celle du résidentiel et seulement 50 % dans l'Union européenne. L'écart entre les deux secteurs est plus important en Chine et en Inde, où la consommation du tertiaire représente respectivement 21 % et 10 % de celle du résidentiel. Dans le résidentiel, la consommation de la Chine est égale à 1,7 fois celle de l'Inde, et pour le tertiaire 3,7.

Les différences sur la part de chaque produit énergétique sont considérables.

En Inde, la biomasse assure 77 % de la consommation du résidentiel et 39 % de celle du tertiaire. En Chine, la biomasse domine dans le résidentiel.

Dans le résidentiel, la part de l'électricité varie de 6 % pour l'Inde et 10 % pour la Chine à 23 % pour l'Union européenne et 44 % pour les Etats-Unis.

Le tertiaire est le secteur où la part de l'électricité est la plus importante et assez voisine dans les quatre ensembles : 38 % pour l'Inde, 43 % pour la Chine, 48 % pour l'Union européenne et les Etats-Unis.

Tableau 75. Consommation finale d'énergie et part des produits énergétiques de R&T

2008	Population	Consommation finale				Part			
		Totale	Par habitant	Charbon	Pétroliers	Gaz	Chaleur	Biomasse	Electricité
	Million	Mtep	tep	%	%	%	%	%	%
Résidentiel									
Chine	1328	325	0,25	14,5	6,5	4,7	4,6	59,5	10,1
Inde	1141	166	0,15	1,8	14	0,4	0	77,3	6,4
Union européenne	496	299	0,60	2,9	15,3	39,5	8,8	10,3	23,3
Etats-Unis	305	273	0,89	0	9,2	41,7	0,7	4,2	44,2
Tertiaire									
Chine	1328	69	0,052	7,9	34	6,1	9,5	0	42,5
Inde	1141	16	0,014	21,6	0	0	1	38,9	38,2
Union européenne	496	138	0,28	0,9	13,3	31,9	4,5	1,1	48,2
Etats-Unis	305	220	0,72	0,6	4,8	26,3	0,8	0,9	47,5
R & T									
Chine	1328	394	0,30	13,4	11,3	5	5,5	49,1	15,8
Inde	1141	182	0,16	3,5	12,8	0,4	0,1	74	9,2
Union européenne	496	437	0,88	2,3	14,7	37,1	7,4	7,4	31,2
Etats-Unis	305	493	1,62	0,3	7,8	37,6	0,8	2,8	50,7

Source : Enerdata.

6.1.2 Evolution des consommations finales par habitant des secteurs résidentiel et tertiaire

Le tableau 76 et le graphique 38 montrent l'évolution des consommations d'énergie finale par habitant.

Dans leur grande majorité et pour les quatre ensembles, les consommations finales d'énergie pour le résidentiel, le tertiaire et l'ensemble R&T sont étonnamment stables sur la période 1992-2008.

Pour le secteur résidentiel, cette consommation diminue légèrement aux Etats-Unis (-4 %), également, ce qui est beaucoup plus surprenant, en Chine, de 4 %.

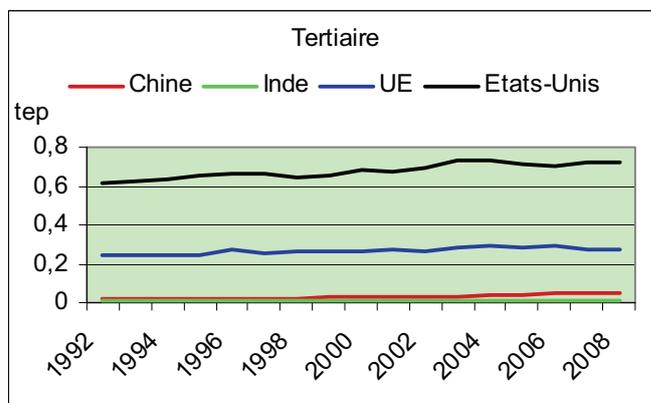
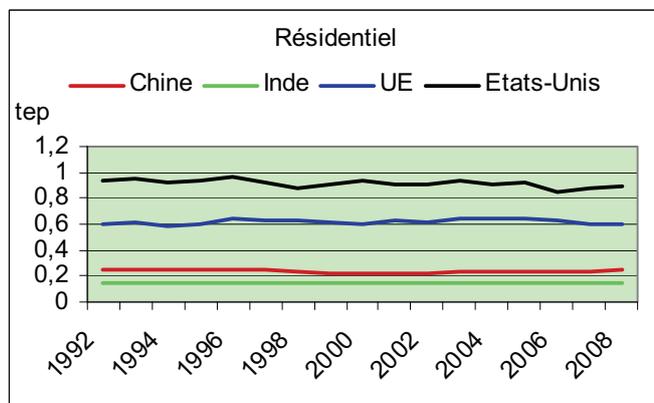
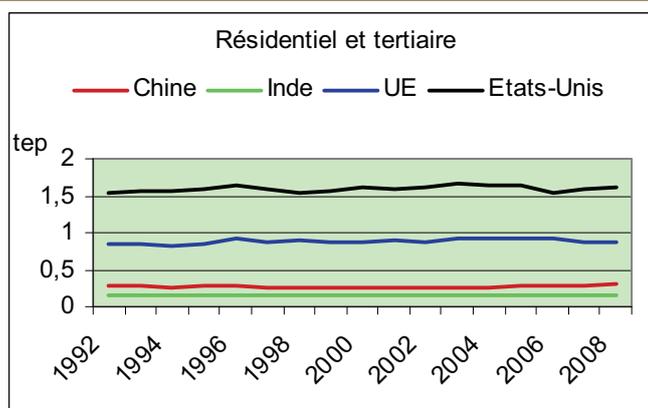
Pour le secteur tertiaire, l'augmentation est plus nette aux Etats-Unis (17 %) et dans l'Union européenne (12 %). Elle reste faible en Inde (17 %) au vu de son niveau de départ, mais est très rapide en Chine, avec un facteur de 3,5 entre 1992 et 2008, essentiellement depuis 2002, comme le montre le graphique 38.

Tableau 76. Evolution des consommations d'énergie finale par habitant du secteur résidentiel et tertiaire

	1992			2008			2008/1992		
	R tep	T tep	R & T tep	R tep	T tep	R & T tep	R	T	R & T
Chine	0,255	0,015	0,27	0,25	0,052	0,30	0,96	3,47	1,10
Inde	0,144	0,012	0,16	0,15	0,014	0,16	1,01	1,17	1,02
UE	0,594	0,248	0,84	0,60	0,28	0,88	1,02	1,12	1,05
Etats-Unis	0,932	0,618	1,55	0,89	0,72	1,62	0,96	1,17	1,04

Source : Enerdata.

Graphique 38. Evolution des consommations finales par habitant



Source : Enerdata.

6.1.3 Evolution de la part des produits énergétiques dans le secteur résidentiel

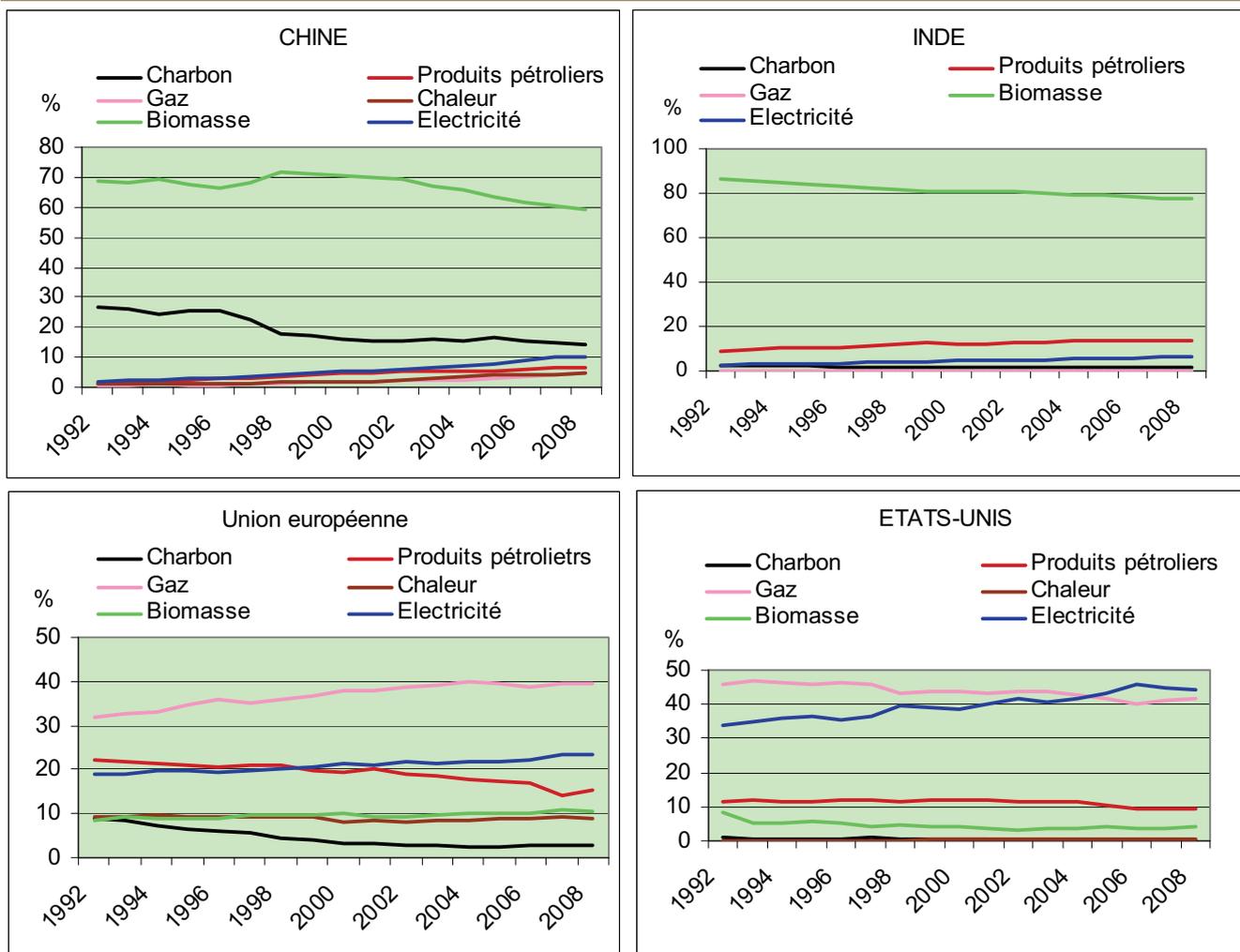
Si les consommations par habitant du résidentiel restent relativement constantes sur la période, cette évolution est accompagnée d'une modification importante de la structure par produit de cette consommation. Comme le montre le graphique 39, cela est particulièrement important pour la Chine et l'Inde où la biomasse, en 1992, représentait res-

pectivement 69 et 86 % de la consommation et, en 2008, 60 % pour la Chine et 77 % pour l'Inde.

En Chine, cette décroissance de la part de la biomasse s'accompagne également d'une baisse de la part du charbon.

Le remplacement de la biomasse et du charbon par le gaz et surtout l'électricité (et la chaleur en Chine), du fait notamment

Graphique 39. Evolution de la consommation par produit dans le secteur résidentiel



Source : Enerdata.

de l'accroissement relatif de la population urbaine, explique que l'amélioration du « service énergétique » (confort) sur la période puisse s'accompagner d'une baisse de la consommation finale d'énergie.

Les modifications de la structure par produit de la consommation d'énergie finale des secteurs résidentiel et tertiaire sont également importantes pour l'Union européenne et les Etats-Unis, avec une diminution de la consommation de produits pétroliers (et du charbon pour l'Union européenne) au profit du gaz et de l'électricité. Dans l'Union européenne, la part de l'électricité reste nettement inférieure à celle du gaz (25 % contre 40 % en 2008), tandis qu'aux Etats-Unis, la part de l'électricité dépasse celle du gaz en 2005 (respectivement 45 et 40 %).

Ces évolutions ont des conséquences importantes sur les consommations d'énergie primaire nécessaires pour assurer ces consommations finales, surtout du fait de la croissance des consommations finales d'électricité.

6.1.4 Une comparaison de la consommation d'énergies commerciales

Quel que soit le pays, et c'est encore plus vrai lorsque l'on parle de situations « mondiales », la valeur de la consommation d'énergie par habitant est intéressante à connaître pour évaluer les besoins énergétiques du pays et les comparer d'un pays à un autre, mais elle traduit très mal la réalité des consommations d'énergie des populations marquées par des inégalités considérables.

Tableau 77. Population totale et population urbaine

	Population Totale 2008 million	Part urbaine 2006*	Population urbaine million
Chine	1328	0,41	544
Inde	1141	0,28	319
UE-27	496	0,73	363
Etats-Unis	305	0,8	244

* Dernière année disponible.

Source : AIE.

Ces inégalités existent dans l'Union européenne et les Etats-Unis, entre les différents pays ou Etats et entre les différentes couches sociales (la précarité énergétique est une réalité croissante dans ces pays). Ces inégalités sont encore plus importantes dans les pays en développement et les pays émergents, où des populations entières, surtout en milieu rural, n'ont pas ou très peu accès aux formes modernes d'énergie (d'où la part considérable de la biomasse, utilisée de manière traditionnelle, dans la consommation d'énergie finale).

Seule une étude détaillée des situations particulières permet de traduire la réalité, mais il est intéressant, dans une première approximation, de calculer les consommations des énergies commerciales (produits pétroliers, gaz, charbon, chaleur, électricité) en les attribuant à la population urbaine de l'Inde et de la Chine (cf. tableau 77), et de les

comparer aux consommations moyennes par habitant de l'Union européenne et des Etats-Unis.

Le tableau 77 indique pour information la population urbaine de l'Union européenne et des Etats-Unis, mais nous avons conservé la population totale de ces deux ensembles pour notre comparaison, en considérant que l'écart entre population urbaine et rurale était beaucoup moins important dans ces deux pays qu'en Chine ou en Inde.

Pour le secteur résidentiel

Pour la Chine et l'Inde, assez curieusement, la consommation finale de la population urbaine et par habitant d'énergies commerciales est proche de la consommation moyenne (incluant la biomasse) de l'ensemble de la population.

Tableau 78. Une comparaison sur les énergies commerciales dans le secteur résidentiel

2008	CEF*par hab. Totale ** tep	CEF hors biomasse Mtep	Population*** Million	CEF par hab. urbain**** tep
Chine	0,25	131,5	544	0,24
Inde	0,15	37,7	319	0,12
UE-27	0,60			
Etats-Unis	0,89			

* CEF : consommation d'énergie finale

**Totale : consommation d'énergie finale totale divisée par le nombre total d'habitants

***Population urbaine

****Consommation finale d'énergie commerciale

Source : calculs des auteurs, données Enerdata et AIE.

Or, le service énergétique rendu en milieu urbain est certainement supérieur à celui du milieu rural, mais l'utilisation de la biomasse en milieu rural se fait de façon traditionnelle, avec de très mauvais rendements entre l'énergie finale (bois de feu, déchets) et le service énergétique (cuisson, chauffage...).

En comparant la Chine et l'Inde aux deux « pays riches », on trouve, pour la Chine, le même écart pour les énergies commerciales en milieu urbain que pour l'ensemble des énergies. Pour l'Inde, l'écart est encore plus important, la consommation finale moyenne par habitant des Etats-Unis étant équivalente à huit fois la consommation urbaine moyenne par habitant d'énergies commerciales en Inde.

Pour le secteur tertiaire

Pour le secteur tertiaire, beaucoup plus concentré dans les villes, la comparaison donne des résultats nettement différents.

Pour la Chine, comme pour l'Inde, la consommation d'énergies commerciales, ramenée à la population urbaine, est environ deux fois supérieure à la consommation moyenne toutes énergies, ramenée à la population totale. Cette consommation du secteur tertiaire reste très nettement inférieure à celle de l'Union européenne et des Etats-Unis, avec des facteurs 2 et 6 pour la Chine, 9 et 23 pour l'Inde.

Tableau 79. Une comparaison sur les énergies commerciales dans le secteur tertiaire

2008	CEF* /hab. Totale*	CEF hors biomasse tep	Population*** Mtep	CEF par hab Mtep
Chine	0,052	69	544	0,127
Inde	0,014	9,8	319	0,031
UE-27	0,278			
Etats-Unis	0,723			

* CEF : consommation d'énergie finale

*Totale : consommation d'énergie finale totale divisée par le nombre total d'habitants.

***Population urbaine

Source : calculs des auteurs, données Enerdata et AIE.

6.2 Les consommations d'électricité dans les secteurs résidentiel et tertiaire

6.2.1 Les consommations d'électricité en 2008

Le tableau 80 montre que la part de la consommation d'électricité dans les bâtiments (secteur résidentiel et tertiaire) varie très fortement selon l'ensemble considéré : 26 % en Chine, 76 % aux Etats-Unis, 34 % en Inde, 56 % et dans l'Union européenne. Hormis en Inde, où la consommation du résidentiel est le double de celle du tertiaire, les consommations de chaque secteur sont à peu près les mêmes.

6.2.2 Evolution de la consommation d'électricité par habitant des secteurs R & T

Le tableau 81 et le graphique 40 montrent l'évolution des consommations d'électricité par habitant dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

Tableau 80. Consommation d'électricité des secteurs résidentiel et tertiaire en 2008

2008	Population million	Tous secteurs		Résidentiel		Tertiaire		Résidentiel et Tertiaire			
		Conso. élec.		Consommation d'électricité		Consommation d'électricité		Consommation d'électricité			
		Par habitant	Totale	Par habitant	Part*	Par habitant	Part*	Totale	Par habitant	Part*	
		kWh	TWh	kWh	%	kWh	%	TWh	kWh	%	
Chine	1 328	2 128	383	288	13,5	339	255	12	722	544	25,6
Inde	1 141	510	124	109	21,4	71	62	12,2	195	171	33,5
Union européenne	496	5 741	810	1 633	28,4	773	1 558	27,1	1 583	3 192	55,6
Etats-Unis	305	12 511	1 402	4 597	36,7	1 506	4 938	39,5	2 908	9 534	76,2

* Part de la consommation d'électricité des secteurs résidentiel et tertiaire dans la consommation finale totale d'électricité (tous secteurs).

Source : Enerdata.

Tableau 81. Evolution de la consommation d'électricité de 1992 à 2008

CHINE	1992	2008	2008/1992	INDE	1992	2008	2008/1992
	kWh	kWh	Rapport		kWh	kWh	Rapport
Résidentiel	55	289	5,25	Résidentiel	45	109	2,42
Tertiaire	45	255	5,67	Tertiaire	25	62	2,48
R&T	100	544	5,44	R & T	70	171	2,44

UE	1992	2008	2008/1992	Etats-Unis	1992	2008	2008/1992
	kWh	kWh	Rapport		kWh	kWh	Rapport
Résidentiel	1322	1634	1,24	Résidentiel	3649	4592	1,26
Tertiaire	1017	1558	1,53	Tertiaire	3316	4932	1,49
R&T	2339	3192	1,36	R & T	6965	9524	1,37

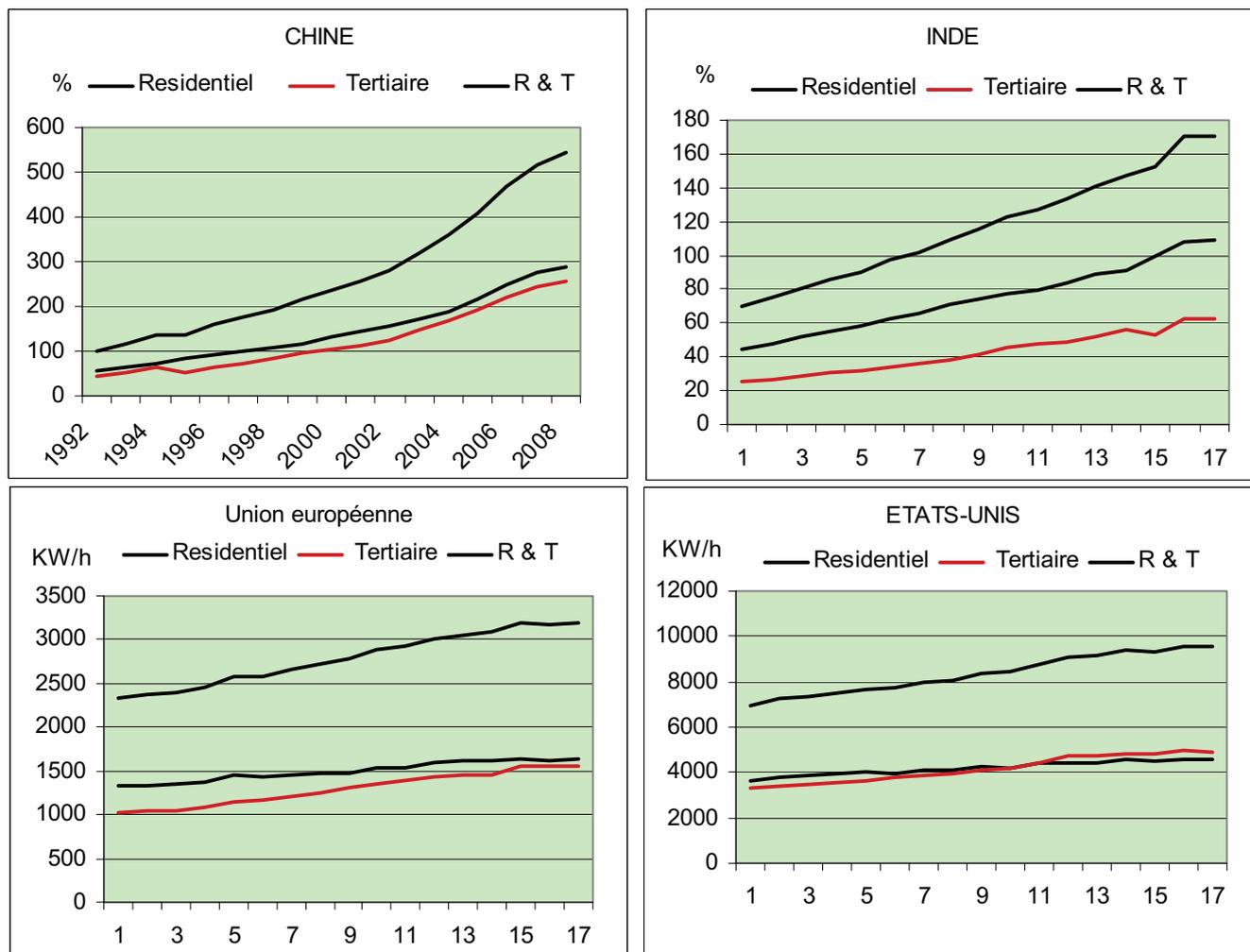
Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

Dans les quatre ensembles et pour les deux secteurs, ces consommations augmentent.

Dans l'Union européenne et aux Etats-Unis, de manière identique, la consommation sur la période augmente d'un quart dans le résidentiel et de la moitié dans le tertiaire. Ces augmentations sont régulières de 1992 à 2008, avec une amorce de stabilisation en fin de période.

Pour l'Inde, et surtout pour la Chine, les augmentations sont beaucoup plus fortes, assez semblables dans les deux secteurs, d'un facteur 5,5 environ en Chine contre 2,5 en Inde. Ces augmentations sont régulières en Inde sur la période, alors qu'en Chine, elles s'accroissent à partir de 2002. Dans les deux pays, un certain ralentissement, voire une stabilisation, très probablement de nature conjoncturelle, se manifeste.

Graphique 40. Evolution de la consommation d'électricité par habitant des secteurs R & T



Source : calculs des auteurs, données Enerdata et AIE.

6.3 L'enseignement de la pratique : un exemple en Chine

Du fait de la diversité des situations et des modes de vie, les données statistiques globales et les valeurs moyennes ne permettent pas à elles seules de comprendre la nature des problèmes et donc d'orienter l'action. Des analyses plus fines, basées sur des réalisations ou des projets concrets, sont des compléments indispensables.

Le bureau d'études Terao (« ingénieurs en démarche HQE, haute qualité environnementale »), dirigé par Michel Raoust, spécialiste de la thermique des bâtiments, en

collaboration avec Yazhong Liu (bureau d'études ICE), a réalisé durant ces dix dernières années des études et des projets en Chine, dans le cadre de programmes de coopération de l'Ademe, l'AFD et le Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM). Ces travaux ont porté sur l'efficacité énergétique dans la construction et l'équipement des bâtiments neufs, et sur la rénovation énergétique des bâtiments existants. Ils se sont déroulés dans les provinces du Nord de la Chine, Heilongjiang et Liaoning, à Pékin, dans la province du Hubei, à Wuhan et à Shanghai.

6.3.1 Une enquête sur la consommation d'électricité d'appartements à Shanghai

A titre d'exemple, nous présentons ici les résultats d'une enquête sur la consommation d'électricité dans des appartements de la ville de Shanghai, réalisée en 2004 dans le cadre de ces travaux. Ce cas nous intéresse ici particulièrement, toute la consommation d'énergie de ces appartements étant assurée par l'électricité : appareils électriques domestiques (électroménager, audiovisuel), chauffage, climatisation.

L'enquête a porté sur 115 appartements d'une surface moyenne de 81,25 m² (trois pièces en moyenne).

Le tableau 82 indique les consommations moyennes mensuelles d'électricité et leur répartition entre les trois types d'usage. La valeur de la ligne « Electrodomestique » est la même pour chaque mois. Elle est obtenue en faisant la moyenne des consommations des mois sans chauffage ni climatisation : mars, avril, mai, septembre, octobre et novembre. Les valeurs de la consommation d'électricité pour le chauffage (décembre, janvier, février) et la climatisation (juin, juillet, août) sont obtenues par différence entre la consommation totale et la consommation domestique.

La partie basse du tableau indique la part de chaque type de consommation et les consommations annuelles par m².

Tableau 82. Consommations mensuelles d'électricité d'un appartement à Shanghai

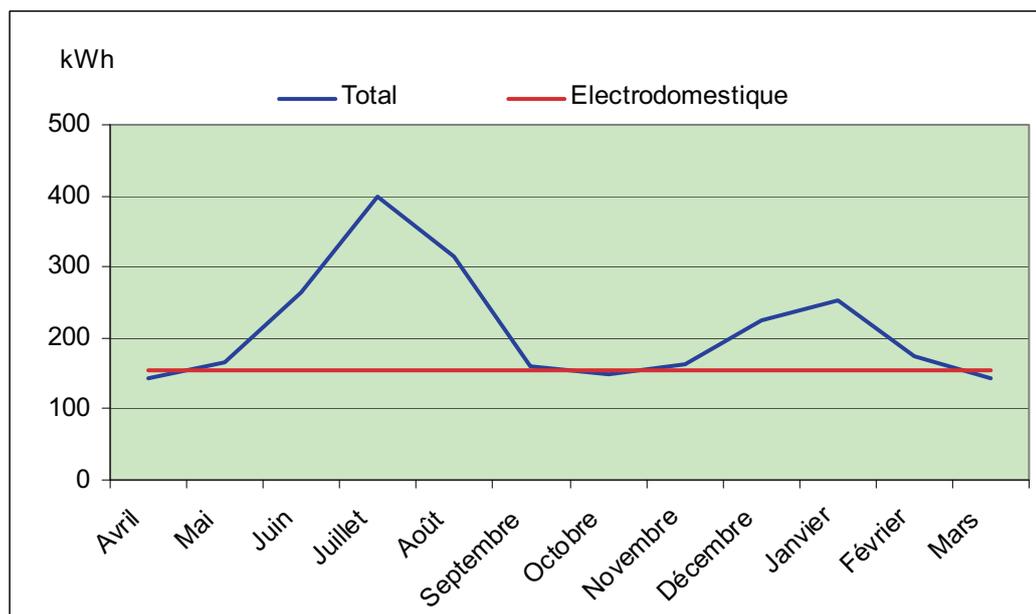
kWh	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Total	253,6	174,4	143,6	142,71	165,31	265,21
Electrodomestique	153,8	153,8	153,8	153,81	153,81	153,81
Chauffage	99,8	20,5	0			
Climatisation	0	0	0			111,4

kWh	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Total	397,65	314,28	159,06	148,79	163,42	225,93
Electrodomestique	153,81	153,81	153,81	153,81	153,81	153,81
Chauffage						72,12
Climatisation	243,84	160,47				

kWh	Total	Part en %	Par m ²
Total	2554	100	31,4
Electrodomestique	1846	72,3	22,7
Chauffage	193	7,6	2,4
Climatisation	516	20,2	6,3

Source : Terao.

Graphique 41. Consommation mensuelle d'électricité dans un appartement à Shanghai



Source : Terao.

Le graphique 41 met en évidence les deux pointes annuelles de consommation pour le chauffage en hiver et la climatisation en été.

6.3.2 Quelques enseignements

Le chauffage et la climatisation

Du fait du climat, la dépense d'électricité pour le chauffage est nettement inférieure à celle de la climatisation. Les experts estiment que pour un bâtiment non isolé, le calcul des consommations d'électricité pour le chauffage et la climatisation, sur la base de conditions d'usage européennes (des températures de confort de 19° l'hiver et de 26° l'été, en permanence) donnerait une consommation de 33 kWh/m² pour le chauffage et 46 kWh/m² pour la climatisation.

Les résultats de l'enquête donnent toutefois des valeurs très inférieures, en particulier pour le chauffage. L'électricité étant très chère en Chine (par rapport au pouvoir d'achat), les chinois sont extrêmement frugaux. Ils chauffent très peu dans le sud de la Chine (jusqu'à Shanghai) et climatisent

peu (une ou deux pièces, quelques heures/jour uniquement).

Cependant, avec l'amélioration du pouvoir d'achat, la tendance est à l'augmentation de la température de confort d'hiver et à l'achat de climatiseurs supplémentaires.

Si l'on réalise un programme de réhabilitation thermique d'un bâtiment, et si l'on prend la consommation actuelle comme référence, l'économie d'énergie (et d'argent sur la facture) peut apparaître faible. Mais, si l'on anticipe les augmentations prévisibles de la consommation, liées à la recherche d'un meilleur confort, il est essentiel de développer des programmes à grande échelle de réhabilitation thermique de bâtiments.

Le chauffage et la climatisation provoquent des pointes de consommations saisonnières et journalières qui engendrent des appels de puissance de plus en plus élevés.

Avec une contribution annuelle de seulement 20 %, la pointe mensuelle de la climatisation (juillet) représente déjà 2,6 fois la puissance appelée hors climatisation. La pointe

journalière (le jour le plus chaud) et la pointe horaire (l'heure la plus chaude) peuvent être nettement supérieures.

On se trouve alors confronté à la nécessité d'investissements de production de pointe et de réseaux de transport et distribution considérables pour de courtes périodes de fonctionnement, ce qui induit un coût du kWh très élevé.

Les équipements domestiques

Les équipements domestiques sont les appareils électroménagers, audiovisuels et informatiques et l'éclairage (on parle aussi de « consommation d'électricité spécifique »).

Le tableau 83 indique, pour la France et pour l'année 2007, la consommation des différents équipements concernés pour un logement type. Dans l'appartement moyen étudié, leur consommation, 1 846 kWh, représente 72 % de la consommation annuelle totale d'électricité dans l'appartement.

Sans préjuger de l'équipement type de l'appartement moyen de Shanghai, on voit que la consommation de celui-ci n'est pas très éloignée de celle de l'appartement en France (environ 60 %).

Il paraît donc très important qu'une politique de réduction des consommations d'électricité spécifique soit mise en

œuvre parallèlement à la politique de réhabilitation thermique des bâtiments existants.

Les économies d'électricité dans les secteurs résidentiel et tertiaire en Chine sont d'autant plus importantes que :

- comme nous l'avons vu, une économie de 1 kWh d'électricité finale représente une économie de 3,21 kWh en énergie primaire (essentiellement charbon).
- les consommations d'électricité, en particulier pour le chauffage et la climatisation, nécessitent des moyens de production de pointe très onéreux en investissement.

Tableau 83. Consommation d'électricité spécifique dans un appartement type en France*

Équipements ou usages	kWh par an
Réfrigérateur	390
Congélateur	430
Lave-vaisselle	275
Lave linge	170
Eclairage	370
Site informatique domestique	395
Télévision, périphériques, audio	545
Veilles	120
Divers	538
Total	3233

* Le poste de consommation d'électricité du système de chauffage et d'eau chaude n'apparaît pas car on suppose, pour la comparaison avec le cas de Shanghai, que le chauffage est assuré par l'électricité.

Source : Global Chance.

6.4 Une estimation prospective des enjeux de la consommation d'énergie dans les bâtiments

6.4.1 Combustibles et électricité dans la consommation d'énergie finale

Le tableau 84 et le graphique 42 montrent les parts respectives dans la consommation d'énergie finale des combustibles fossiles, de la biomasse et de la chaleur d'une part, et de l'électricité d'autre part, des quatre

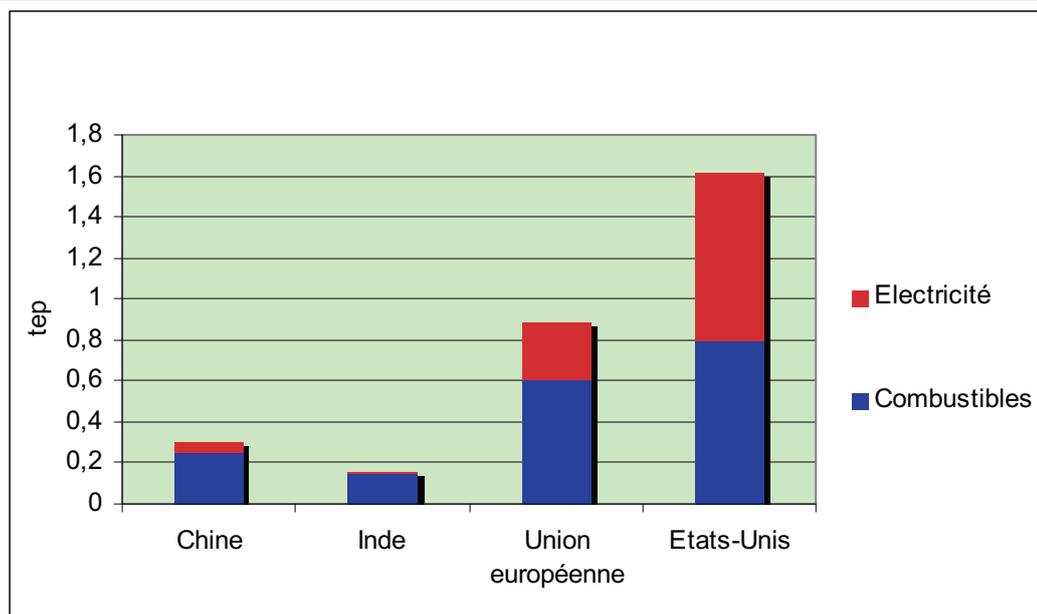
ensembles, sachant que la part « combustibles » est essentiellement consacrée aux usages thermiques dans les bâtiments (chauffage, eau chaude, cuisson) et la seconde aux usages spécifiques (éclairage, électroménager, audiovisuel, bureautique).

Tableau 84. Combustibles et électricité dans la consommation finale

2008 R & T	CEF	Total		Par habitant		
	Total Mtep	Combustibles Mtep	Electricité Mtep	Total tep	Combustibles tep	Electricité tep
Chine	394	332	62	0,30	0,25	0,047
Inde	182	165	17	0,16	0,15	0,015
UE	437	301	136	0,881	0,61	0,28
Etats-Unis	493	243	250	1,616	0,80	0,82

Source : Enerdata.

Graphique 42. Composantes de la consommation d'énergie finale par habitant dans les secteurs R & T



Source : calculs des auteurs, données Enerdata.

6.4.2 Comparaison entre l'Union européenne et les Etats-Unis

Sur la consommation d'énergie finale

Les consommations d'énergie finale par habitant dans les bâtiments (secteurs résidentiel et tertiaire) en 2007 sont respectivement de 1,62 tep pour les Etats-Unis et de 0,88 tep pour l'Union européenne. La différence est de 0,74 tep.

La consommation par habitant de combustibles fossiles et de chaleur, correspondant aux usages thermiques, est à peu près la même aux Etats-Unis et dans l'Union européenne. Par contre, la consommation d'électricité, correspondant aux usages spécifiques de celle-ci, est trois fois plus élevée aux Etats-Unis.

Une étude récente sur les indicateurs de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel⁴⁸ montre un écart encore plus grand : une consommation par habitant égale pour le chauffage, un peu plus importante aux Etats-Unis pour l'eau chaude et la cuisson, et beaucoup plus importante pour l'électricité spécifique. Pour le seul usage de l'éclairage, le rapport des consommations serait de l'ordre de 4.

Une telle différence sur les consommations d'électricité s'explique probablement en partie par des raisons techniques (efficacité relative des appareils et équipements) mais surtout par des modes de vie, des comportements et

⁴⁸ L'étude ODYSSEE pour l'Union européenne. Pour les Etats-Unis, les données sont tirées d'une communication privée.

des habitudes de confort différents : type d'urbanisme, nature et taille des logements, températures de confort, usage de la climatisation, taille et puissance des appareils ménagers, équipements audiovisuels, etc. Il semble que cela soit particulièrement vrai pour la climatisation.

Certaines de ces différences peuvent être considérées comme le résultat d'un « mieux vivre », mais beaucoup sont la conséquence du développement d'un mode de vie peu soucieux des ressources énergétiques et de la protection de l'environnement.

Sur la consommation d'énergie primaire induite

De telles différences sur la consommation d'énergie finale ont pour conséquence des différences encore plus importantes sur la consommation d'énergie primaire.

Nous avons calculé celle-ci en prenant un facteur 1,1 entre consommation primaire et finale pour la consommation de combustibles fossiles et de chaleur, et le facteur 2,9 pour la consommation d'électricité.

Dans ces conditions, le rapport entre la consommation d'énergie finale et la quantité d'énergie primaire nécessaire pour la satisfaire est de 0,48 pour les Etats-Unis, et de 0,60 pour l'Union européenne.

Les consommations correspondantes d'énergie primaire sont présentées dans le tableau 85 et le graphique 43.

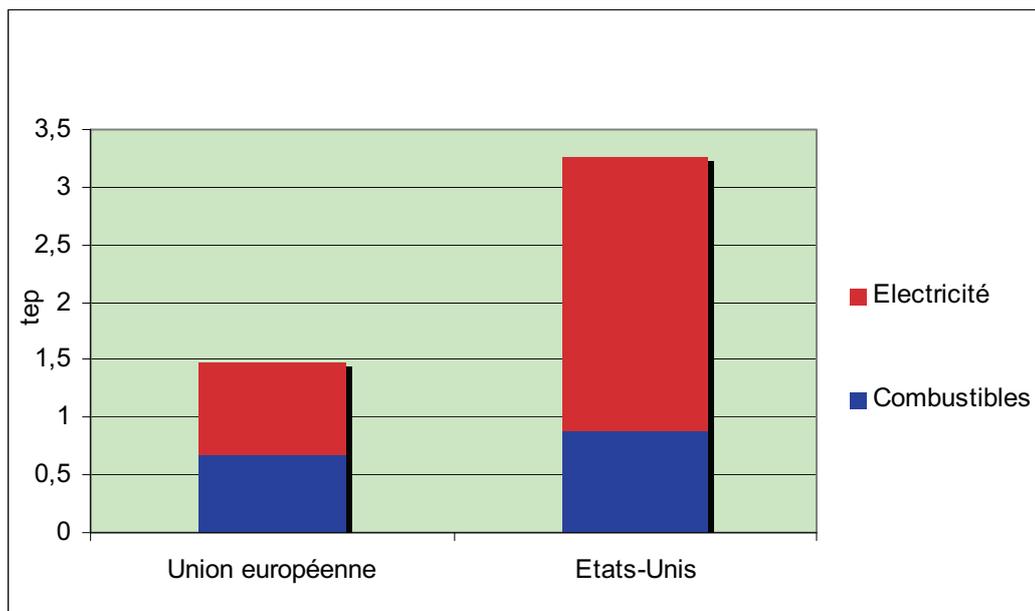
La quantité d'énergie primaire nécessaire pour assurer les consommations d'énergie finale par habitant dans les bâtiments (secteurs résidentiel et tertiaire) est de 3,26 tep pour les Etats-Unis et de 1,47 tep pour l'Union européenne. La différence est de 1,79 tep.

Tableau 85. L'énergie primaire par habitant nécessaire pour les secteurs R & T

	CEF par habitant			CEP/CEF		CEP par habitant			CEF/CEP
	Comb. tep	Elec. tep	Total tep	Comb. Rapport	Elec. Rapport	Comb. tep	Elec. tep	Total tep	Total Rapport
UE	0,61	0,28	0,88	1,1	2,9	0,67	0,80	1,47	0,60
Etats-Unis	0,80	0,82	1,62	1,1	2,9	0,88	2,38	3,26	0,50

Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

Graphique 43. Energie primaire par habitant pour les secteurs R & T



Source : calcul des auteurs, données Enerdata.

6.4.3 Une estimation des enjeux de l'efficacité énergétique dans les bâtiments en Chine et en Inde

La situation de la consommation énergétique dans les deux grands pays émergents, la Chine et l'Inde, est extrêmement contrastée entre des centres urbains ultra modernes « énergivores » - mais moins en général que ceux des pays riches - et des régions rurales, où l'approvisionnement énergétique est très faible et majoritairement assuré par des sources traditionnelles.

La croissance économique de ces pays conduira progressivement à une augmentation du confort et, d'une façon générale, des services énergétiques, pour une proportion de plus en plus élevée de la population, avec une urbanisation croissante. On devrait alors assister à une réduction de l'écart de consommation entre les milieux urbain et rural, une augmentation générale de la consommation d'énergie moyenne par habitant liée à l'accession d'un plus grand nombre d'habitants aux services énergétiques, à l'accroissement de la demande d'énergie associée à chaque service énergétique, et, parallèlement, à l'utilisation croissante de produits énergétiques modernes en remplacement des énergies traditionnelles - une part de plus en plus large étant attribuée aux énergies renouvelables.

Ce développement se produira en tenant compte évidemment du contexte géographique et climatique de chaque pays, des particularités du mode de vie des populations concernées mais aussi de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme et, de façon plus générale, de la politique du logement et de la construction et, facteur essentiel, de la prise en compte plus ou moins grande de l'efficacité énergétique, tant au niveau technique et économique qu'à celui des comportements.

Il est important pour les décideurs politiques de « se faire une idée » de l'ordre de grandeur des enjeux associés aux orientations de ces politiques et de ces comportements.

Pour réaliser une telle estimation, nous avons utilisé la comparaison présentée au chapitre précédent entre les consommations par habitant dans les bâtiments des secteurs résidentiel et tertiaire.

Nous imaginons pour cela deux scénarios de développement de la consommation d'énergie dans les secteurs résidentiel et tertiaire en Chine et en Inde.

Le premier scénario suppose une convergence de la consommation d'énergie par habitant dans ces secteurs vers la valeur actuelle de cette consommation aux Etats-Unis, soit 1,62 tep par habitant, avec la même répartition entre combustibles et électricité.

Le deuxième scénario suppose une convergence de la consommation d'énergie par habitant dans ces secteurs vers la valeur actuelle de cette consommation dans l'Union européenne, soit 0,88 tep par habitant, avec la même répartition entre combustibles et électricité.

De telles convergences se produiraient à une date indéterminée, mais dans une durée de trois à cinq décennies.

Convergence sur l'énergie finale

En supposant la stabilité de la population de chaque pays sur cette période, la consommation d'énergie finale dans les secteurs résidentiel et tertiaire, à l'horizon de la convergence, atteindrait :

- pour la Chine : 2,2 Mtep dans le premier scénario, et 1,2 Mtep dans le second scénario, soit une différence de 1 000 Mtep sur la consommation annuelle d'énergie finale pour l'ensemble R & T ;
- pour l'Inde : 1,9 Mtep dans le premier scénario, et 1 Mtep dans le second, soit une différence de 900 Mtep sur la consommation annuelle d'énergie finale pour l'ensemble R & T.

Si l'on adopte pour chaque scénario le même rapport, respectivement des Etats-Unis et de l'Union européenne, entre la consommation d'énergie finale et la quantité d'énergie primaire nécessaire pour la satisfaire, on obtient pour les quantités totales d'énergie primaire les valeurs suivantes :

- pour la Chine :
 - premier scénario (convergence « Etats-Unis ») : $2,2/0,50 = 4,4$ Mtep ;

- deuxième scénario (convergence « Union Européenne ») : $1,2/0,60 = 2$ Mtep.
- pour l'Inde :
 - premier scénario (convergence « Etats-Unis ») : $1,9/0,50 = 3,8$ Mtep ;
 - deuxième scénario (convergence « Union européenne ») : $1/0,60 = 1,7$ Mtep.

Convergence sur la consommation finale d'électricité

Supposons maintenant que la convergence se fasse sur la consommation d'électricité finale, toujours pour les secteurs résidentiel et tertiaire.

En supposant la stabilité de la population de chaque pays sur cette période, la consommation d'électricité finale dans ces secteurs, à l'horizon de la convergence, atteindrait :

- pour la Chine : 1,10 Gtep (milliard de tep) dans le premier scénario, et 0,37 Gtep dans le second scénario, soit une différence de 730 Mtep (ou 8 500 TWh) sur la consommation annuelle d'électricité finale pour l'ensemble R & T ;
- pour l'Inde : 0,94 Gtep dans le premier scénario et 0,32 Gtep dans le second, soit une différence de 620 Mtep (ou 7 200 TWh) sur la consommation annuelle d'électricité finale pour l'ensemble R & T.

Si l'on adopte pour chaque scénario le même rapport, respectivement des Etats-Unis et de l'Union européenne, entre la consommation d'électricité finale et la quantité d'énergie primaire nécessaire pour la satisfaire, on obtient pour les quantités totales d'énergie primaire les valeurs suivantes :

- pour la Chine :
 - premier scénario (convergence « Etats-Unis ») : $1,10/0,38^{49} = 2,90$ Gtep ;
 - deuxième scénario (convergence « Union européenne ») : $0,37/0,4 = 0,93$ Gtep.
- pour l'Inde :
 - premier scénario (convergence « Etats-Unis ») : $0,94/0,38 = 2,47$ Gtep ;
 - deuxième scénario (convergence « Union européenne ») : $0,32/0,4 = 0,80$ Gtep.

Pour chacun des pays, l'enjeu est considérable : 2,4 milliards de tep pour la Chine et 2,1 milliards de tep pour l'Inde en consommation annuelle d'énergie primaire, dont respectivement 1,97 milliard de tep pour la Chine et 1,67 milliard de tep pour l'Inde, du seul fait de la consommation finale d'électricité.

On peut faire remarquer, à juste titre, que les rendements de production de l'électricité devraient s'améliorer avec le temps, alors que ce calcul est basé sur des rendements actuels pour les systèmes de production de l'Union européenne et des Etats-Unis.

Cela est vrai si le développement des systèmes de production d'électricité évolue vers des centrales à gaz à cycle combiné, des cogénérations, de la production non thermique à partir des énergies renouvelables, des centrales à charbon à haut rendement. Par contre, le rendement du système électrique se dégraderait avec l'introduction de centrales nucléaires (du type actuel), dont le rendement est particulièrement bas.

Cet exercice d'estimation n'est ni une prévision ni même une prospective qui se voudrait réaliste ou même vraisemblable : il est certain que le développement de la Chine et de l'Inde se fera suivant des voies originales différentes des modèles et des modes de vie des Etats-Unis ou de l'Europe. Toutefois, les résultats obtenus donnent un ordre de grandeur raisonnable de ce qu'entraînerait comme conséquence sur la consommation d'énergie le choix ou la poursuite d'un modèle énergivore calqué sur celui des pays riches dits « développés », et tout particulièrement concernant les usages de l'électricité : on aboutit alors à des situations « impossibles ».

Cet exercice basé sur la notion de convergence doit être considéré comme un exercice d'avertissement en direction des décideurs politiques et économiques. Il fournit des arguments précieux, en faveur de la construction d'une civilisation sobre en consommation d'énergie.

⁴⁹ Voir tableau 18, section 3.3.2.

L'enseignement global qu'il confirme est que, non seulement les pays émergents et les pays en développement sont pratiquement contraints à un mode de développement énergétique beaucoup plus sobre que celui des pays industrialisés qui les ont précédés dans leur niveau de dévelop-

pement économique, mais aussi que ces pays industrialisés eux-mêmes qui ont gaspillé l'énergie pendant plus d'un demi-siècle, doivent considérablement réduire leur propre consommation en changeant eux aussi leur mode de développement.

6.5 Instruments et mesures pour économiser l'électricité dans les bâtiments : l'expérience européenne

Nous présentons dans ce paragraphe les différents instruments et mesures mis en œuvre dans différents pays, essentiellement européens, pour promouvoir les économies d'électricité dans les bâtiments. Nous mettons ici l'accent sur les appareils et équipements dédiés aux usages dits « spécifiques » de l'électricité, des usages dont les consommations unitaires sont relativement faibles, mais qui concernent des millions de produits installés dans les logements, les bureaux, les commerces, etc. On se trouve donc face à un nombre important de produits différents et de très nombreux acteurs (fabricants, fournisseurs, consommateurs, administrations centrales et territoriales, etc.). La promotion de l'efficacité énergétique auprès de cibles aussi diverses et aussi nombreuses n'est pas facile, mais les potentiels globaux d'économies d'électricité sont considérables et, de plus, chaque consommateur et la collectivité (de toute nature) à laquelle il appartient ont un rôle essentiel à jouer et peuvent obtenir des résultats tangibles.

6.5.1 Les mesures réglementaires sur la performance des produits

Les mesures réglementaires sur la performance des produits et leur affichage existent dans la plupart des pays et servent souvent de base à d'autres actions (par exemple, un pro-

gramme de prime à l'achat sera élaboré pour des produits bien classés sur une étiquette obligatoire). Ces réglementations reposent sur des déclarations des fabricants de la consommation énergétique de leurs produits, et ne peuvent donc s'appliquer correctement que si tout le monde mesure cette consommation suivant les mêmes standards et si un système de surveillance des marchés est mis en place, incluant des tests indépendants et des sanctions – y compris la publication des résultats, les consommateurs et les marques étant sensibles à la publicité négative.

Seuils minimum de performance énergétique

L'Europe, les Etats-Unis, la Chine et beaucoup d'autres pays ont mis en place des normes portant sur des seuils minimum de performance énergétique afin de se débarrasser des appareils les plus mal conçus : en dessous d'un certain seuil, les produits ne sont pas autorisés à la vente. Pour l'Europe, après une expérience très positive sur les réfrigérateurs, en 1999, la *Directive Ecodesign* introduira de nombreux seuils dans les prochaines années (des veilles qui limitées à 1 watt pour tous les types d'appareils, le gros électroménager, etc.). Les négociations entre fabricants et gouvernements portent sur les niveaux de seuils minimum (plus ou moins élevés) et le rythme de leur mise en œuvre.

Encadré 5. En Californie

La Californie a récemment adopté un seuil minimum de performance énergétique pour les téléviseurs : la Commission de l'Énergie californienne estime que les technologies très performantes sont déjà disponibles sur le marché, mais c'est à partir de 2011 seulement que les écrans de moins de 147 cm devront consommer un tiers de moins qu'actuellement, et près de moitié moins en 2013. L'économie sur la facture attendue dépasserait 8 milliards de dollars.

Les seuils minimum de performance énergétique sont généralement perçus comme des instruments efficaces (bien que ciblant des millions d'utilisateurs potentiels, on réduit le nombre d'interlocuteurs en s'adressant aux fabricants et non aux consommateurs (qui n'ont plus le choix de mal s'équiper). Ces seuils sont également perçus comme des instruments peu onéreux pour la collectivité et les industriels, dès lors qu'ils sont fixés au niveau du « coût le plus faible sur le cycle de vie ». Ils peuvent également être utilisés de manière dynamique

afin de stimuler l'innovation, lorsqu'un calendrier prévoit que les seuils seront relevés périodiquement.

Ces seuils minimum sont en général développés de manière coordonnée, avec les étiquettes énergie qui permettent aux consommateurs de comparer facilement les performances énergétiques : des étiquettes informatives s'appliquent obligatoirement à tous les produits et classent ceux qui sont comparables entre eux (même service, même volume, etc.) de A à G, de 1 à 5, selon un système d'étoiles...

Encadré 6. *Top Runner* au Japon

Le programme *Top Runner* au Japon est un système réglementaire qui a pour objectif de stimuler l'amélioration continue de l'efficacité énergétique des appareils et équipements utilisés dans les logements, les bureaux et les transports. Depuis 1998, ce programme est intégré dans la loi sur l'utilisation rationnelle de l'énergie. Il est géré par l'Agence pour les ressources naturelles et l'énergie, qui joue le rôle de « régulateur », sous la tutelle du *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI).

La réglementation *Top Runner* s'applique aux fabricants et aux importateurs des appareils ou équipements concernés. Elle fixe des normes de performance (ou standards) de consommation d'énergie pour une série d'appareils et les revise régulièrement de façon à assurer une amélioration permanente. Une fois que le standard a été promulgué, il devient obligatoire pour les fabricants et les importateurs pour une année postérieure également fixée. Lorsque cette année est atteinte, il y a vérification et, éventuellement, un nouveau standard (plus sévère) est adopté et une nouvelle année objectif fixée.

La liste comprend une vingtaine d'équipements choisis suivant trois critères : produits de grande diffusion, à consommation d'énergie significative et ayant un fort potentiel d'économie d'énergie. Ces équipements se répartissent en six grandes catégories : véhicules automobiles ; éclairage ; équipement de bureau ; équipement audiovisuel ; appareils de chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, cuisson ; appareils de froid.

La réussite de *Top Runner* est basée sur la qualité du partenariat entre l'industrie et le « régulateur » gouvernemental (c'est une tradition japonaise). Dans la pratique, le standard ne devient obligatoire que si un pourcentage de la production totale (fixé à l'avance par le gouvernement) n'atteint pas le standard.

La réticence pourrait venir des fabricants étrangers (considérant cette réglementation comme une entrave à l'importation). Il n'y a pas eu jusqu'ici de plaintes (connues). Il est cependant indéniable que *Top Runner* interdit de fait l'importation d'appareils peu efficaces (ou considérés comme efficaces ailleurs, mais pas au Japon).

Référence : *Evaluation of Japan's Top Runner Programme*, Joakim Nordvisk, AID-EE, juillet 2006.

Étiquette énergie

Les étiquettes énergie existent également dans presque tous les pays, et sont des instruments en général bien évalués (ils ont un impact sur le marché et contribuent, petit à

petit, à sensibiliser les consommateurs aux questions énergétiques plus larges) pourvu que leur conception soit très soignée dans les détails techniques (marges de tolérance lors des mesures de consommation, bonne définition des écarts entre les classes énergétiques).

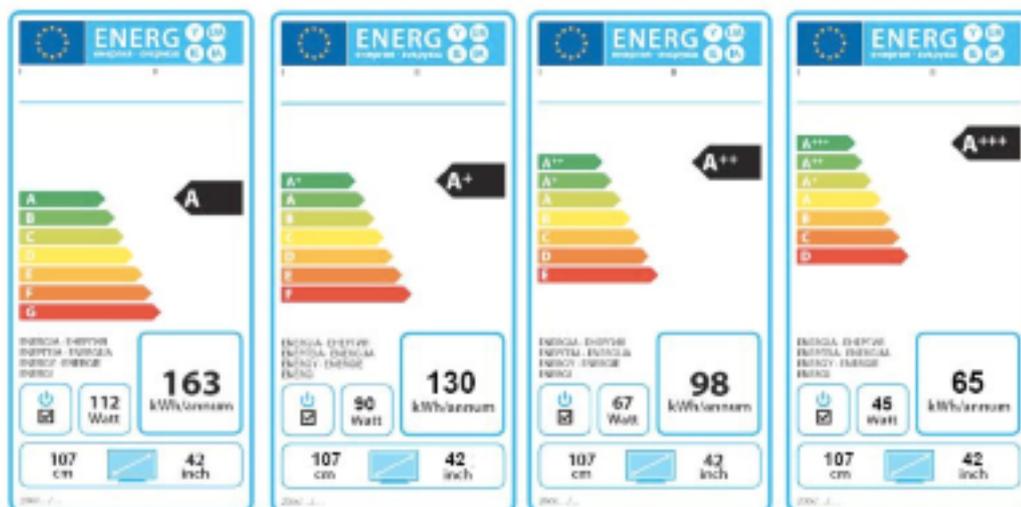
Encadré 7. La révision de l'étiquette énergie en Europe, ou comment rater un rendez-vous important...

En Europe, l'étiquette énergie va changer, malgré qu'elle soit bien connue des consommateurs des 27 Etats membres, et évaluée très positivement.

Après deux années de négociations et de nombreuses réunions, la décision a été prise d'ajouter des classes énergie au dessus de A pour tous les appareils qui en auront besoin : A+, A++, A+++.

Il aurait été plus judicieux de redistribuer les modèles sur une échelle de A à G, dont les seuils auraient été révisés régulièrement, de façon à ce que la classe A reste la référence (unique et simple) pour les consommateurs et qu'il y ait une réelle différence entre les classes. Avec la nouvelle étiquette, les réfrigérateurs les plus économes seront classés A+++ , mais les plus énergivores seront tout de même classés A (puisque les seuils de classement ont été établis il y a 15 ans et que les produits en dessous de la classe A sont déjà très rares sur le marché). Cela n'aidera certainement pas les consommateurs à mieux choisir : la lettre A est toujours positive : pourquoi dépenser 200 ou 300 euros supplémentaires pour quelques "+" ? Si les consommateurs ne demandent pas ces produits performants, les industriels ne seront pas incités à les produire : c'est une dynamique d'innovation et d'amélioration des produits qui est à risque.

Nouvelle étiquette énergie européenne pour les téléviseurs



Modulation des tarifs de l'électricité

Contrairement aux Etats-Unis, où la réglementation impose aux fournisseurs d'électricité la mise en œuvre de programmes d'économie d'électricité, en Europe, le marché de l'énergie est largement libéralisé, et il est difficile d'encadrer

les tarifs de l'électricité pour les consommateurs. Difficile mais non impossible, comme le montre le cas italien, où trois éléments des tarifs de l'électricité permettent d'expliquer (entre autres causes) la relativement basse consommation des ménages. L'Italie a en effet l'une des consommations d'électricité dans le secteur résidentiel les plus

basses d'Europe : pour l'année 2007, 1 150 kWh pour tous les usages électriques, y compris le chauffage, contre 2 380 kWh pour la France ⁵⁰.

En Italie, la structure du tarif encore réglementé de l'électricité, qui couvre 90 % des consommateurs domestiques, intègre trois éléments qui contribuent à envoyer un signal prix cohérent :

- a) l'abonnement est nettement plus cher pour les clients souhaitant disposer de plus de 3 € HT pour 3 kW, 130 € HT pour 6 kW ou 215 € HT pour 12 kW).
- b) le tarif est progressif : plus on consomme, plus le prix du kWh est élevé – ce qui permet d'envoyer un signal fort sur le coût marginal relativement élevé du kWh au-dessus d'un certain niveau de consommation. Par exemple, pour le dernier trimestre 2009⁵¹ :

Tableau 86. Le tarif de l'électricité en Italie

Consommation annuelle	€/kWh	€/kWh
	puissance jusqu'à 3 kW	puissance de plus de 3 kW
De 0 à 1 800 kWh	0,112	0,144
De 1 801 à 2 640 kWh	0,161	0,163
De 2 641 à 4 440 kWh	0,225	0,212
A partir de 4 441 kWh	0,295	0,274

Source : Autorité de régulation de l'énergie électrique et du gaz, Italie.

- c) l'autorité de régulation peut introduire sur la partie distribution du tarif un « delta » permettant de déconnecter les profits des volumes vendus.

Bien qu'il n'y ait pas de retour sur ce dernier mécanisme, il semble particulièrement intéressant à un moment où même l'AIE conseille cette approche. Les fournisseurs d'énergie ne font de la MDE que lorsqu'ils y sont obligés ou qu'elle ne nuit pas à leur activité. Les développements actuels de systèmes de compteurs électriques intelligents "Smart Metering" risquent de ne pas déboucher sur grand-chose tant que les revenus resteront strictement liés aux volumes vendus.

Les taxes sur l'électricité sont un élément du prix pour le consommateur. Dans certains pays, au delà de la contribu-

tion au budget de l'Etat, ces taxes sont explicitement utilisées pour encourager les consommateurs à adopter des mesures d'économie d'énergie et / ou, lorsque les taxes sont affectées, à financer des programmes spécifiques.

Les Pays-Bas ont ainsi introduit en 1996 une taxe sur l'électricité et le gaz pour les ménages et les petites entreprises. Cette taxe avait pour but de contrebalancer les émissions de CO₂ et de sensibiliser les consommateurs en augmentant la rentabilité des appareils électroménagers économes (qui bénéficiaient au même moment d'une prime à l'achat). En 1996, la taxe était de 2 centimes d'euros par kWh, en 2002 elle était autour de 14 centimes, et aujourd'hui, après des changements de politique gouvernementale, elle est redescendue à 4 centimes d'euros.

Obligation d'économie d'énergie ou de CO₂ pour les fournisseurs d'énergie

Des obligations en termes d'économie d'énergie ou de réduction d'émissions de CO₂ peuvent être imposées aux fournisseurs d'énergie qui doivent alors mettre en œuvre des projets et rapporter les résultats aux autorités publiques. C'est le cas en France, en Italie et au Royaume-Uni (ainsi qu'en Suisse pour certains fournisseurs municipaux). Dans la pratique, il existe des différences :

- l'obligation peut porter sur différents type de fournisseurs : générateurs, distributeurs, vendeurs, fournissant différents types d'énergie, et comptant plus ou moins de clients ;
- l'obligation peut couvrir différents secteurs économiques : uniquement le secteur résidentiel, tous les secteurs de l'économie, pour des technologies préalablement identifiées, ou pour toutes les technologies proposées par les obligés ;
- les méthodes d'évaluation des économies peuvent être basées sur des formules standardisées, des calculs, des mesures *ex ante* et *ex post* ;

⁵⁰ Source : Enerdata.

⁵¹ Autorité de régulation de l'énergie électrique et du gaz <http://www.autorita.energia.it/it/dati/condec0904.htm>

- le coût des mesures peut être récupéré directement sur les tarifs de l'électricité, *via* une taxe prélevée au niveau central. Ces mesures peuvent aussi être financées par un marché sur lequel on échange la valeur des économies, ou par les pénalités pour non respect de l'obligation.

On observe aujourd'hui, dans les pays appliquant ces obligations, que le mécanisme a peu servi à financer des économies d'électricité spécifique dans le secteur résidentiel en dehors d'opérations sur les ampoules basse consommation (de 1 à 5 % des économies réalisées selon les pays). En effet :

- les mesures les plus rentables (isolation des logements) ont d'abord été mises en œuvre ;
- les obligés se tournent de préférence vers les industriels que vers les particuliers, plus difficiles à mobiliser ;
- les obligés peuvent choisir d'économiser d'autres énergies que l'électricité (en France, cet état de fait évoluerait si les supermarchés étaient intégrés dans le dispositif : en vendant de l'essence, ils pourraient être considérés comme des distributeurs d'énergie ; vendant aussi des appareils électriques, ils pourraient lier ces deux activités pour remplir leurs obligations).

6.5.2 Les incitations et mécanismes financiers

Incitations financières directes : subventions ou mesures fiscales

Bien que rentables lorsqu'on regarde le coût à l'usage sur la durée de vie, les produits performants sont souvent plus chers à l'achat, parfois parce qu'effectivement les technologies employées à la fabrication sont plus coûteuses, mais souvent aussi parce que, dans l'optique marketing, les produits performants doivent bénéficier des caractéristiques des produits haut de gamme. Il arrive que le « sur investissement » soit trop élevé pour que le consommateur rentabilise l'achat sur la durée de vie, malgré l'argument environnemental valable d'économie d'énergie consommée.

Dans ce contexte, qui complique les analyses économiques, les autorités publiques peuvent chercher à réduire le prix d'achat des modèles performants en proposant des incitations financières, sous la forme de primes à l'achat ou de crédit d'impôt, pour guider les choix des consommateurs.

Encadré 8. Primes à l'achat pour l'électroménager

De même que les Pays-Bas l'avaient fait dans les années 2000, l'Italie a mis en place un grand programme de prime à l'achat pour les réfrigérateurs et congélateurs de classe A+ et A++ entre 2007 et 2009. Ce programme est assez lourd financièrement (50 millions d'euros pour la seule année 2007), chaque prime pouvant représenter jusqu'à 20 % du prix de l'appareil, avec un maximum de 200 euros. S'il est encore trop tôt pour une réelle évaluation économique, d'autant que la prime peut être une réduction d'impôt à déclarer en fin d'année, l'impact sur le marché est bien visible : pour la classe A+, la part de marché est passée de 14 % en 2007 à 46 % fin 2008, augmentation unique en Europe. En revanche, la classe A++ n'a guère évolué et reste sous les 5 %, ce qui montre que ces programmes ne sont pas toujours faciles à calibrer (quel montant définir pour la prime de façon à ne pas inciter à l'achat de grands appareils, faut-il établir des primes différenciées selon les niveaux de performance, etc.).

Au Danemark, les programmes de primes à l'achat sont plus courts (4 à 6 semaines) et sont destinés à attirer l'attention du public sur de nouvelles technologies plus économes. Ils ont néanmoins connu quelques revers, notamment du fait d'un lancement prématuré, d'un grand différentiel de prix, ou d'un impact moindre sur le marché en dehors de cette courte période.

En Suisse, des programmes modestes sont souvent mis en œuvre par des fournisseurs municipaux d'électricité. On estime cependant que ces programmes contribuent à faire évoluer les marchés, comme par exemple celui des sèche-linge à pompe à chaleur de classe A. Suite à un programme du fournisseur d'électricité EWZ et à l'engagement de la ville de Zurich, la part de marché national de ces appareils très

performants est passée de moins de 2 % à près de 16 %. L'organisation pratique des ventes a également contribué à ce succès : les consommateurs souhaitant bénéficier de la prime devaient se rendre au local d'exposition du fournisseur EWZ pour la recevoir en argent liquide et découvrir ainsi toute la gamme de produits performants exposée.

Dans de plus rares cas, ces incitations financières peuvent cibler les fabricants pour les encourager à augmenter la proportion de produits performants dans leur production. C'est le cas aux Etats-Unis où il existe un crédit d'impôt pour les fabricants, plus ou moins important, selon la performance des produits. D'autres mesures d'incitations financières existent :

- des mesures qui servent à encourager la R&D. L'Ademe a ainsi participé à des programmes de recherche visant à développer les futurs appareils électroménagers ;
- d'autres, pour réduire le prix des équipements performants, rarement appliquées, comme, par exemple, le système du bonus / malus (en vigueur en France pour les véhicules), la modulation de la TVA (pour les pays européens, il faudrait que les autorités communautaires en acceptent le principe), ou le prêt à taux zéro (appliqué en France pour les travaux d'isolation des logements).

Recours au tiers-financement via une ESCO

Les économies d'électricité dans les grands bâtiments du secteur public (bâtiments administratifs, de santé,

d'enseignement, complexes sportifs, etc.) et du secteur privé (centres commerciaux, immeubles de bureaux, hôtels, etc.) peuvent être réalisées en ayant recours à l'intervention d'une société de services dans le secteur énergétique (*Energy Service Company* -ESCO). L'ESCO prend en charge l'investissement et la réalisation des travaux, avec une garantie de résultats, et se fait rémunérer par le client sur la base des économies d'énergie réalisées. L'opération peut porter uniquement sur certaines installations (le système électrique, par exemple), mais plus généralement, elle s'inscrit dans une rénovation énergétique globale du bâtiment concerné (ou d'un groupe de bâtiments).

L'Allemagne et l'Autriche sont les pays les plus avancés dans ce domaine. Le programme le plus connu est celui du « Partenariat pour les économies d'énergie », mis en œuvre par l'Agence de l'énergie du Land de Berlin. En 2005 plus de cinq cents bâtiments avaient bénéficié de ce programme, et les économies annuelles étaient estimées à environ 10 millions d'euros.

Encadré 9. Un exemple d'ESCO - Le Contrat de performance énergétique de Schneider Electric

Une activité d'ESCO

Depuis 1993, *Schneider Electric* a développé à l'échelle internationale une activité de services dans le secteur énergétique, l'ESCO, « *Energy Service Company* », pour la rénovation énergétique de grands bâtiments, des installations tertiaires et industrielles, publiques ou privées, selon le principe du Contrat de performance énergétique (CPE). Depuis 1993, plusieurs milliers de projets ont été réalisés dans le monde.

Le principe du Contrat de performance énergétique

Le CPE, contrat passé entre le client (pour la rénovation énergétique de bâtiments) et l'ESCO, est constitué de trois composantes :

- l'ESCO prend la responsabilité des investissements : études, travaux et services sur les différents éléments de la rénovation (chauffage, ventilation, climatisation, isolation et ouvrants, énergies renouvelables, éclairage, formation et sensibilisation) ;

- il garantit les économies d'énergie prévues dans le contrat (électricité, gaz, fioul, eau chaude et vapeur, eau glacée, eau potable) ;
- le suivi des performances (gestion et télé suivi) permet la vérification des résultats, avec un remboursement des écarts si les objectifs ne sont pas atteints (dans le modèle de contrat de référence, une pénalisation à 100 % de la sous-performance, un partage 50/50 de la surperformance).

Le financement

Bien que dotée d'un capital important, l'ESCO est amenée à emprunter pour couvrir le coût de l'investissement à sa charge.

Le client paye l'ESCO suivant un calendrier fixé par le contrat. L'opération est financée en tout ou partie par les économies réalisées. En règle générale, *Schneider Electric* réalise des opérations dont le temps de retour sur investissement est de 2 à 7 ans dans le secteur privé et jusqu'à 20 ans dans le secteur public.

La question du financement est essentielle. Le programme de travaux peut être en effet dimensionné de manière que les économies réalisées puissent assurer la totalité des coûts, mais il peut arriver qu'une partie seulement du potentiel d'économies soit réalisée. Il peut alors être intéressant pour le client de faire effectuer une rénovation plus importante, en assurant lui-même, ou par d'autres ressources financières (aides publiques par exemple), le financement de la partie non couverte par les économies réalisées. Le temps de retour sur investissement sera plus important, mais le client peut y trouver un avantage (par exemple, dans le cas, probable, d'une augmentation des prix des énergies, ou par une meilleure valorisation de son patrimoine, ou pour éviter d'avoir à réaliser par la suite les travaux supplémentaires).

Le processus du CPE

Le CPE se déroule en deux phases :

- a) la phase d'analyse : lettre d'accord, puis préétude réalisée par l'ESCO, contrat de coopération, audit détaillé réalisé par l'ESCO, signature du contrat ;
- b) la phase de déploiement : mise en œuvre, réception, garantie de résultats.

Quelques réalisations

- Agence Schneider Electric de Bordeaux : 43 % d'économies d'énergie, retour sur investissement de 3,5 ans.
- Thermal Ceramics : 25 % d'économies d'énergie, retour sur investissement de 2 ans (installation de variateurs de vitesse).
- Carrefour : 18 % d'économie (temps de retour moins de 3 ans) sur la facture d'électricité et de gaz de 20 hypermarchés.

Contact : www.schneider-electric.com

6.5.3 Les programmes volontaires

Les programmes volontaires, labels, campagnes d'information, sessions de formation, sont également utilisés pour promouvoir les équipements les plus économes auprès des consommateurs, afin de créer des synergies avec les mesures réglementaires et les incitations financières. Ces instruments, qualifiés de mesures « *soft* », sont le plus souvent proposés par les gouvernements aux acteurs du marché qui décident d'y adhérer volontairement. Ils peuvent également être proposés et organisés par les fabricants et les distributeurs, qui ont tout de même besoin de la caution institutionnelle des autorités. De façon croissante, les programmes volontaires sont organisés au niveau des territoires (régions, communes, agglomérations) ou dans des cadres associatifs.

Labels

Les labels sur les produits

Les labels permettent de repérer les produits les plus économes du marché. Un simple logo permet de s'assurer que le produit répond à un cahier des charges précis, sans besoin de communiquer le détail des informations aux consommateurs.

L'Europe a, par exemple, développé l'Ecolabel (cahier des charges environnemental) et adopté le label *Energy Star* en provenance des Etats-Unis. Le Royaume-Uni dispose de son label "*Energy Saving Recommended*", et le Danemark, son label "*Elsparfonden*" (pour les produits performants et les distributeurs particulièrement engagés).

Ces labels sont efficaces, lorsqu'ils sont assez connus des consommateurs, pour que les fabricants veuillent y participer au point de faire évoluer leur production.

- L'autorité en charge doit être totalement crédible (pratiquer des tests, communiquer sur les résultats) et n'avoir aucun intérêt commercial.
- Le label ne doit pas venir en contradiction avec les outils existants (comme par exemple une étiquette énergie informative qui remplirait bien son rôle).
- Le cahier des charges pour obtenir le label doit être particulièrement exigeant, et le rester même lorsque le marché évolue (en durcissant ses critères, ce qui n'est pas toujours facile lorsqu'un autocollant avec un logo est apposé sur un produit).
- D'importants moyens de communication sont nécessaires pour faire connaître le label par les consommateurs. Par exemple, l'Ecolabel européen est très peu demandé pour les produits consommant de l'énergie car le cahier des charges est très exigeant, mais peu de consommateurs européens connaissent le label, ce qui n'incite pas les fabricants à s'engager dans la démarche.

Les labels sur les bâtiments

Lorsque les labels sur les bâtiments prennent en compte l'ensemble des consommations d'énergies dans le bâtiment (y compris toutes les consommations d'électricité), ils peuvent avoir une influence notable pour les économies d'électricité, d'autant que celle-ci est en général comptabilisée en énergie primaire.

Encadré 10. La campagne DISPLAY - Etiquette énergie pour les bâtiments

La campagne DISPLAY

La campagne européenne DISPLAY est une initiative volontaire conçue par des experts en énergie des villes européennes. En octobre 2001, l'association européenne Energie-Cités suggérait que « *sans attendre la directive, les municipalités commencent à afficher dès à présent les performances énergétiques de leurs bâtiments qui accueillent du public* ». Un mois plus tard, Energie-Cités présentait la première proposition du projet DISPLAY. Débutée en 2003, la campagne était initialement destinée à encourager les autorités locales à afficher publiquement les performances énergétiques et environnementales de leurs bâtiments publics, en utilisant le modèle de l'étiquette des appareils électroménagers. Depuis 2008, les entreprises privées sont également encouragées à utiliser DISPLAY pour leurs activités liées au thème de la responsabilité sociale des entreprises (RSE).

La phase pilote de 30 mois a débuté en janvier 2003, tandis que la campagne publique DISPLAY a été lancée en avril 2004. Depuis 2005, la campagne est cofinancée par la Commission européenne au titre du programme « Énergie intelligente - Europe ».

Depuis le début de la campagne en 2004, le nombre de bâtiments inscrits est passé de 1 500 par an à près de 2 500 pour atteindre un total de 11 553, mi décembre 2009. Le nombre de collectivités locales ou régionales et entreprises privées utilisant DISPLAY est d'environ 400. Les bâtiments d'enseignement général continuent à représenter le gros des effectifs. La France, le Royaume-Uni et la Suisse sont les pays les plus actifs (250 membres et 8 000 bâtiments).

Pour les collectivités locales, la campagne DISPLAY fournit des outils pratiques de communication et d'animation (et de comparaison) : le poster DISPLAY (ou étiquette énergétique pour les bâtiments), un outil de calcul des consommations d'énergie, des campagnes de communication locales visant à changer les comportements.

DISPLAY apparaît de plus en plus comme un outil de communication complémentaire, la plupart des Etats membres possédant aujourd'hui un certificat national pour leurs bâtiments publics. En mettant l'accent sur les campagnes de communication locale et en proposant une grande variété d'outils de communication, DISPLAY va au-delà des exigences de la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB).

Le poster DISPLAY

L'étiquette énergétique, ou « poster DISPLAY », est semblable dans son principe à celles qui existent pour les appareils électroménagers, avec un classement de A à G, mais avec plus d'informations.

Les consommations d'énergie prises en compte dans DISPLAY sont toutes les consommations, pour tous les usages : chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire, cuisson, éclairage, ventilation et ensemble des consommations des appareils électriques (électroménager, audiovisuel, informatique, bureautique). Ces consommations, connues en énergie finale au niveau de l'immeuble, sont converties en énergie primaire par le logiciel DISPLAY mis à disposition des collectivités locales (en ligne en 23 langues).

La place du bâtiment sur l'échelle énergie de l'étiquette est déterminée à partir de sa consommation primaire totale par m². On déduit de cette consommation les émissions de CO² induites. La consommation d'eau est également prise en compte.

Les performances sont affichées chaque année, ce qui permet de vérifier les progrès ou les dérives.

La prise en compte des consommations totales distingue DISPLAY de la comptabilité des consommations d'énergie des bâtiments selon les réglementations thermiques du bâtiment : celles-ci, en effet, ne prennent pas en compte les consommations des appareils électriques (électroménager, audiovisuel, informatique, bureautique), mais seulement celles (également en énergie primaire) destinées à cinq usages : chauffage, climatisation, eau chaude, éclairage et ventilation.

Contact : www.display-campaign.org

Campagnes d'information

Bien qu'elles ne soient pas faciles à évaluer, les campagnes d'information sur la manière d'économiser l'énergie "à la maison" ou "au bureau" existent dans de nombreux

pays. Elles participent à l'éducation générale sur les thèmes de l'énergie et de l'environnement, et tous les acteurs s'accordent à penser qu'il faut les renouveler régulièrement, afin de créer un contexte positif pour les autres mesures.

Par exemple, les campagnes d'information expliquent les raisons de l'interdiction progressive des ampoules à incandescence, d'une prime à l'achat ou d'un crédit d'impôt, et renforcent les activités entreprises dans le cadre des certificats blancs (c'est ce que relève l'autorité pour l'énergie électrique et le gaz en Italie dans son analyse du dispositif des certificats blancs). Ces campagnes soutiennent les acteurs du marché en apportant aux fabricants, distributeurs et fournisseurs d'énergie une caution institutionnelle ou d'ONG reconnues. En apportant plus de transparence sur le marché, elles encouragent les consommateurs à passer à l'action. Le prix de l'électroménager a, par exemple, baissé de 20 % au Danemark, après que la société *Electricity Saving Trust* ait lancé un site internet permettant de trouver les appareils les plus économes, en indiquant leur prix et l'adresse des distributeurs.

Accords volontaires

Les accords volontaires désignent généralement des accords proposés par l'industrie aux pouvoirs publics, souvent dans le but d'éviter des mesures réglementaires. L'objectif est alors d'augmenter la performance énergétique moyenne d'un groupe de produit. Le contenu des accords porte sur la production de produits performants, l'engagement à ne plus produire des produits non performants selon un certain calendrier.

Il peut également s'agir de mesures volontaires, au sens où des acteurs du marché s'engagent dans une nouvelle voie stratégique et prennent pour cela des initiatives en faveur de produits économes.

Les pouvoirs publics apprécient ces accords, plus flexibles et plus faciles à négocier que des normes. En Europe, l'expérience des accords volontaires avec le Comité européen des constructeurs d'équipement domestique (CECED) est positive. Selon les évaluations, ils ont permis, par exemple, une réduction de 20 % de la consommation d'énergie des lave-linge et lave-vaisselle, à la fin des années 1990.

Toutefois, les niveaux de performance des accords sont généralement moins ambitieux que ceux des normes (comme, par exemple, l'accord volontaire sur les télévi-

sions), et il s'avère plus difficile de mettre en place un système indépendant de vérification et de sanction en cas d'échec, et de couvrir réellement tout le marché. Les produits des fabricants qui n'ont pas signé l'accord continuent en effet à échapper à tout effort d'amélioration.

Aujourd'hui, de nombreux pays s'intéressent aux distributeurs de produits. Ces derniers choisissent en effet les gammes de produits qu'ils vont vendre et sont au contact des consommateurs. Ils sont donc idéalement placés pour orienter des choix qui auront des conséquences durant parfois dix à quinze ans.

Si des accords généraux sont signés avec des grandes enseignes qui acceptent de travailler sur leur organisation logistique ou la facture énergétique de leurs magasins, il est en revanche très rare que des distributeurs fassent évoluer leurs gammes de produits vers plus de performance énergétique, à moins d'un changement de stratégie. Or, aucune enseigne ne prendrait de risque de voir chuter ses ventes en proposant des produits qui pourraient ne pas convenir à leur clientèle (c'est là toute la question).

En revanche, lorsqu'une enseigne veut réellement investir le terrain des produits performants, de bons résultats peuvent être atteints, tant que les ventes et les profits se maintiennent. Pour aider les distributeurs dans cette voie, il faut comprendre leurs besoins (différents selon les filières de distribution et les positionnements sur le volume des ventes, la qualité, la marge faite sur les produits), et ne pas considérer que leur métier est de sensibiliser ou transmettre un message institutionnel. Les programmes de soutien doivent donc : aider à la vente de produits performants ; prévoir un temps assez large pour l'adaptation des gammes ; apporter des supports de communication impartiale renforçant les messages des distributeurs ; aider à la sélection de gamme ; apporter des outils simples et efficaces de différenciation (étiquette énergie, label).

L'Agence nationale de l'énergie allemande (DENA) a, depuis 2002, établi un programme de coopération avec plus de 8 000 distributeurs indépendants ou de grandes

chaînes de distribution. DENA soutient ponctuellement les différents projets des distributeurs, grâce à une collaboration à trois niveaux :

- un niveau de base : les distributeurs peuvent commander gratuitement des éléments de communication visant les vendeurs et /ou les consommateurs ;
- un niveau soutenu : les distributeurs s'engagent à avoir des contacts réguliers avec DENA ;
- un niveau d'engagement : des contrats spécifiques sont signés entre DENA et chaque enseigne, afin de mettre en œuvre de vraies opérations communes de communication.

Formation pour les vendeurs et installateurs

La plupart des pays où existent des étiquettes énergie organisent des sessions de formation pour les vendeurs et les installateurs, concernant les appareils comme les chaudières, pour lesquels le circulateur peut nécessiter d'être

remplacé et choisi par l'installateur qui "remplace à l'identique".

Tous les acteurs s'accordent à penser que ces formations sont absolument nécessaires. Un vendeur doit en effet pouvoir expliquer le contenu d'une étiquette énergie, justifier le choix d'une pièce de remplacement, pouvoir convaincre et vendre des produits performants. Dans la pratique, les résultats sont toutefois incertains : la rotation du personnel est souvent très rapide dans la profession ; les petits distributeurs n'ont souvent pas le temps de se former (et doivent fermer leur magasin pour le faire) ; les grandes chaînes de distribution ont leurs propres formations qui portent principalement sur les techniques de vente ; la formation est inefficace si elle n'est pas adaptée à la gamme de produits vendus en magasin, ou si les commissions aux vendeurs ne s'appliquent pas aux produits performants. Un vendeur, même parfaitement formé à l'utilisation de l'étiquette énergie, ne s'en servira pas si sa hiérarchie lui demande de vendre des produits mal classés.

Encadré 11. Un fonds spécifique pour les économies d'électricité, *The Danish Electricity Saving Trust (EST)* au Danemark

The Danish Electricity Saving Trust (EST) est une institution indépendante sous la tutelle du ministère du Climat et de l'Énergie au Danemark. Elle a été créée en 1997 pour promouvoir les économies d'électricité dans le secteur résidentiel et le secteur public. La première mission de EST, lors de sa création, était d'encourager les conversions du chauffage électrique vers d'autres systèmes de chauffage (réseaux de chaleur, gaz).

EST gère un fonds dédié alimenté par un prélèvement sur les factures d'électricité des ménages et du secteur public (*Special Electricity Saving Charge*) de 0,006 DKK (couronne danoise) par kWh, soit 0,08 euro/kWh (ce qui représente 4 % du prix du kWh pour les particuliers, et 5 % pour le secteur public).

En 2009, EST a lancé le « Plan d'action pour les économies d'électricité », dont le but est d'inverser la tendance à la hausse de la consommation d'électricité - « *The upward electricity consumption must be broken!* ». Le Plan se donne pour objectif une économie annuelle de 150 GWh en effet direct de ses actions, soit environ 1 % de la consommation d'électricité des secteurs concernés.

Les principaux outils du plan d'action sont :

- des campagnes d'information permanentes (conseils à l'achat : *Energy Saving Label* et *Purchasing Guidelines*) ;
- des initiatives de marché : accords volontaires (fournisseurs d'équipements, fournisseurs d'énergie, associations de consommateurs...), des engagements ("*Curve breaker agreements*") des municipalités, administrations et compagnies commerciales.

Contact : www.savingtrust.dk

6.5.4 Autres instruments

Analyse des marchés

En Europe, peu de pays disposent d'analyses techniques sur les produits ainsi que de données de marché détaillées et régulièrement mises à jour permettant de réellement suivre les besoins de l'industrie et l'état de l'art. Ces analyses recouvrent un grand nombre de produits et coûtent cher. Elles sont toutefois indispensables aux autorités pour suivre l'impact de leurs politiques et les évolutions du marché.

Identification des produits les plus performants

L'identification des produits les plus performants permet aux consommateurs de faire des choix éclairés (à condition d'être bien informés), et aux décideurs, de connaître les meilleures technologies pour planifier leurs futures politiques.

Les produits peuvent être classés avec ou sans l'utilisation d'étiquettes ou labels apposés sur les différents modèles. Les labels nécessitent la mise en place d'un système parfois lourd pour la fourniture des étiquettes, des logos, la vérification des informations, des cahiers des charges plus contraignants, etc. Ainsi, la base de données qui présente les équipements de bureau bénéficiant du label *Energy Star* est souvent perçue comme partiellement obsolète, une bonne partie des produits n'étant plus disponible en magasin.

Des sites internet présentant les produits les plus performants sont des outils plus flexibles (leurs critères de sélection peuvent évoluer avec le marché) et plus faciles à maintenir à jour. Il existe, par exemple, un site sur les chaudières performantes au Royaume-Uni (www.sedbuk.com), les sites Topten (www.topten.info) qui présentent les modèles les plus performants dans de nombreuses catégories de produits, ou le site danois qui présente non les produits, leur prix et les adresses des distributeurs (www.savingtrust.dk/consumer/products).

Encadré 12. www.topten.info

Apporter de la transparence au marché, informer les consommateurs, dialoguer avec les fabricants

Topten est un guide d'achat disponible sur internet, dont l'objectif est d'aider à la transformation des modes de production et de consommation.

Topten sélectionne les "meilleurs" produits du moment (les plus sobres en énergie et les moins nuisibles pour l'environnement) et en présente les caractéristique en ligne : principales fonctions, taille, prix d'achat, photo, coût à l'usage, etc. Des listes d'appareils électroménagers, de bureautique, d'éclairage ou de transport sont ainsi très régulièrement établies et mises à jour. Topten évolue en même temps que le marché : les conditions pour que des modèles soient sélectionnés sont continuellement adaptées aux meilleurs produits disponibles.

Un premier site Topten a été lancé en Suisse en 2000 ; 10 ans plus tard, Topten est un réseau présent dans 16 pays européens (les Etats-Unis et la Chine auront leur site en ligne fin 2010). Cette ouverture internationale permet d'aller au delà du simple site internet d'information pour les consommateurs – même si les études de marché proches des consommateurs restent la base de ses activités – Topten peut ainsi peser :

- sur les fabricants et les distributeurs en leur montrant (nombre de visiteurs et mentions dans la presse à l'appui) qu'il existe un intérêt grandissant pour les produits performants ;
- sur les achats publics : les acheteurs apprécient les conseils et le cahier des charges Topten, et constatent, grâce aux sélections en ligne que leurs appels d'offres ne seront pas infructueux, malgré leur exigence ;

- et surtout sur les réglementations : Topten est la seule revue européenne en temps réel des meilleures technologies. Cette revue apporte plus de transparence et permet aux décideurs de mieux connaître l'état de l'art avant de statuer sur des futurs programmes d'étiquetage, de seuils minimums de performance, ou des programmes de primes à l'achat (basés sur les listes Topten).

Les sélections s'effectuent de manière impartiale (Topten n'a pas de liens avec les fabricants ou les distributeurs, même si les informations mises en ligne sont vérifiées grâce à la collaboration des chefs de produit) et en toute transparence (Topten base ses critères de sélection sur des informations officielles disponibles concernant la performance des produits, et les différentes méthodologies utilisées sont présentées en ligne).

Le site www.topten.info sert de portail d'accès vers les sites nationaux, présente la revue européenne des produits "Best of Europe", ainsi que des recommandations sur les politiques à mettre en œuvre.

En France, les sélections des meilleurs produits disponibles sur le marché sont accessibles grâce au site www.guide-topten.com ; le projet est soutenu par l'Ademe, le *World Wide Fund* (WWF) et la CLCV (association nationale de consommateurs et d'usagers)

Politiques d'achat des équipements performants

Les achats publics

Traditionnellement, les achats publics se font sur l'offre la moins chère pour ne pas grever le budget public. Les codes des marchés publics ont aujourd'hui évolué et les acheteurs publics sont autorisés à préférer le « mieux disant » là où, il y a quelques années, il fallait préférer le « moins disant ». Sur la base d'un raisonnement sur le « coût global » (prise en compte des coûts de fonctionnement et donc du coût de l'énergie) comme des nuisances environnementales, les appels d'offre peuvent contenir des spécifications sur l'efficacité énergétique des appareils et équipements ("*Green Procurement*"). Il y a là une marge de manœuvre considérable pour les autorités publiques, à tous les niveaux.

Cette question est d'autant plus importante que les directives et les engagements européens mettent l'accent sur le « rôle exemplaire » des autorités publiques (notamment dans la Directive sur l'efficacité énergétique et les services énergétiques).

Les achats groupés à exigence de performance⁵²

Un premier intérêt des achats groupés (organisés sur une ase coopérative, ou associative, ou d'entreprise) est d'obtenir des coûts très intéressants à l'unité.

Un deuxième intérêt est que, si la demande d'un équipement est suffisamment importante, elle peut être accompagnée, dans un appel d'offres compétitif, d'une exigence de performance, ce qui « force » les fournisseurs et les fabricants à améliorer leur produit dans le sens d'une plus grande efficacité.

Cette méthode de "*Technology Procurement*" a été particulièrement développée en Suède. Ce pays, qui a plus de vingt-cinq ans d'expérience sur ce type de programme, développe dans le secteur commercial un programme spécifique, BELOK, qui consiste à coordonner des promoteurs immobiliers pour l'acquisition de produits et systèmes efficaces en énergie pour les bâtiments commerciaux (www.belok.se).

Autre aspect important de cette méthode, l'accent est mis sur le fait de créer un pont entre l'offre et la demande. Un "intermédiaire" réunit les acheteurs potentiels, leur demande d'exprimer leurs besoins (en général sur les fonctions des appareils), ajoute des exigences énergétiques, qui peuvent requérir une avancée technologique ou une simple amélioration de conception, et publie un appel d'offre (assorti d'une commande ferme à la clé, d'une prime, et parfois de rien, car le simple fait d'identifier une demande et d'avoir la caution de cet intermédiaire suffit aux fabricants pour participer).

⁵² Ou « Acquisition coopérative de technologies performantes ».

Eléments de conclusion

La question du bon usage de l'électricité revêt une importance toute particulière dans les pays émergents comme la Chine et l'Inde. Dans ces deux pays, la consommation de ce produit noble, dont la production et la mise à disposition des usagers engagent des processus complexes et coûteux, est en très rapide croissance, en particulier depuis une décennie. Depuis vingt-cinq ans, la consommation d'électricité a cru d'un facteur 5 en Chine, 2,35 en Inde, contre 1,35 aux Etats-Unis, et 1,30 dans l'Union européenne.

L'intensité électrique finale – le rapport de la consommation finale d'électricité au produit intérieur brut à parité de pouvoir d'achat – reste sensiblement plus élevée en Chine qu'aux Etats-Unis et dans l'Union Européenne, et de même niveau pour l'Inde (0,39 MWh/USDppa pour la Chine, 0,19 pour l'Inde, 0,20 pour l'Union européenne, 0,29 pour les Etats-Unis). Les rendements de mise à disposition d'un kWh d'électricité finale sont plus faibles (0,22 en Inde, 0,31 en Chine, 0,35 aux Etats-Unis et dans l'Union européenne), et les émissions de CO₂ du kWh final sont nettement plus élevées (1 220 g CO₂/kWh en Inde, 960 en Chine, 620 aux Etats-Unis, 420 dans l'Union européenne).

Les quantités d'énergie primaire nécessaires à la mise à disposition de cette électricité sont considérables : 814 Mtep (39 % de la consommation totale d'énergie) en Chine, 226 Mtep en Inde (37 %), et proches, en proportion du total, de celles des Etats-Unis (42 %) et de l'Union européenne (41 %).

Les divers scénarios de prospective à l'horizon 2030 de l'AIE proposent des croissances encore très fortes de ces consommations d'électricité en Chine et en Inde, durant les deux prochaines décennies : un facteur 2,5 à 3,5 pour la Chine, et de 3,3 à 4 pour l'Inde.

L'impact d'un bon usage de l'électricité sur l'économie, la sécurité d'approvisionnement et les émissions de GES, les prochaines décennies, est donc particulièrement important pour ces pays, mais aussi pour l'ensemble de la planète.

L'analyse sectorielle des consommations d'électricité en Chine et en Inde montre que les deux secteurs principaux d'usage de l'électricité sont actuellement, dans ces deux pays, le secteur industriel (Chine, 69 % du total et Inde, 46 % du total), suivi de l'ensemble résidentiel et tertiaire. La consommation de ces deux derniers secteurs connaît une croissance encore plus rapide que celle de l'industrie. Par contre, la consommation d'électricité dans les transports, limitée aujourd'hui à une part des transports ferroviaires, y est encore marginale.

L'analyse des potentiels d'économie et de substitution d'électricité à des énergies fossiles au regard des critères de bon usage de l'électricité (ressources naturelles, sécurité d'approvisionnement, économie, égalité d'accès aux services, environnement, etc.) conduit aux constats suivants :

- Dans le secteur industriel de la Chine et de l'Inde, caractérisé par l'importance des branches très consommatrices d'énergie (chimie lourde, sidérurgie, matériaux de construction, etc.), les potentiels d'économie d'énergie satisfaisant à l'ensemble des critères du « bon usage de l'électricité » sont importants : plus de 1 100 TWh en Chine (24 % par rapport à la consommation du secteur en 2030), et plus de 200 TWh en Inde (23 %), soit 20 % de plus que la consommation d'électricité finale de l'Union européenne du secteur en 2008, et cela dans de bonnes conditions économiques.

En termes d'énergie primaire et d'émissions de CO₂, ces

économies sont d'autant plus importantes que les rendements de production d'électricité et les émissions spécifiques de CO₂ n'auront probablement pas encore atteint en 2030 les valeurs européennes. Le bilan prévisionnel de l'enjeu de substitutions d'électricité dans l'industrie à des combustibles est moins encourageant. Il faudra en effet des performances particulièrement bonnes des technologies de substitution dans ces pays pour les justifier du point de vue des économies d'énergie primaire ou d'émissions de CO₂, tant que les moyens de production électrique de ces deux pays – aujourd'hui dominés par les centrales à charbon – n'auront pas changé significativement, ce qui peut demander deux décennies.

- Dans les secteurs résidentiel et tertiaire, les consommations d'électricité, encore très basses en 1992, ont augmenté à très vive allure en Chine (un rapport 5,5) et un peu moins vite en Inde (un rapport 2,5). Les quelques exemples très partiels d'enquêtes de consommation de parcs de logements et de parcs tertiaires, dont on dispose, ne permettent pas d'établir une description fiable d'évolution des consommations par usage dans les différentes régions. Il semble cependant qu'à côté des consommations spécifiques classiques (éclairage, froid domestique, audiovisuel et bureautique), dont l'évolution pourrait suivre l'évolution européenne avec l'augmentation du pouvoir d'achat des ménages urbains, une attention particulière devrait être portée à la climatisation (et, plus partiellement au chauffage des locaux), responsable de pointes saisonnières d'électricité coûteuses en investissement. L'estimation grossière des enjeux d'efficacité énergétique dans les secteurs résidentiel et tertiaire, réalisée dans l'étude à partir d'une simulation de développement « à l'américaine » ou « à l'européenne » montre,

au moins qualitativement, l'importance du contrôle des évolutions de la consommation d'électricité dans ces deux secteurs. La différence des besoins d'électricité finale au moment indéterminé (mais très probablement à l'échelle de moins d'un demi-siècle) de la convergence des situations dans le résidentiel-tertiaire de la Chine et de l'Inde avec celle des Etats-Unis d'aujourd'hui par exemple, atteindrait en effet 8 500 TWh en Chine et 7 200 TWh en Inde.

- Enfin, dans le secteur des transports, deux points principaux ressortent de l'étude : le premier concerne l'intérêt majeur d'une pénétration rapidement accrue des modes guidés de transport (pas prioritairement alimentés à l'électricité, sauf pour des raisons de contrainte pétrolière). Ces transferts de modes permettent des économies très importantes d'énergie et donc de CO₂. Si c'est l'électricité qui, de plus, pénètre plus massivement qu'aujourd'hui dans ces modes de transport en substitution au fioul, s'y ajoutent alors des économies de produits pétroliers. Par contre, les bénéfiques, en termes d'émissions de CO₂, de la substitution électricité aux produits pétroliers dans les transports guidés, seront peu significatifs, tant que les moyens de production d'électricité resteront inchangés.

Le second point concerne le véhicule électrique. Contrairement à une opinion largement répandue, des programmes importants de véhicules électriques n'auront pas à court et moyen terme de conséquences positives sur les consommations primaires d'énergie, ni sur les émissions de CO₂ de la Chine et de l'Inde. Ils auront, par contre, des conséquences significatives sur l'indépendance pétrolière de ces pays ainsi que sur les pollutions locales, au prix d'investissements importants de production et de distribution d'électricité.

Liste des sigles et abréviations

A	Ampère
Ademe	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AIE	Agence internationale de l'énergie
CECED	Comité européen des constructeurs d'équipement domestique
CEF	Consommation d'énergie finale
CMV	Compression mécanique de vapeur
CPE	Contrat de performance énergétique
CVCV	Association nationale de consommateurs et d'utilisateurs
DENA	Agence nationale de l'énergie allemande
DPEB	Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments
ESCO	<i>Energy Service Company</i>
EST	<i>Danish Electricity Saving Trust</i>
FFEM	Fonds français pour l'environnement mondial
FMI	Fonds monétaire international
GES	Gaz à effet de serre
g eq.	Gramme équivalent
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
GWh	Gigawattheure
I	Intensité du courant électrique
J	Joule
Kep	Kilo équivalent pétrole
KW	Kilowatt
kWh	Kilowattheure
MDE	Maîtrise de l'énergie
METI	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i>
MW	Mégawatt
PAC	Pile à combustible
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PED	Pays en développement
PIB	Produit intérieur brut
p.km	Passager.km
PMA	Pays les moins avancés
PPA	Parité de pouvoir d'achat
ppm	Partie par million
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>

RMW	Recompression mécanique de vapeur
RSE	Responsabilité sociale des entreprises
RTE	Réseau de transport d'électricité
R & D	Recherche et Développement
R & T	Résidentiel et Tertiaire
Tep	Tonne équivalent pétrole
TWh	Térawattheure
U	Tension électrique
UE	Union européenne
V	Volt
W	Watt
Wh	Wattheure
WWF	<i>World Wide Fund</i>

Série Documents de travail / Working Papers Series Publiés depuis janvier 2009 / published since January 2009

Les numéros antérieurs sont consultables sur le site : <http://recherche.afd.fr>

Previous publications can be consulted online at: <http://recherche.afd.fr>

-
- N° 78 « L'itinéraire professionnel du jeune Africain » Les résultats d'une enquête auprès de jeunes leaders Africains sur les « dispositifs de formation professionnelle post-primaire »
Richard Walther, consultant ITG, Marie Tamoifo, porte-parole de la jeunesse africaine et de la diaspora
Contact : Nicolas Lejosne, département de la Recherche, AFD - janvier 2009.
-
- N° 79 Le ciblage des politiques de lutte contre la pauvreté : quel bilan des expériences dans les pays en développement ?
Emmanuelle Lavallée, Anne Olivier, Laure Pasquier-Doumer, Anne-Sophie Robilliard, DIAL - février 2009.
-
- N° 80 Les nouveaux dispositifs de formation professionnelle post-primaire. Les résultats d'une enquête terrain au Cameroun, Mali et Maroc
Richard Walther, Consultant ITG
Contact : Nicolas Lejosne, département de la Recherche, AFD - mars 2009.
-
- N° 81 *Economic Integration and Investment Incentives in Regulated Industries*
Emmanuelle Auriol, Toulouse School of Economics, Sara Biancini, Université de Cergy-Pontoise, THEMA,
Comments by : Yannick Perez and Vincent Rious - April 2009.
-
- N° 82 Capital naturel et développement durable en Nouvelle-Calédonie - Etude 1. Mesures de la « richesse totale » et soutenabilité du développement de la Nouvelle-Calédonie
Clément Brelaud, Cécile Couharde, Vincent Géronimi, Elodie Maître d'Hôtel, Katia Radja, Patrick Schembri, Armand Taranco, Université de Versailles - Saint-Quentin-en-Yvelines, GEMDEV
Contact : Valérie Reboud, département de la Recherche, AFD - juin 2009.
-
- N° 83 *The Global Discourse on "Participation" and its Emergence in Biodiversity Protection*
Olivier Charnoz. - July 2009.
-
- N° 84 *Community Participation in Biodiversity Protection: an Enhanced Analytical Framework for Practitioners*
Olivier Charnoz - August 2009.
-
- N° 85 Les Petits opérateurs privés de la distribution d'eau à Maputo : d'un problème à une solution ?
Aymeric Blanc, Jérémie Cavé, LATTIS, Emmanuel Chaponnière, Hydroconseil
Contact : Aymeric Blanc, département de la recherche, AFD - août 2009.
-
- N° 86 Les transports face aux défis de l'énergie et du climat
Benjamin Dessus, Global Chance.
Contact : Nils Devernois, département de la Recherche, AFD - septembre 2009.
-
- N° 87 Fiscalité locale : une grille de lecture économique
Guy Gilbert, professeur des universités à l'École normale supérieure (ENS) de Cachan
Contact : Réjane Hugounenq, département de la Recherche, AFD - septembre 2009.
-
- N° 88 Les coûts de formation et d'insertion professionnelles - Conclusions d'une enquête terrain en Côte d'Ivoire
Richard Walther, expert AFD avec la collaboration de Boubakar Savadogo (Akilia) et de Borel Foko (Pôle de Dakar)
Contact : Nicolas Lejosne, département de la Recherche, AFD - octobre 2009.

- N° 89 Présentation de la base de données. Institutional Profiles Database 2009 (IPD 2009)
Institutional Profiles Database III - Presentation of the Institutional Profiles Database 2009 (IPD 2009)
Denis de Crombrughe, Kristine Farla, Nicolas Meisel, Chris de Neubourg, Jacques Ould Aoudia, Adam Szirmai
Contact : Nicolas Meisel, département de la Recherche, AFD - décembre 2009.
- N° 90 Migration, santé et soins médicaux à Mayotte
Sophie Florence, Jacques Lebas, Pierre Chauvin, Equipe de recherche sur les déterminants sociaux de la santé et du recours aux soins UMRS 707 (Inserm - UPMC)
Contact : Christophe Paquet, département Technique opérationnel (DTO), AFD - janvier 2010.
- N° 91 Capital naturel et développement durable en Nouvelle-Calédonie - Etude 2. Soutenabilité de la croissance néo-calédonienne : un enjeu de politiques publiques
Cécile Couharde, Vincent Géronimi, Elodie Maître d'Hôtel, Katia Radja, Patrick Schembri, Armand Taranco
Université de Versailles – Saint-Quentin-en-Yvelines, GEMDEV
Contact : Valérie Reboud, département Technique opérationnel, AFD - janvier 2010.
- N° 92 *Community Participation Beyond Idealisation and Demonisation: Biodiversity Protection in Soufrière, St. Lucia*
Olivier Charnoz, Research Department, AFD - January 2010.
- N° 93 *Community participation in the Pantanal, Brazil: containment games and learning processes*
Participation communautaire dans le Pantanal au Brésil : stratégies d'endiguement et processus d'apprentissage
Olivier Charnoz, département de la Recherche, AFD - février 2010.
- N° 94 Développer le premier cycle secondaire : enjeu rural et défis pour l'Afrique subsaharienne
Alain Mingat et Francis Ndem, IREDU, CNRS et université de Bourgogne
Contact : Jean-Claude Balmès, département Education et formation professionnelle, AFD - avril 2010
- N° 95 Prévenir les crises alimentaires au Sahel : des indicateurs basés sur les prix de marché
Catherine Araujo Bonjean, Stéphanie Brunelin, Catherine Simonet, CERDI - mai 2010.
- N° 96 La Thaïlande : premier exportateur de caoutchouc naturel grâce à ses agriculteurs familiaux
Jocelyne Delarue, Département de la Recherche, AFD - mai 2010.
- N° 97 Les réformes curriculaires par l'approche par compétences en Afrique
Francoise Cros, Jean-Marie de Ketele, Martial Dembélé, Michel Develay, Roger-François Gauthier, Najoua Ghriss, Yves Lenoir, Augustin Murayi, Bruno Suchaut, Valérie Tehio - juin 2010.
- N° 98 Les coûts de formation et d'insertion professionnelles - Les conclusions d'une enquête terrain au Burkina Faso
Richard Walther, Boubakar Savadogo, consultants en partenariat avec le Pôle de Dakar/UNESCO-BREDA.
Contact : Nicolas Lejosne, département de la Recherche, AFD - juin 2010.
- N° 99 *Private Sector Participation in the Indian Power Sector and Climate Change*
Shashanka Bhide, Payal Malik, S.K.N. Nair, Consultants, NCAER
Contact : Aymeric Blanc, Research Department, AFD - June 2010.
- N° 100 Normes sanitaires et phytosanitaires : accès des pays de l'Afrique de l'Ouest au marché européen - Une étude empirique
Abdelhakim Hammoudi, Fathi Fakhfakh, Cristina Grazia, Marie-Pierre Merlateau.
Contact : Marie-Cécile Thirion, département de la Recherche, AFD - juillet 2010.
- N° 101 Hétérogénéité internationale des standards de sécurité sanitaire des aliments : Quelles stratégies pour les filières d'exportation des PED ? - Une analyse normative
Abdelhakim Hammoudi, Cristina Grazia, Eric Giraud-Héraud, Oualid Hamza.
Contact : Marie-Cécile Thirion, département de la Recherche, AFD - juillet 2010.

- N° 102 Développement touristique de l'outre-mer et dépendance au carbone
Jean-Paul Ceron, Ghislain Dubois et Louise de Torcy.
Contact : Valérie Reboud, AFD - octobre 2010.
- N° 103 Les approches de la pauvreté en Polynésie française : résultats et apports de l'enquête sur les conditions de vie en 2009
Javier Herrera, IRD-DIAL, Sébastien Merceron, Insee - novembre 2010.
Contact : Cécile Valadier, département de la Recherche
- N° 104 La gestion des déchets à Coimbatore (Inde) : frictions entre politique publique et initiatives privées
Jérémy Cavé, Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés (LATTTS), CNRS - décembre 2010.
- N° 105 Migrations et soins en Guyane - Rapport final à l'Agence Française de Développement dans le cadre du contrat AFD-Inserm
Anne Jolivet, Emmanuelle Cadot, Estelle Carde, Sophie Florence, Sophie Lesieur, Jacques Lebas, Pierre Chauvin
Contact : Christophe Paquet, département Technique opérationnel (DTO), AFD - décembre 2010.